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

Ministero dello Sviluppo Economico

Accordo di Programma MiSE/ENEA 2012-2014

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del terzo anno di attività



Marzo 2016

Accordo di Programma MiSE-ENEA 2012-14

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO
Risultati del terzo anno di attività

A cura di *Marina Ronchetti*

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

2016 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN: 978-88-8286-331-9

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

Accordo di Programma MiSE-ENEA 2012-14

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del terzo anno di attività

A cura di

Marina Ronchetti

con i contributi di

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

Marzo 2016

Un sentito ringraziamento ai colleghi Rocco Ascione, Vincenzo Gerardi, Agostino Iacobazzi, Anna Naviglio, Rosa Provaroni per il loro contributo alla pubblicazione del volume

Indice

Presentazione 7

Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

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

PRODUZIONE DI ENERGIA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE

Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili 57
Responsabile scientifico: Vito Pignatelli

Energia elettrica da fonte solare Ricerca su celle fotovoltaiche innovative 127
Responsabile scientifico: Paola Delli Veneri

Energia elettrica da fonte solare Solare termodinamico 165
Responsabile scientifico: Domenico Mazzei

Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso 199
Responsabile scientifico: Gianmaria Sannino

Cattura e sequestro della CO_2 prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili 221
Responsabile scientifico: Stefano Giammartini

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per i nucleare di IV generazione 267
Responsabile scientifico: Felice De Rosa, Mariano Tarantino

Attività di fisica della fusione complementari a ITER 307
Responsabile scientifico: Aldo Pizzuto

RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi 327
Responsabile scientifico: Ilaria Berini

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico 431
Responsabile scientifico: Gaetano Fasano

Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione 473
Responsabile scientifico: Nicolandrea Calabrese

Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità 517
Responsabile scientifico: Antonino Genovese

Elenco documenti tecnici 549

Abbreviazioni ed acronimi 561

Presentazione

Il volume presenta i risultati delle attività svolte da ENEA, nella terza annualità (Piano Annuale di Realizzazione 2014) dell'Accordo di Programma 2012-2014 con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

La Ricerca di Sistema Elettrico, comprende attività di ricerca e sviluppo e studi di carattere sistemico e prenormativo, finalizzate alla promozione di un sistema energetico più sicuro ed efficiente, che consenta il contenimento dei prezzi dell'energia elettrica per i consumatori e le imprese attraverso lo sviluppo di tecnologie sempre più innovative, efficienti e competitive, che migliorino la qualità del servizio e diminuiscano i costi e l'impatto sull'ambiente.

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

ENEA, ha attivato 11 progetti, all'interno delle tre aree di ricerca previste dal Piano Triennale 2012-14 sulla Ricerca di Sistema Elettrico: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico, Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente e Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica.

In particolare, nel campo delle energie rinnovabili, sono proseguite le ricerche su sistemi per la valorizzazione energetica delle biomasse (sia mediante la produzione di biogas da utilizzare per co-generazione in impianti decentralizzati di piccola-media taglia sia attraverso lo sviluppo di sistemi ad elevato rendimento basati sull'impiego di sali fusi come vettori energetici), su componenti e impianti prototipali per la produzione di energia da correnti marine e lo sviluppo di tecnologie innovative per la realizzazione di sistemi fotovoltaici e di componenti di impianti solari termici a concentrazione. Nel settore dell'utilizzo sostenibile dei combustibili fossili sono continuate le attività di studio e sperimentazione di tecnologie di cattura e sequestro della CO_2 (CCS), parte delle quali condotte in collaborazione con la società Sotacarbo presso il Polo Tecnologico del Sulcis in Sardegna

Sono proseguite le attività sul nuovo nucleare da fissione che hanno riguardato studi sulla sicurezza degli impianti e sulle tecnologie del nucleare di IV Generazione (reattori veloci refrigerati a piombo). Per nucleare da fusione sono state portate avanti le attività di sviluppo di componenti (bobine, casse, alimentatori) ad alto contenuto tecnologico per la realizzazione di una macchina Tokamak da installare Naka in Giappone, a supporto del programma ITER, nell'ambito dell'Accordo Broader Approach tra il Governo Italiano e F4E Agenzia europea per la fusione.

Per quanto riguarda il risparmio energetico negli usi finali, sono state sviluppate ricerche inerenti l'efficienza energetica nei settori dei servizi, industria e civile, con attività specifiche sulla riqualificazione energetica degli edifici del patrimonio immobiliare pubblico, e svolte e ricerche nel settore della climatizzazione anche con la realizzazione di prototipi sperimentali, e della mobilità elettrica.

Sono state effettuate inoltre attività di ricerca su componenti e sistemi per accumulo di energia elettrica, essenziali per la diffusione delle fonti rinnovabili che sono caratterizzate da una forte discontinuità temporale.

Le attività progettuali sono state condotte da circa 500 ricercatori, afferenti ai Dipartimenti ENEA Tecnologie Energetiche, Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali e all'Unità Tecnica Efficienza Energetica, operativi in sette centri (Casaccia, Frascati, Trisaia, Bologna, Brasimone, Saluggia, Ispra).

Allo sviluppo delle attività hanno partecipato attivamente la principali istituzioni universitarie nazionali: 31 atenei con 51 dipartimenti universitari.

Nel volume per ognuno dei progetti di ricerca viene riportata una descrizione dell'attività svolta e i principali risultati conseguiti. La documentazione tecnica prodotta (270 rapporti tecnici), può essere acquisita dal sito web ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico), che consente di accedere anche a tutta la documentazione scientifica e ai software sviluppati nelle annualità precedenti dell'Accordo di Programma.

Vincenzo Porpiglia
Direzione Committenza
Servizio Amministrazioni Centrali

Sistemi avanzati di accumulo di energia

Lo stato di sviluppo dei sistemi di accumulo dell'energia per applicazioni mobili e stazionarie continua ad evidenziare un sempre maggiore impegno di ricerca e sviluppo ed applicazioni in varie parti del mondo.

La forma più diffusa di accumulo dell'energia elettrica (non ancora però per le reti elettriche) è certamente quella elettrochimica, mentre le applicazioni dell'accumulo nelle reti elettriche vede come principale applicazione i sistemi di pompaggio di acqua (accumulo meccanico) che rappresentano circa il 99% dell'intera potenza installata a livello mondiale. L'accumulo elettrochimico (in batterie e supercondensatori) è visto in prospettiva come la tecnologia più adatta per favorire una crescente introduzione delle fonti rinnovabili non programmabili e per agevolare l'evoluzione delle reti elettriche verso una configurazione più distribuita in una logica "smart", cioè di relazione biunivoca tra produttori e consumatori, intermediata dai gestori della rete. Attualmente 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 e costi non ancora allineati con le necessità del mercato.

Le batterie ritenute più interessanti ed, in prospettiva, a maggiore impatto economico sono: quelle al litio, ad alta temperatura ed a flusso. Le potenzialità tecniche delle batterie al litio e di altri sistemi di accumulo, come le batterie redox ed ad alta temperatura richiedono ulteriori studi e sviluppi per passare alla fase di dimostrazione a quella di sviluppo industriale in taglie significative, con l'obiettivo di avere sistemi economicamente più convenienti ed energeticamente più efficienti.

In diversi paesi dell'Unione Europea e principalmente in Canada, Cina, Corea del Sud, Giappone e Stati Uniti, sono in corso programmi pubblici di ricerca e sviluppo sui sistemi di accumulo per le reti elettriche, che superano le decine di milioni di euro all'anno. Le attività riguardano l'ottimizzazione di sistemi convenzionali (pompaggio d'acqua, volani, accumulo termico ed accumulo di aria compressa) e la ricerca di sistemi alternativi (accumulo elettrochimico con batterie e supercondensatori e, in piccola parte, l'accumulo in magneti superconduttori). L'impegno maggiore è comunque rivolto allo sviluppo di sistemi di accumulo elettrochimico per applicazioni di taglia inferiore ai 50 MW fino ad arrivare a qualche kW per rendere più sicura e affidabile, e più efficiente e competitiva, l'introduzione delle fonti rinnovabili.

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

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

Infine la Strategia Energetica Nazionale (SEN) vede nell'accumulo una delle possibili evoluzioni tecnologiche e di mercato in grado di sostenere le rilevanti modifiche strutturali del sistema energetico nazionale.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto prevede la realizzazione e verifica sperimentale di sistemi di accumulo elettrico, con prevalenza per quelli di tipo elettrochimico basati sul litio.

Nella terza annualità del Piano Triennale 2012-2014 per quanto riguarda i sistemi di accumulo elettrochimico, le attività si sono concentrate solo sui sistemi al litio con verifiche sperimentali dei principali materiali catodici ed

anodici selezionati nel corso delle annualità precedenti, questi sono stati prodotti in quantità significativa (fino a qualche decina di grammi), e quindi sottoposti a prove di caratterizzazione e a prove in celle da laboratorio di piccola taglia (essenzialmente celle di tipo a bottone), i materiali migliori sono stati utilizzati per realizzare sistemi multicella (stack) di taglia ulteriormente maggiorata (fino all'Ah). Le batterie redox a flusso Vanadio/Vanadio non sono state oggetto di ulteriori studi poiché si ritiene che non si possano ottenere risultati conclusivi, sia sulla base di quanto ottenuto negli anni precedenti e delle attività svolte dal CNR su stack di dimensioni più significative, i cui risultati potranno essere la base per eventuali ulteriori sviluppi nel prossimo triennio, sia per quanto riguarda i materiali elettrodici che elettrolitici (membrane di varia tipologia) e la struttura della cella/stack.

Per le attività di supporto all'uso dei sistemi di accumulo, sono proseguiti alcuni studi volti a completare l'analisi dei vantaggi nell'uso delle batterie al litio in applicazioni di estremo interesse applicativo (come la tranvia leggera di Bergamo); sui possibili modi per contenerne i costi operativi (come con le prove di "second life" su celle/moduli ai litio parzialmente usati) con lo studio di prove di vita accelerata per valutare le condizioni di degrado ed invecchiamento di batterie al litio; e sull'esecuzione di prove estreme su sistemi/celle al litio per la messa a punto e la verifica di condizioni di emergenza da adottare durante il loro uso.

Infine, sono stati completati gli studi relativi al riciclo delle batterie al litio di chimica diversa (con litio ferro fosfato al catodo o con cobaltite di litio) e si è arrivati fino alla progettazione preliminare di processi ecocompatibili ed economici per porre le basi dello sviluppo di linea di riciclo pilota nel triennio successivo.

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

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

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

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

L'attività prevedeva il completamento delle attività di ricerca per il consolidamento dei risultati più promettenti ottenuti nei due anni precedenti, in collaborazione con le Università di Bologna, Camerino e Roma su due percorsi alternativi: 1) il completamento della scelta ed ottimizzazione dei materiali anodici (ossidi di titanio, di silicio e di grafene) e catodici (litio ferro fosfato e fosfati di manganese) più innovativi e dei relativi processi di fabbricazione, e loro completa caratterizzazione chimica-fisica ed elettrochimica in celle in scala laboratorio; 2) l'ottimizzazione di componenti elettrodici con i migliori materiali anodici e catodici per la progettazione, realizzazione e prova di celle/stack completi in taglia significativa (fino a circa 1 Ah) da sottoporre a caratterizzazione elettrica (capacità, energia e potenza specifica e vita ciclica) ed elettrochimica. I sistemi completi dovevano essere delle due tipologie previste dal progetto, una versione di alta energia e l'altra di alta potenza.

Le attività di ricerca sono state sostanzialmente divise in due Subtask:

a.1 Ottimizzazione e produzione di materiali elettrodici a più alte prestazioni e/o più basso costo e prove in celle da laboratorio
a.2 Realizzazione e caratterizzazione di celle complete di taglia significativa.

Il programma di lavoro è stato suddiviso tra le università e diversi laboratori ENEA, proseguendo l'efficace metodo già applicato in precedenza: le università (Bologna e Camerino e Roma) hanno proseguito l'ottimizzazione dei materiali, sia catodici che anodici, con caratterizzazioni sperimentali in celle da laboratorio e la produzione di quantità adatte per la realizzazione di celle/sistemi di dimensioni prossime ad 1 Ah, mentre l'ENEA ha svolto attività sia di ricerca sui materiali anodici a base di silicio che di preparazioni di manufatti (elettrodi e celle complete).

a.1 Ottimizzazione e produzione di materiali elettrodici a più alte prestazioni e/o più basso costo e prove in celle da laboratorio

Per i materiali catodici, le attività dell'Università di Bologna hanno permesso di sviluppare celle litio-ione ad alta energia specifica con i migliori materiali ottenuti nell'annualità precedente, appartenenti a due tipologie diverse:

un ossido misto di Ni e Mn (LNMO) operante a un potenziale di 4,7-4,75 V e un fosfato misto di Mn e V (LMVP) operante a un potenziale medio di 3,8 V, intrinsecamente più stabile. I materiali catodici preparati, dopo opportuna caratterizzazione strutturale e morfologica, sono stati forniti a ENEA in quantità significative per la realizzazione di celle a bottone o di celle con area e capacità elevata.

Per la ricerca sui materiali anodici, le Università di Camerino e di Roma hanno prodotto materiali anodici a base di grafene, in scala utile (decine di grammi) per la verifica degli effetti dello scale up di produzione su prestazioni e costi, e litio-ossido di titanio.

Sono stati inoltre prodotti campioni di materiali anodici a base di silicio con l'ottimizzazione di tecniche di preparazione innovative di materiali nanostrutturati (nanofili) e loro deposizione su supporti di diversa natura da utilizzare in celle a litio, ottenendo nanofili di diametro determinato usando diversi catalizzatori: oltre ad Au, anche Cu e Ag colloidali con evidenti vantaggi economici per la realizzazione degli anodi. Tutti i materiali acquisiti e/o prodotti sono caratterizzati in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche, anche mediante SEM, XPS e TEM.

Materiali anodici

L'attività dell'Università di Bologna ha avuto come obiettivo primario lo sviluppo di materiali catodici per batterie litio-ione ad alta energia specifica operanti con elettroliti convenzionali a base di carbonati organici e sali di litio [rapporti RdS/PAR2014/166 e RdS/PAR2014/168]. È stata effettuata la sintesi e caratterizzazione di materiali catodici, per la preparazione di elettrodi a base di $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale (LNMO) con diversi additivi conduttori (quali grafene ossido ridotto, parzialmente ridotto e carbon black) e con diversi leganti, e messa a punto una nuova sintesi a stato solido di materiali a base di $LiMnPO_4$ e $LiV_2(PO_4)_3$. Cambiando i parametri di sintesi quali tempi di calcinazione e di pirolisi, sono stati ottenuti quattro materiali a base di LMVP che sono stati caratterizzati mediante diffrazione a raggi x (XRD), analisi termogravimetrica (TGA), microscopia elettronica a scansione e a trasmissione (SEM e TEM) e spettroscopia a dispersione di energia (EDS). L'aggiunta di grafene ossido in fase di sintesi ha portato a un quinto materiale a base di LMVP.

Gli elettrodi a base di LNMO e di LMVP, contenenti come legante il polivinilidenedifluoruro (PVdF), sono stati caratterizzati elettrochimicamente in semicelle *vs.* litio per valutarne la capacità di scarica e la stabilità a ripetuti cicli. Sono state inoltre eseguite misure di resistività dei materiali elettrodici depositati su Mylar per studiare l'effetto dell'aggiunta o del mescolamento degli additivi grafenici. Sono state condotte prove su elettrodi preparati utilizzando LNMO e polivinilacetato (PVAc) come legante in soluzione acquosa.

Sulla base dei risultati ottenuti, fra i diversi materiali sintetizzati è stato selezionato un campione di LMVP preparato con 4 ore di calcinazione e 4 ore di pirolisi, e il $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ con aggiunta di RGO commerciale mescolato al carbon black in fase di preparazione di elettrodi. Campioni dei diversi materiali sono stati inviati a ENEA per la preparazione degli elettrodi.

Su tali materiali sono stati condotti gli studi elettrochimici su celle complete in scala di laboratorio per la realizzazione di batterie litio-ione a elevata energia specifica. Le celle sono state provate utilizzando catodi a base di $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ sviluppati dall'Università di Bologna e anodi a base di silicio sviluppati dall'Università di Camerino. I test elettrochimici sono stati condotti a 30 °C mediante cicli di carica/scarica galvanostatica profonda per valutare le prestazioni dei sistemi in esame.

Per valutare l'effetto dell'ossido di grafene parzialmente ridotto (pRGO) e di quello ridotto (RGO) sulle proprietà elettrochimiche degli elettrodi a base di LNMO sono stati effettuati cicli di carica/scarica galvanostatici a differenti C-rate.

La Figura 1 mostra che l'aggiunta del RGO, mescolato direttamente con il LNMO prima o dopo l'aggiunta dell'additivo Carbon Super C65, influenza positivamente la ciclabilità della cella, in particolare a elevate C-rate, grazie a un effetto sinergico con il C65, permettendo di realizzare elettrodi che hanno prestazioni paragonabili a quelli con il pRGO. La sola presenza del RGO non è sufficiente ad assicurare una buona ciclabilità della cella nonostante l'additivo grafenico abbia una bassa resistività rispetto a quella del C65 (0,014 Ω cm vs. 0,2 Ω cm). Infatti, le resistività delle stese dei compositi LNMO/C65, LNMO/C65/RGO e LNMO/pRGO/C65 erano rispettivamente 4,3, 2,1 e 3,3 Ωcm, mentre quella di LNMO/RGO era $2{,}3 \cdot 10^3$ Ω cm, che giustifica le scarse prestazioni del materiale. Probabilmente, negli elettrodi con formulazione LNMO/RGO l'interazione tra il LNMO idrofilico e il RGO idrofobico non è favorita e non produce un buon contatto elettrico tra le particelle, mentre è favorita dalla presenza del C65 che produce un network conduttore nel LNMO/C65/RGO.

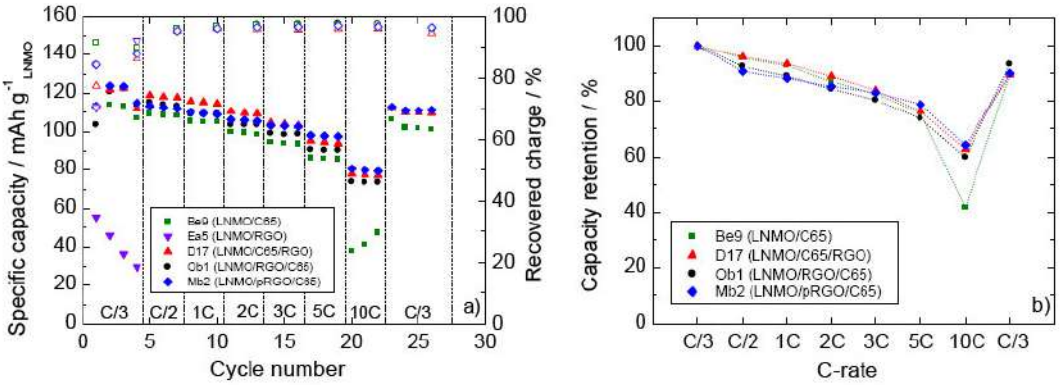


Figura 1. Test di discharge capability: a) capacità specifica e percentuale di carica recuperata vs. numero di cicli e b) ritenzione di capacità vs. C-rate di scarica degli elettrodi LNMO/C65 (Be9 4,40 mg cm^{-2}), LNMO/RGO (Ea5, 4,96 mg cm^{-2}), LNMO/C65/RGO (D17 4,06 mg cm^{-2}), LNMO/RGO/C65 (Ob1 4,92 mg cm$_{-2}$) e LNMO/pRGO/C65 (Mb25,73 mg cm^{-2}). Le cariche sono state eseguite a C/3

Tra i numerosi campioni di elettrodi sempre a base di LMNO, ne sono stati preparati alcuni con legante in mezzo acquoso (PVAc). La stesa è stata effettuata su fogli di alluminio precedentemente sottoposti a etching, con due passaggi, il primo per depositare uno strato sottilissimo e per assicurare una migliore adesione al collettore, il secondo per ottenere il carico di elettrodo desiderato. Con questo tipo di legante le stese risultano in genere meno aderenti al collettore, per cui gli elettrodi sono stati pressati a 5 t per 1 min prima di essiccarli sottovuoto ad 80°C per 4 ore.

Lo studio degli elettrodi compositi di $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale, con diversi additivi conduttori, ha confermato che la presenza di RGO o pRGO nella formulazione di elettrodo comporta migliori prestazioni sia in termini di capacità ciclata sia di stabilità. L'effetto benefico del ricoprimento di pRGO o RGO sul ciclaggio viene anche confermato dalle misure di impedenza, dalle quali si evince che la resistenza totale degli elettrodi LNMO/pRGO/C65 o LNMO/RGO/C65 è più bassa e aumenta più lentamente durante il ciclaggio. Questo probabilmente è da imputare alla presenza del ricoprimento grafenico che protegge l'elettrodo dalle reazioni collaterali responsabili della formazione di un SEI (solid electrolyte interface) resistivo che influenza negativamente anche la resistenza al trasferimento di carica. D'altra parte, la presenza del solo RGO porta a un materiale elettrodico molto resistivo, a dispetto della sua ottima conducibilità elettronica, evidenziando problemi di contatto tra i diversi materiali del composito in assenza del network conduttore prodotto dal carbon black nanometrico.

Date le prestazioni paragonabili di elettrodi LNMO/RGO/C65 e LNMO/pRGO/C65 e tenuto conto del fatto che la preparazione di pRGO da GO ha una resa di circa il 50% e la preparazione del materiale catodico LNMO/pRGO, pur essendo un processo semplice, comporta un mescolamento per oltre 20 ore in etanolo fino a completa evaporazione, si può concludere che è sicuramente più vantaggioso procedere con il semplice mescolamento a secco delle polveri per ottenere il primo tipo di elettrodo.

Per quanto riguarda la sintesi di fosfato di manganese e vanadio, LMVP, è stata ottimizzata sia la stechiometria, 0,6 $LiMnPO_4$·0,4 $Li_3V_2(PO_4)_3$, che la procedura a stato solido con un trattamento termico a 350 °C per 4 h seguito da uno a 700°C per 4 ore (A44). Gli elettrodi preparati hanno mostrato una buona stabilità al ciclaggio e una buona efficienza coulombica anche a 30 °C e sono in grado di sostenere scariche a C-rate fino a 10C, dimostrando che si è riusciti ad ottenere un materiale più conduttore di quello dello scorso anno. Tuttavia, la conducibilità dell'A44 rimane inferiore a quella del LNMO e questo è dimostrato dal fatto che l'aggiunta di 5% di RGO ad A44 invece che migliorarne le prestazioni le peggiora, indicando che il 5% di C65 non è in questo caso sufficiente per realizzare un efficiente network conduttore. Il vantaggio di A44/C65 rispetto a LNMO/C65 è la stabilità al ciclaggio, dovuta al fatto che il primo lavora a potenziali più bassi.

Gli studi elettrochimici su celle complete in scala di laboratorio per la realizzazione di batterie litio-ione a elevata energia specifica hanno consentito di verificare le prestazioni dei materiali catodici selezionati. Le celle sono state testate utilizzando catodi a base di $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ sviluppati dall'Università di Bologna e anodi a base di silicio sviluppati dall'Università di Camerino. I test elettrochimici sono stati condotti a 30 °C mediante cicli di carica/scarica galvanostatica profonda per valutare le prestazioni dei sistemi in esame. Il bilanciamento delle masse elettrodiche è, come sempre, un punto critico, soprattutto quando si lavora con elettrodi realizzati in scala di laboratorio e in particolare con anodi che esibiscono elevate capacità irreversibili.

La Figura 2 mostra i profili di potenziale e le capacità degli elettrodi sottoposti ad analisi.

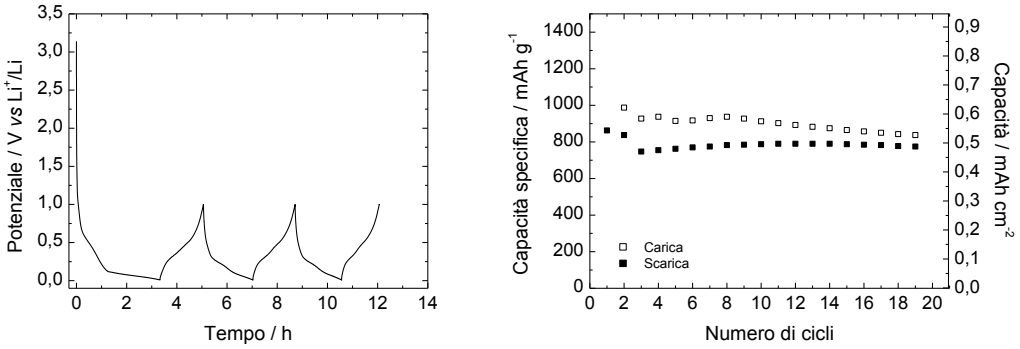


Figura 2. Profili di potenziale dell'elettrodo di Si/RGO (SiR3) *vs.* Li e capacità (in mAh g^{-1}_{attivo} e in mAh cm^{-2}) dell'elettrodo durante i cicli a C/2 a 30°C in EC: DMC - $LiPF_6$ 1M. Cut-off di potenziale di carica/scarica di 0,01 e 1,00 V *vs.* Li/Li^+

I dati relativi ai i primi quattro cicli di carica/scarica profonda della cella completa a una corrente di 0,280 mA cm^{-2} sono riportati in Figura 3. In particolare vengono mostrati i profili di potenziale della cella e degli elettrodi che la compongono e la capacità specifica della cella relativa alla somma della massa dei materiali attivi e la capacità per area geometrica unitaria.

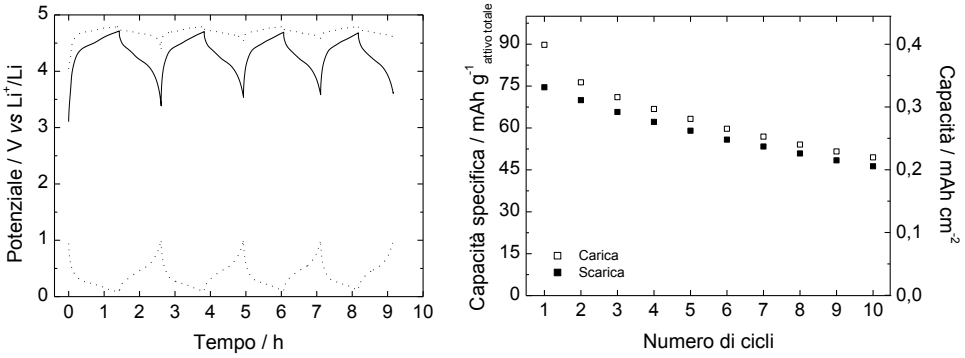


Figura 3. Profili di potenziale della cella (linea continua), del catodo (linea tratteggiata) e dell'anodo (linea punteggiata) in EC: DMC - $LiPF_6$ 1M e la capacità di scarica della batteria (in mAh $g^{-1}_{attivo\ totale}$ e in mAh cm^{-2}) durante i cicli di carica-scarica a 0,280 mA cm^{-2}

La cella completa presenta un'evidente perdita di capacità con il ciclaggio passando da 74 mAh g^{-1} a 46 mAh g^{-1}. Tuttavia i risultati ottenuti sono decisamente migliori rispetto a quelli ottenuti nell'annualità precedente dove la capacità specifica della cella non superava i 35 mAh g^{-1}. Durante la carica il catodo si carica completamente mentre l'anodo non riesce a caricarsi del tutto perché arriva ad un potenziale di circa. 0,18V. In scarica al contrario il catodo non cede tutta la carica immagazzinata (al decimo ciclo il suo potenziale non scende sotto i 4,65 V vs. Li^+/Li) in quanto l'anodo raggiunge un potenziale di 1,0 V vs. Li^+/Li, ovvero il limite di potenziale imposto.

In conclusione, sono stati ottenuti risultati decisamente migliori, sia per un miglior bilanciamento degli elettrodi che per l'ottimizzazione nella preparazione dei materiali. La cella realizzata possedeva una capacità specifica nettamente superiore a quella realizzata in precedenza e un'energia specifica superiore a 200 Wh kg^{-1}.

Materiali anodici a base di grafene

L'Università di Camerino (UNICAM) ha svolto attività inerenti la preparazione e la caratterizzazione preliminare di materiali nano-compositi Sn/grafene e Si/grafene per sistemi litio-ione da 1 Ah [rapporto RdS/PAR2014/167]. Lo scopo finale delle attività è fornire ai partner del progetto (Università di Bologna ed ENEA) quantità di materiali attivi o di elettrodi per la realizzazione di celle complete e piccoli sistemi (stack) da sottoporre a caratterizzazione.

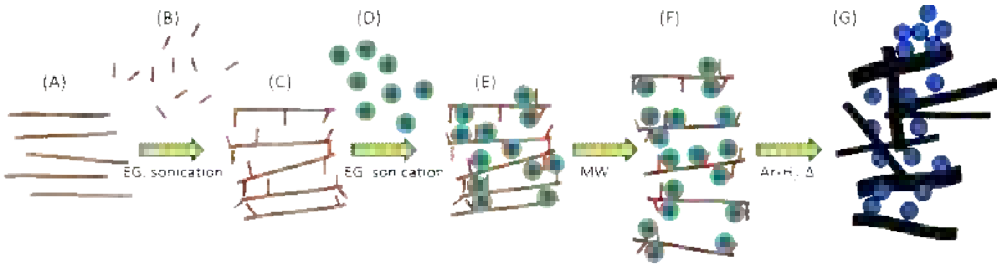
Negli anni precedenti è stata ottimizzata la procedura di sintesi di materiali nanocompositi Si/grafene e Sn/grafene, per ottenere batch abbastanza riproducibili, controllando il contenuto di Sn e Si nei compositi tra il 10 e il 30% in peso. Allo stesso tempo, è stata dimostrata la possibilità di realizzare elettrodi con binder ecocompatibili (principalmente sodio carbossimetilcellulosa Na-CMC e acido poliacrilico PAA), al fine di ottenere

valori elevati di capacità (dell'ordine dei 400 mAh g^{-1} per Sn/grafene e dei 1000 mAh g^{-1} per Si/grafene), stabili al procedere della ciclazione (n. cicli >100). Questi risultati sono stati ottenuti anche mediante l'utilizzo di additivi al sistema elettrolitico.

Nell'annualità oggetto del presente documento UNICAM ha proceduto allo scale-up della produzione dei materiali e della realizzazione di elettrodi, celle e stack, eseguendo anche uno studio di fattibilità dello scale-up, impiegando attrezzature comunemente utilizzate per la sintesi in quantità lab-scale, al fine di confermare la riproducibilità dei processi di sintesi e le elevate prestazioni in carica/scarica. Le capacità produttive sono di circa 200-250 mg per singolo batch dei nanocompositi, mentre le quantità di materiali necessarie per realizzare anodi con capacità reversibile di 1 Ah sono dell'ordine dei 2,5 g per il nanocomposito Sn/grafene e di 1 g per Si/grafene. Le attività sono state quindi organizzate come segue:

1. produzione di più batch di Sn/grafene o Si/grafene e miscelazione fino a raggiungere le quantità richieste all'ottenimento delle capacità target: le procedure standardizzate per la sintesi dei nanocompositi Sn/grafene e Si/grafene sono applicate alla produzione di quantità di materiale attivo necessarie alla realizzazione di anodi per sistemi con capacità dell'ordine di 1 Ah;
2. caratterizzazione chimico-fisica delle miscele: tecniche di indagine quali diffrazione di raggi X, termogravimetria e spettroscopia IR in trasformata di Fourier (FTIR) sono applicate alla caratterizzazione dei materiali nanocompositi Sn/grafene e Si/grafene ottenuti;
3. realizzazione di elettrodi per celle lab-scale: gli elettrodi sono preparati secondo le formulazioni ottimizzate (con binder PAA per Si/grafene e con binder PVDF per Sn/grafene) nelle attività negli anni precedenti;
4. caratterizzazione elettrochimica delle prestazioni degli elettrodi in semi-celle lab-scale mediante cicli galvanostatici, al fine di determinare le prestazioni in carica/scarica e permettere un corretto bilanciamento delle capacità di anodo e catodo nella realizzazione di celle complete;
5. fornitura delle polveri nanocomposite (come miscele di più batch con composizione omogenea) e/o di elettrodi nelle quantità richieste dai partner nel progetto.

La procedura di sintesi è esemplificata In Figura 4.



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

Figura 4. Schema di sintesi del nanocomposito Si/RGO

Il test elettrochimico è stato eseguito su tutti i campioni prodotti. Per i campioni preparati per ENEA sono stati condotti 90 cicli ad una densità di corrente di 500 mA g^{-1} nell'intervallo di potenziale 0,010 -1,000 V. Il carico di materiale attivo è stato di 0,96 mg cm^{-2}. Come mostrato in Figura 5a, il valore di capacità specifica alla prima scarica è di 1507 mAh g^{-1}, con una efficienza coulombica del 50,19%, valore dovuto al verificarsi di processi irreversibili associati alla formazione dello strato di passivazione Solid Electrolyte Interphase (SEI) e alla prima amorfizzazione delle nanoparticelle di Si. La capacità in scarica al novantesimo ciclo è di circa 630 mAh g^{-1} con un risultante capacity fading del 25%. In Figura 5b sono riportati i profili di capacità specifica: il profilo relativo alla prima scarica è caratterizzato da una curva in cui, in un intervallo di potenziale compreso tra 0,80V e 0,10 V, è visibile uno pseudo-plateau relativo alla formazione dello strato di passivazione SEI e da una curva continua fino a 0,010 V, in cui sono raggruppati i processi relativi alla formazione della fase amorfa a-LixSiy e l'accumulo di Li da parte della matrice carboniosa di RGO. Dal primo step di carica successiva, e nei cicli successivi, le curve sono caratterizzate un buon grado di reversibilità e dall'assenza di plateau specifici, dovuti all'alloying di particelle di Si amorfo con Li (a-Li_xSi_y).

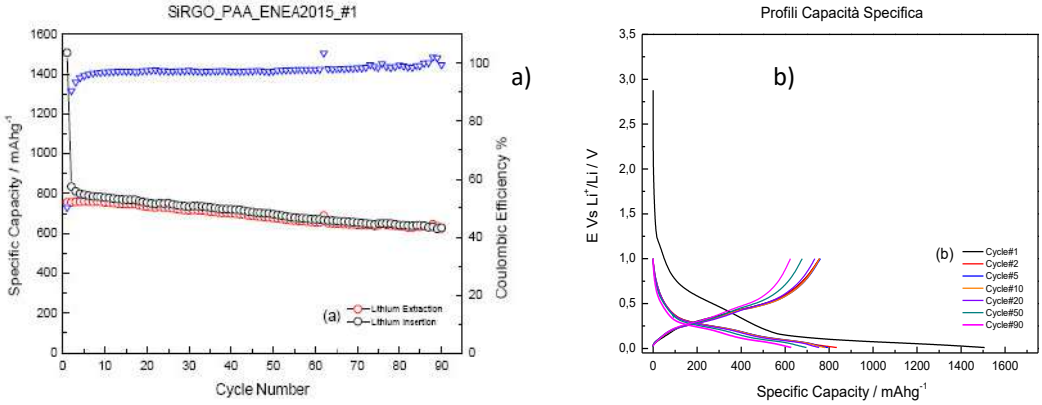


Figura 5. Comportamento elettrochimico di una cella SIRGO-ENEA (carico materiale attivo 0,96 mg cm^{-2})

È stato possibile fornire ai partner i quantitativi richiesti sia di materiale attivo Si/RGO, sia di elettrodi formulati di dimensioni 10 cm x 10 cm. L'utilizzo di binder PAA disciolto in etanolo ha permesso di realizzare gli elettrodi mediante procedure più eco-compatibili rispetto alle formulazioni classiche a base di PVDF in NMP.

La caratterizzazione preliminare delle prestazioni degli elettrodi ha confermato le elevate prestazioni ottenibili dagli elettrodi in esame (valori di capacità specifica tra 700 e 1000 mAh g^{-1}) e l'elevata reversibilità dei processi di carica/scarica in presenza di additivo vinilencarbonato nell'elettrolita.

Al contrario, quando si considera la preparazione di elettrodi a base di SnO_x/RGO, e si paragonano i risultati ottenuti nell'annualità con quelli ottenuti negli anni precedenti o riportati in letteratura, la riproducibilità della sintesi di SnO_x/RGO sembra più difficile da ottenere, sia per quanto riguarda il contenuto di SnO_x, sia per quanto riguarda il grado di ossidazione x di SnO_x. Questa mancanza di controllo sulle condizioni di sintesi si può inoltre tradurre, come verificato, in scarse prestazioni elettrochimiche. Pertanto, ai fini dello scale-up nella realizzazione di celle complete e stack, l'utilizzo di elettrodi contenenti Si/RGO come materiale attivo e PAA come binder, e l'aggiunta di vilidencarbonato all'elettrolita, sono le strade da percorrere per ottenere anodi con caratteristiche riproducibili in termini di elevate prestazioni e stabilità.

Materiali anodici a base di silicio

L'interesse per il silicio come materiale attivo anodico per batterie litio-ione risiede nella sua elevata capacità teorica (4200 mAh g^{-1} contro 370 mAh g^{-1} della grafite usata nelle batterie commerciali) che risulta persino maggiore di quella del Li metallico (3.800 mAh g^{-1}). Studi recenti hanno indicato che i nanofili di silicio si sono mostrati molto promettenti in quanto queste strutture sono in grado di disporre di spazio vuoto per sopportare le variazioni di volume e permettono un più facile rilassamento delle sollecitazioni indotte dall'inserzione dello ione litio. Malgrado le caratteristiche favorevoli, questo tipo di nanostrutture attualmente soffre ancora di una diminuzione della capacità dopo cicli ripetuti di carica e scarica.

ENEA ha impiegato il metodo CVD, il più utilizzato per preparare tali nano-fili, che è molto competitivo grazie alla versatilità, l'affidabilità, la controllabilità ed il costo minore dei processi. In particolare, l'ENEA ha usato il metodo di sintesi CVD con catalizzatore metallico. La maggior parte dei lavori presenti in letteratura sull'argomento riporta l'utilizzo di oro. L'oro risulta più adatto per la bassa temperatura dell'eutettico, la bassa tensione di vapore e la compatibilità con il sistema da vuoto.

Nelle attività svolte quest'anno si è cercato di risolvere i problemi di disomogeneità e costi concentrando gli studi sull'uso di sospensioni colloidali per depositare il catalizzatore su acciaio 304 e solo per l'Au è stata anche esplorata la deposizione mediante plasma sputtering. L'uso delle sospensioni colloidali ha permesso la funzionalizzazione con altri metalli: rame e argento. La messa a punto di una nuova fornace dedicata per la crescita CVD, che è andata a sostituire il poco adatto sistema precedente, consistente in una camera UHV, ha condotto a un migliore controllo della temperatura di processo, della pressione e del tempo di esposizione al gas precursore. Inoltre, la fornace ha permesso la crescita di nanostrutture su grande area (20 cm^2 o più), con la conseguente possibilità di produrre un prototipo di anodo di nanofili di Si su acciaio con correnti di carica/scarica simili a quelle di sistemi reali.

Il meccanismo generalmente proposto è quello del VLS (Vapor Liquid Solid) ed è illustrato in Figura 6. Sul substrato funzionalizzato con Au e scaldato alla temperatura del punto di eutettico 360 °C si formano gocce di una lega

eutettica Si-Au. Il silicio proveniente dalla dissociazione del disilano, tenderà a diffondere preferenzialmente nel liquido e nucleerà all'interfaccia solido-liquido. Ne risulta una crescita unidirezionale che porta alla formazione dei "fili".

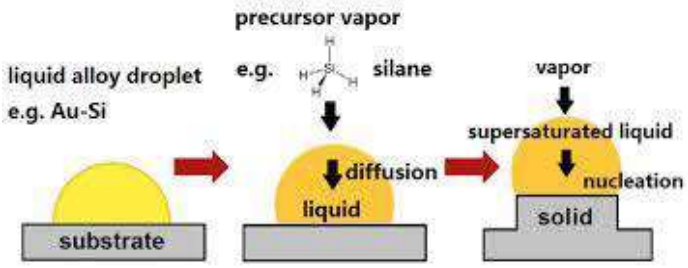


Figura 6. Schema del meccanismo di crescita VLS

Come mostrato dalle immagini SEM di Figura 7, questo metodo permette di depositare in maniera uniforme le nanoparticelle limitando la formazione di nanoparticelle aggregate.

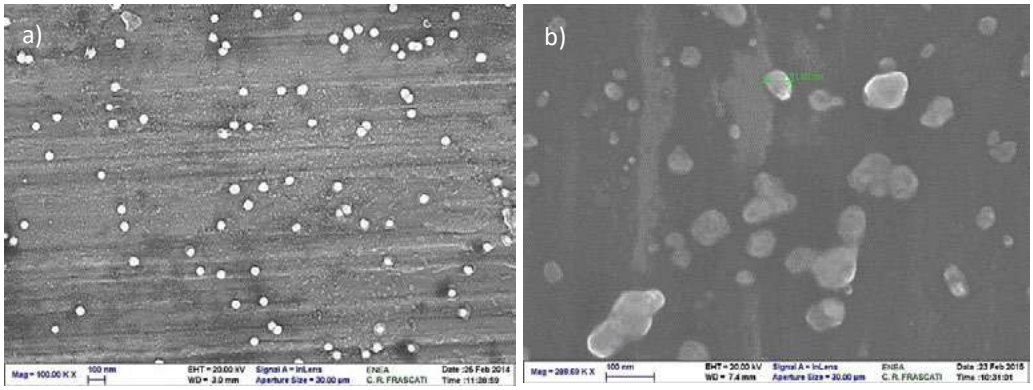
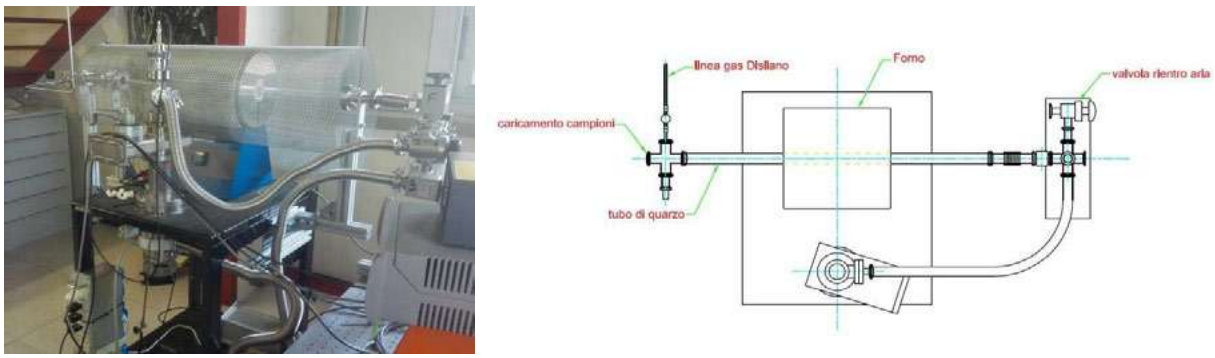


Figura 7. Immagini SEM di deposizioni mediante nebulizzatore di nanoparticelle; a) Au da 40 nm di diametro e b) Ag da 10 nm di diametro

Nel corso di questa annualità è stato costruito un apparato dedicato alla crescita dei nanofili che, come si osserva nella Figura 8, consiste essenzialmente di un tubo di quarzo al cui interno avviene la crescita, di un forno Lenton che può raggiungere la temperatura di 1200 °C e di un sistema di pompaggio che permette di ottenere nel tubo di quarzo pressioni di base dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-4}Pa.

Nella Tabella 1 sono riportati i parametri di crescita (t, P, T, F) insieme con la densità dei nanofili cresciuti e la loro morfologia. Da un'analisi dei dati appare evidente che la temperatura di crescita (T) gioca un ruolo importante non solo sulla densità superficiale dei nanofili cresciuti, ma anche sul loro diametro.



Fig**ura 8. Foto e schema del forno con tubo di quarzo (Centro Ricerche ENEA Frascati)**

Tabella 1. Parametri di crescita (durata della crescita, temperatura del supporto, pressione del gas precursore e flusso del gas) e dati relativi alla densità e al diametro dei nanofili

Campione	t [minuti]	T [^{0}C]	P [Torr]	F [sccm]	densità [μg/cm^2]	diametro [nm]
SiNW353	6	650	0.5	6	400	300
SiNW368	6	620	0.5	6	700	170
SiNW370	6	570	0.5	6	300	150
SiNW365	6	650	0.7	6	1000	300
SiNW367	4	650	0.7	6	/	300

Infatti nei campioni SiNW353/368/370, mantenendo costanti tutti i parametri di crescita (t, P, F), al diminuire della temperatura, si osserva una diminuzione del diametro dei nanofili da 300 a 150 nm. Il meccanismo di crescita VLS prevede la formazione di isole di oro che possono essere più grandi a più alta temperatura e quindi portare alla crescita di nanofili con dimensioni maggiori. Come mostrato in Figura 9a-c, i nanofili appaiono uniformemente distribuiti e con una buona densità; nel caso dei nanofili cresciuti a 620 °C la densità superficiale è maggiore e raggiunge i 700 μg cm^{-2}.

Altro parametro considerato è la pressione del gas precursore. Questo parametro agisce direttamente sulla velocità della crescita e quindi ci si aspetta possa giocare un ruolo molto importante sulla morfologia dei nanofili. Per questo motivo è stata aumentata la pressione del gas precursore disilano da 0,5 torr a 0,7 torr mantenendo temperatura e flusso del gas disilano invariati. Inizialmente la durata della crescita è stata fissata a 6 minuti come nei casi precedenti. L'immagine SEM di Figura 9d mostra che i nanofili del campione SiNW365, cresciuti in queste condizioni, presentano un'alta densità, ma una morfologia di forma lanceolata.

È stato variato il tempo di deposizione per verificarne l'effetto sulla morfologia (SINW367 in Figura 9e). Tra il campione SINW365 e SINW367 non si osservano grandi differenze; anche in questo caso le immagini SEM mostrano dei nanofili lanceolati. La forma lanceolata è stata già osservata in passato ed è dovuta alla temperatura. E' noto, infatti, che l'acciaio austenitico subisce un processo denominato sensibilizzazione ("sensitization") superficiale se esposto a temperature superiori a 400 °C. Per temperature maggiori di 620 °C si innesca l'azione di siliciuri diversi da quelli di Au indotti dalla segregazione superficiale nell'acciaio che conducono a questa particolare morfologia.

In conclusione, con il plasma sputtering si sono ottenuti film di oroche hanno portato ad una crescita di nanofili di

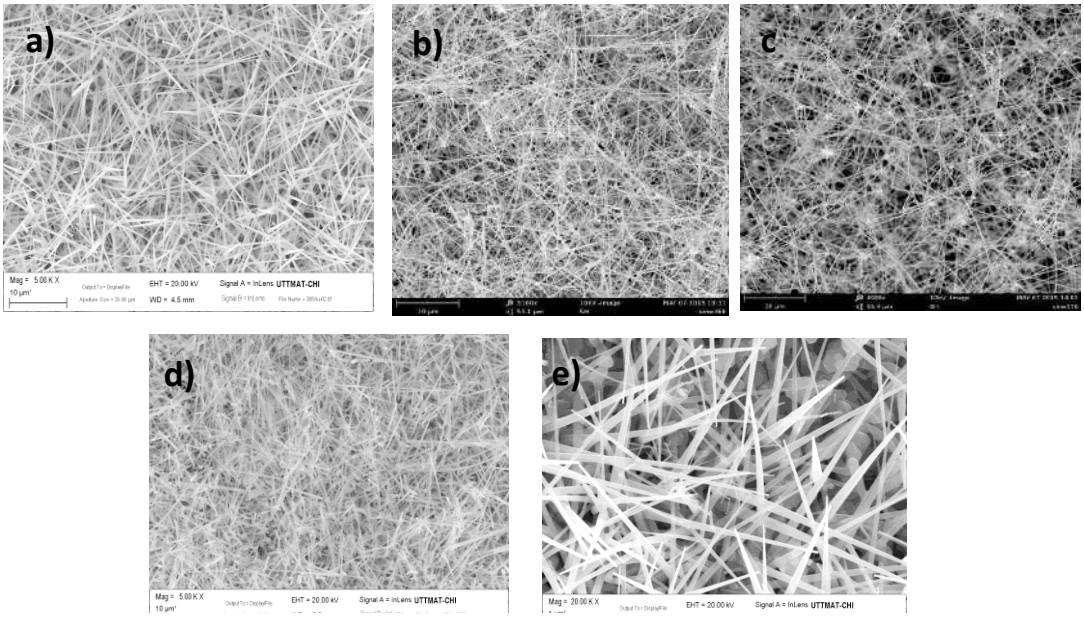


Figura 9. Immagini SEM dei campioni a) SINW353, b) SINW368, c) SINW370, d) SINW365, e) SINW367 funzionalizzati con nanoparticelle di oro ottenuti nelle condizioni di crescita riportate in Tabella 1

silicio, tramite CVD in camera UHV, con buone proprietà. Tramite sospensione colloidale è stato possibile depositare oltre all'Au, anche Cu e Ag. I substrati catalizzati con questi metalli colloidali sono stati utilizzati per la crescita di nanofili sia in camera UHV che in un forno CVD. Il forno CVD è un sistema dedicato, costruito ad hoc in questa annualità, che permette di utilizzare alte temperature e substrati di grande superfice. Lo studio dei parametri di sintesi dei nanofili ha mostrato che con l'Au la crescita avviene sempre in modo ottimale e riproducibile a temperature intorno ai 600 °C in quanto si riesce pienamente a sfruttare il regime di crescita VLS con un'influenza trascurabile dei processi di segregazione dell'acciaio. Nel caso dell'Ag e del Cu si dimostra che è possibile crescere nanofili, sebbene si debba mantenere la temperatura di sintesi sotto ai 700 °C a causa dei fenomeni intensi di segregazione dell'acciaio che si sono osservati a temperature superiori. In queste condizioni, la crescita porta alla sintesi di nanofili con proprietà morfologiche soddisfacenti anche se in certi casi con difetti di natura strutturale. Infine, sono stati sintetizzati nanofili di Si catalizzati con Au colloidale su substrati di grande area per un totale di 100 cm^2.

Per maggiori dettagli sull'attività si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/169.

Caratterizzazione completa chimica ed elettrochimica dei materiali selezionati

L'ENEA ha preparato e caratterizzato celle da laboratorio agli ioni di litio ad alta densità di energia basata sulla coppia ossido di grafene ridotto (RGO) con aggiunta di nanoparticelle di stagno come anodo e $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ come catodo [rapporto RdS/PAR2014/170]. L'ossido di grafene ridotto con aggiunta di nanoparticelle di stagno è stato preparato dall'Università di Camerino mediante un metodo di sintesi idrotermale assistito da microonde e seguito da un processo di riduzione ad alta temperatura di una miscela di difenildiclorostannano $[(C_6H_5)_2SnCl_2]$ e ossido di grafene. Il materiale così ottenuto è stato caratterizzato tramite analisi termo-gravimetrica, diffrattometria ai raggi X, microscopia elettronica a scansione e spettroscopia di diffrazione elettronica. Il $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ utilizzato come materiale catodico è un prodotto disponibile commercialmente. I due materiali sono stati usati per preparare elettrodi compositi e le loro proprietà elettrochimiche sono state indagate mediante cicli di carica e scarica galvanostatica a varie densità di corrente in celle al litio. Gli elettrodi sono stati poi accoppiati per realizzare una cella litio-ione ad alta tensione le cui prestazioni elettrochimiche sono state valutate in funzione della velocità di scarica e del numero dei cicli.

La morfologia dei nastri è stata studiata tramite microscopia elettronica a scansione (Jeol JSM-5510LV). I campioni sono stati montati direttamente su un nastro adesivo ricoperto di carbonio conduttivo a doppia faccia, che è stato poi montato su una lastra porta-campioni. La composizione chimica di superficie è stata mappata con un sistema di spettroscopia a dispersione di energia dei raggi X (IXRF EDS-2000). La struttura del materiale è stata caratterizzata mediante analisi diffrazione di raggi X (Rigaku Miniflex) utilizzando la radiazione Cu-Kα. L'uso simultaneo del sistema TG-DTA (Q600 SDT, TA Instruments) equipaggiato con il Thermal Solution Software (versione 1.4) è stato utilizzato per valutare la stabilità termica. La temperatura iniziale di decomposizione è stata calcolata tramite il software di analisi termica (Universal Analysis versione 2.5) come intersezione tra la linea di base e la tangente estrapolata passante per il punto di flesso della curva temperatura/peso.

Per la caratterizzazione elettrochimica, elettrodi circolari con un diametro di 12 mm sono tagliati da nastri elettrodici. La capacità di questi elettrodi è stata testata in una cella al litio a due elettrodi, in cui il litio è stato utilizzato sia come contro elettrodo che come elettrodo di riferimento. Le celle sono state preparate inserendo un separatore di fibra di vetro tra l'elettrodo positivo e l'elettrodo negativo. Le prestazioni e il ciclo di vita delle celle sono state valutate in celle a bottone del tipo 2032. Una soluzione 1,0 M di $LiPF_6$ in EC/DEC (in rapporto volumetrico di 1:1) è stata utilizzata come soluzione elettrolitica. Le prove di vita ciclica sono state effettuate automaticamente con un ciclatore per batterie (Maccor mod. M 4000). Tutte le attività sperimentali sono state effettuate in camera secca (UR <0,1% a 20° C) alla temperatura termostatata di 20°C.

Un esempio di caratterizzazione elettrochimica è presentata in Figura 10 dove è possibile notare che la capacità irreversibile non si limita al primo ciclo, ma questo fenomeno interessa anche i cicli successivi. In realtà, anche se in maniera ridotta, la capacità specifica in scarica è superiore alla capacità specifica in carica. Dopo il 4° ciclo della capacità di carica e di scarica assumono un valore simile e il coefficiente di carica raggiunge un valore unitario. È importante sottolineare che la capacità irreversibile aumenta con la riduzione della velocità di carica/scarica. Infatti utilizzando correnti specifiche di 50 mA g^{-1}, la differenza tra la capacità in carica e in scarica aumenta e questo effetto viene amplificato quando la corrente specifica è ulteriormente diminuita fino a 25 mA g^{-1}. Una perdita di capacità più rilevante si osserva quando si scarica l'elettrodo a 250 mA g^{-1}: la capacità specifica scende a 202 mAh g^{-1}.

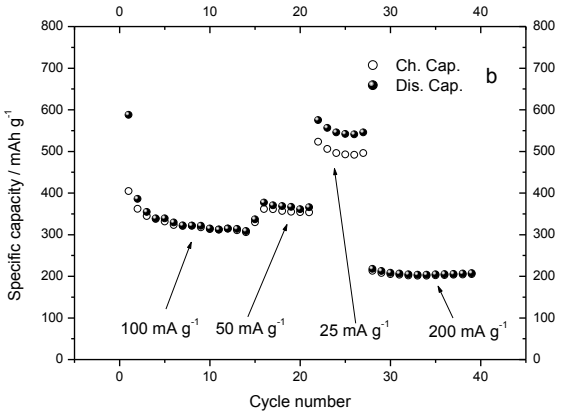


Figura 10. Capacità specifica (in carica e scarica) ed efficienza coulombica in funzione del numero di per un elettrodo PSA-SnRGO ciclato in una batteria al litio cicli a varie correnti di carica/scarica. I valori delle correnti di scarica sono riportate in figura. La quantità di materiale attivo nell'elettrodo era di 1,0 mg

La Figura 11 mostra l'andamento della tensione di scarica per l'elettrodo PVAc-LNMO. Per quantificare l'effetto della velocità di scarica sulla capacità specifica, l'elettrodo è stato scaricato a diverse velocità corrispondenti alle correnti di C/10, C/5, C, 2C, 3C, 5C fino a 3,0 V. La carica è stata eseguita galvanostaticamente a C/10 fino a 4,85 V. La capacità specifica, in base al peso del materiale attivo degli elettrodi varia con la corrente di scarica. Un valore massimo di 123 mAh g^{-1} è stato ottenuto scaricando l'elettrodo ad una corrente specifica di 13 mA g^{-1}. Aumentando la corrente specifica di scarica diminuisce la capacità specifica, ma la ritenzione di capacità è abbastanza buona: l'elettrodo è in grado di scaricare circa il 93% della capacità mostrata a C/10 rate quando è scaricata a correnti specifiche 10 volte superiori e circa l'86% della capacità esibita a C/10 rate quando è scaricata a correnti 30 volte superiori.

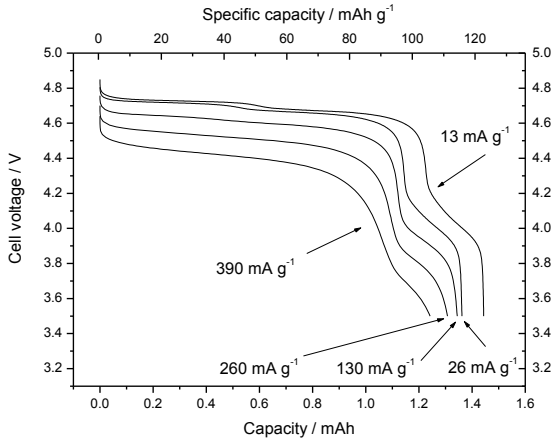


Figura 11. Profili di tensione in funzione della capacità per un elettrodo PVAc-LNMO in una batteria al litio a varie correnti di scarica (materiale attivo nell'elettrodo 11,7 mg)

La ciclabilità della cella litio-ione PSA-SnRGO/PVAc-LNMO può essere osservata in Figura 12 dove la capacità specifica in carica e scarica è riportata in funzione del numero dei cicli. Nella stessa figura è riportato anche il coefficiente di carica (rapporto tra la capacità in scarica e quella in carica, asse a destra). La capacità in scarica aumenta durante i primi tre cicli, salendo fino a 0.68 mAh per poi diminuire lentamente. Allo stesso tempo, anche la capacità in carica diminuisce in modo che si osserva un aumento dell'efficienza con l'avanzamento del numero di cicli, efficienza che sale a 0.95 al 15° ciclo. A questo punto la capacità è ridotta a 0,52 mAh.

L'effetto della velocità di scarica sulle prestazioni del materiale è presentato nel diagramma di Ragone in Figura 13 in cui l'energia specifica è riportata in funzione della potenza specifica in un diagramma doppio logaritmico. I valori specifici sono riferiti al peso del materiale attivo nell'elettrodo anodico. Il diagramma mostra che a bassa potenza l'energia specifica liberata dalla cella è di circa 1210 Wh kg^{-1} e si riduce a circa 383 Wh kg^{-1} quando la cella viene scaricata ad una potenza specifica superiore a 7000 W kg^{-1}.

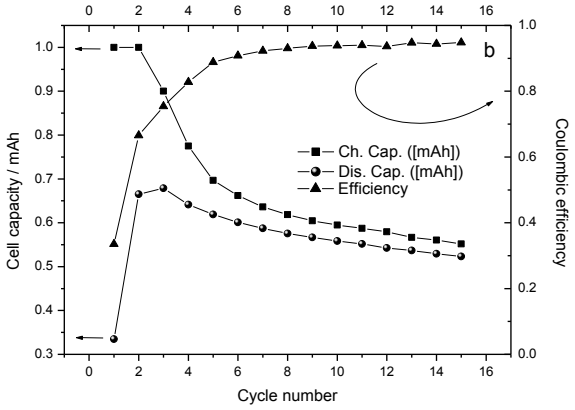


Figura 12. Capacità specifica (in carica e scarica) e coefficiente di carica in funzione del numero di cicli

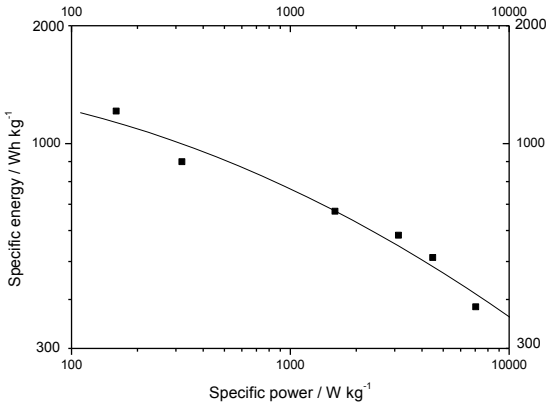


Figura 13. Diagramma di Ragone per la cella litio-ione del tipo PSA-SnRGO/PVAc-LNMO ciclata a 0,2 mA

In conclusione, dopo l'analisi morfologica, chimico-fisica ed elettrochimica di una cella litio-ione ad alta densità di energia preparata con un anodo ad alta capacità a base di SnRGO ed un anodo ad alta tensione di lavoro a base di LNMO, si ha un quadro completo delle caratteristiche e del comportamento di materiali anodici e catodici. Il materiale attivo anodico è stato preparato tramite una sintesi idrotermale assistita da microonde seguita da un trattamento termico sotto atmosfera di Ar/H_2. Come confermato mediante l'analisi XRD e la misurazione TGA, il grafene ossido di partenza è stato quasi completamente ridotto durante il trattamento termico in atmosfera riducente mentre l'ossido di stagno è solo parzialmente ridotto a stagno metallico. Un nastro elettrodo con uno spessore di circa 39 μm è stato preparato utilizzando come legante un copolimero commercialmente (Pattex PL50) a base stirolo acrilica. Il nastro elettrodico così ottenuto mostra una buona omogeneità tra i vari elementi chimici costituenti l'elettrodo. La superficie dell'elettrodo, a causa del processo di preparazione appare, a livello microscopico, ruvida per la presenza di frastagliature, fori e crepe. L'elettrodo è termicamente stabile fino a 200 °C ed inizia a decomporsi intorno a 230 °C. La caratterizzazione elettrochimica ha evidenziato che l'elettrodo è affetto da una capacità irreversibile pari al 37% della capacità accumulata durante il primo ciclo di scarica. Questa capacità irreversibile è stata correlata alla degradazione dell'elettrolita, alla formazione di uno strato di passivazione sulla superficie dell'elettrodo e alla riduzione dell'ossido di stagno a stagno metallico. La capacità irreversibile non è limitata al primo ciclo, ma riguarda anche i cicli successivi. Inoltre, la capacità irreversibile aumenta diminuendo la velocità di carica/scarica. Questo comportamento si spiega considerando che la cinetica dell'inserimento litio nel materiale è più veloce rispetto alla cinetica della reazione parassita responsabile della capacità irreversibile.

L'elettrodo positivo della batteria agli ioni di litio è stato preparato utilizzando un procedimento simile a quello riportato per la preparazione dell'anodo ma utilizzando il PVAc come legante. Le prestazioni elettrochimiche per entrambi gli elettrodi sono state valutate a varie correnti di scarica. Il parametro k di Peukert calcolato per caratterizzare la risposta in potenza del sistema è stato valutato per entrambi gli elettrodi. Dai valori ottenuti ne consegue che l'elettrodo positivo fornisce migliori prestazioni in potenza rispetto a quello negativo. La buona

risposta esibita dal elettrodo positivo è stata correlata alle dimensioni nanometriche del LNMO utilizzato per la preparazione dell'elettrodo. Le prestazioni elettrochimiche della cella litio-ione costruita accoppiando l'elettrodo PSA-SnRGO usato come anodo e quello a base di PVAc-LNMO come catodo è corrispondente alle aspettative. Nel primo ciclo, a causa della capacità irreversibile esibita dall'anodo, solo il 34% della capacità inserita nell'elettrodo è recuperata in scarica. La capacità irreversibile diminuisce nei cicli successivi e l'efficienza columbica aumenta toccando il valore di 0,95 al 15° ciclo. Quando la cella è ciclata con la più bassa corrente di scarica, la stessa è in grado di fornire una capacità pari alla capacità teorica reversibile (0,75 mAh). La capacità specifica diminuisce a circa 0,41 mAh aumentando la corrente di scarica di 10 volte e a 0,27 mAh aumentando la corrente di scarica di 50 volte. Il diagramma di Ragone mostra che a bassa potenza l'energia specifica, calcolata in base al peso del materiale attivo nell'elettrodo negativo, è di circa 1210 Wh kg^{-1} e si riduce a circa 383 Wh kg^{-1} quando la cella viene scaricata ad una potenza specifica superiore a 7000 W kg^{-1}. Una perdita di capacità relativamente elevata influenza le prestazioni della cella con l'aumento del numero di cicli. La perdita di capacità varia tra lo 0,5 e lo 0,55% per ciclo in funzione della velocità di scarica.

a.2 Realizzazione e caratterizzazione di celle complete di taglia significativa

L'attività di progettazione, produzione e prova di celle/sistemi è stata svolta dall'ENEA con la collaborazione dell'Università di Roma. Le attività sono state organizzate in due fasi: la prima volta a risolvere i problemi di produzione e funzionalità dei materiali elettrodici con la ridefinizione del progetto di cella (di entrambe le tipologie: alta energia e alta potenza); la seconda alla realizzazione di celle di taglia significativa da assemblare poi in piccoli sistemi (fino a circa 1 Ah) ed alla successiva caratterizzazione elettrochimica ed elettrica.

Le celle complete ed i sistemi realizzati sono stati sottoposti a cicli di prova elettrochimica ed elettrica per verificarne prestazioni e vita utile, nelle condizioni operative tipiche delle applicazioni individuate per la rete elettrica.

Preparazione e caratterizzazione di materiali anodici per le celle complete

L'attività svolta dall'Università di Roma [rapporto RdS/PAR2014/172] ha riguardato la produzione di materiali anodici a base di ossido di titanio (TiO_2), nelle quantità necessarie alla produzione di sistemi di taglia significativa, nonché la loro caratterizzazione morfologica, strutturale ed elettrochimica.

Le attività di ricerca di un materiale anodico alternativo a quello carbonioso, inserite nel subtask a.1 ed in parte nel subtask a.2, hanno previsto alcune prove di batterie litio-ione ad alta energia specifica operanti con elettroliti convenzionali a base di carbonati organici e sali di litio e come catodo $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$. Le attività hanno riguardato, quindi, la sintesi chimica e la caratterizzazione elettrochimica del TiO_2. Il materiale, una volta caratterizzato dal punto di vista morfologico e strutturale, è stato impiegato per la preparazione di elettrodi. Questi sono stati studiati in semicelle con contro-elettrodo di litio e quindi in configurazione di cella completa con un contro-elettrodo di $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$.

Sono state prodotte quantità di TiO_2 con una tecnica elettrochimica di produzione di nanotubi di TiO_2, messa a punto dalla stessa Università, che consiste nell'ossidazione del Ti in bagni di anodizzazione con fluoruri, seguita da un trattamento termico di cristallizzazione.

Le piccole quantità di nanotubi di TiO_2 ottenuti con un singolo elettrodo hanno portato a progettare e realizzare una cella (Figura 14) nella quale si potesse anodizzare contemporaneamente più lastrine di titanio. Al fine di ottimizzare il processo con questa nuova cella, senza però compromettere le prestazioni del materiale, si è agito sui parametri di anodizzazione e si è scelto di variare:

- il potenziale di anodizzazione applicato;
- il tempo di anodizzazione;
- la temperatura di cristallizzazione per ottenere la fase anatase;
- il tempo di trattamento termico.



Figura 14. Cella per l'anodizzazione contemporanea di 10 elettrodi di titanio

Nello specifico sono stati preparati campioni anodizzati a 10, 30 e 60V per 1, 2, e 4 ore. Come condizioni di cristallizzazione è stata scelta la temperatura di 580 °C, all'aria per 1 ora dopo aver eseguito una rampa di temperatura di 1 °C/min a partire dalla temperatura ambiente fino, appunto, alla temperatura di 580 °C.

Le immagini SEM dei campioni preparati a 30 e 60 V per 4 ore mostrano che, in superfice, i nano tubi diventano molto sottili e fragili (Figura 15).

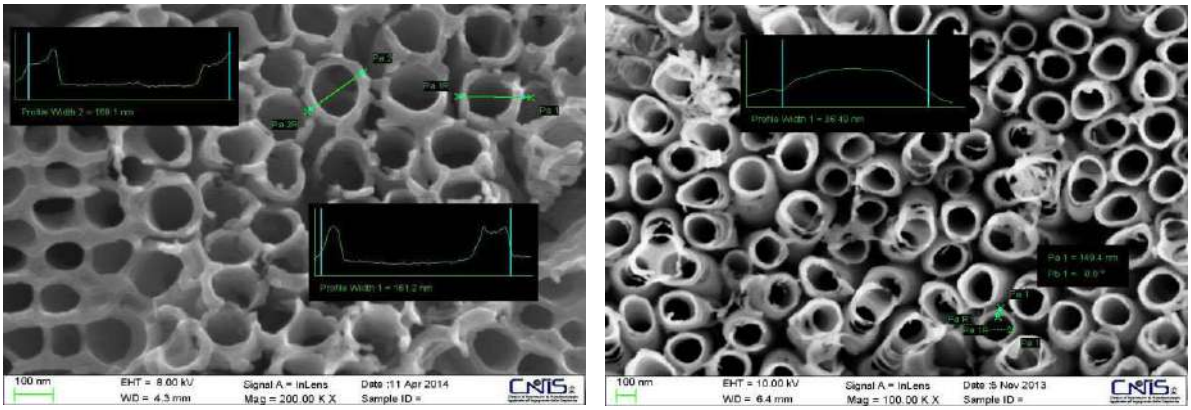


Figura 15. Immagine SEM del campione di TiO_2 preparato a 30 V e 60 V per 4 h e successivo trattamento termico a 580 °C, all'aria per 1 ora

Le prove elettrochimiche sono state condotte dapprima utilizzando direttamente le lastrine di titanio ricoperte dal TiO_2, successivamente, i nanotubi di TiO_2 sono stati asportati dalla lastrina di Ti e con la polvere sono stati preparati dei compositi. Per quanto riguarda le prove sulle lastrine di titanio ricoperte dal TiO_2, nel seguito si riportano i risultati ottenuti con il campione relativo alla sintesi a 60 V per 2 ore e un trattamento termico a 580 °C per 1 ora.

La scelta è stata guidata verso questa tipologia di sintesi (60 V - 2 ore) solo perché per queste condizioni è stato condotto uno studio sulle quantità di ossido di titanio formato nelle singole preparazioni. In Figura 16 sono mostrati i valori della capacità in carica e scarica di una cinquantina di cicli ottenuti in condizioni differenti: si parte con C/4 e progressivamente si aumenta il "rate" di ciclazione. Dalla figura si nota che dopo dieci cicli l'efficienza coulombica è praticamente uguale a 1.

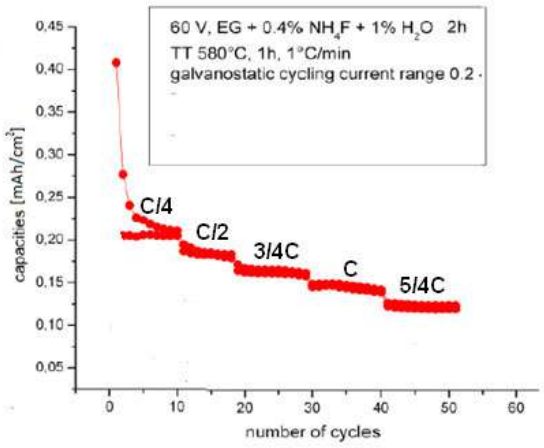


Figura 16. Capacità in funzione del numero di cicli a vari rate C/4, C/2, 3/4C, C e 5/4C

Il materiale prodotto è stato quindi sottoposto a prova in celle complete. Il materiale anodico fornisce una buona capacità sia quando viene utilizzato da solo così come preparato per anodizzazione del Ti (dopo ovviamente essere stato cristallizzato nella forma anatase) che quando si preleva la polvere dopo il processo di anodizzazione e la si usa per preparare, con i metodi tradizionali, i materiali compositi. La capacità ottenuta con un elettrodo di TiO_2 senza additivi è di 96 mAh g^{-1} a C/4 valore perfettamente in linea con quelli riportati in letteratura per elettrodi senza carbone. L'aggiunta di carbone e binder per la formazione di un elettrodo composito, migliora le prestazioni: il materiale fornisce una capacità di oltre 200 mAh g^{-1} a C/10 e 180 mAh g^{-1} a C/5.

La ricerca di materiali anodici alternativi a quelli carboniosi, per la realizzazione di celle complete e relative prove, prevedeva lo sviluppo di batterie litio-ione ad alta energia specifica operanti con elettroliti convenzionali a base di

carbonati organici e sali di litio. Sono state quindi assemblate delle batterie litio ione complete usando $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ come catodo e TiO_2 come anodo. Le prove preliminari eseguite hanno mostrato un discreto funzionamento, anche se ancora non del tutto soddisfacente.

A conclusione del lavoro si arriva alla considerazione che, vista l'esiguità della quantità di nanotubi di TiO_2 che è possibile preparare con il processo di anodizzazione è difficile pensare ad un processo industriale in grado di produrre grandi quantità. È invece da analizzare la possibilità di utilizzare un nastro di Ti molto sottile, che con il processo di anodizzazione in continuo, si possa ricoprire di ossido di titanio per utilizzarlo direttamente come materiale anodico in batterie litio-ione. Una volta messo appunto il processo, l'analisi dei costi potrà dare risposta sulla sua fattibilità.

Preparazione e caratterizzazione di materiali elettrodi e costruzione e prova di celle complete

Per la realizzazione di celle complete di taglia fino a 1 Ah di due tipologie diverse, ad alta energia ed ad alta potenza, e la loro completa caratterizzazione elettrochimica ed elettrica, l'ENEA ha inizialmente preparato e caratterizzato diversi elettrodi con materiali scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e ridotto impatto ambientale. I materiali selezionati sono stati il litio ferro fosfato come materiale catodico (per celle di alta energia e di alta potenza) e due tipi di grafite del tipo *MCMB* (mesocarbon microbeads) come materiale anodico: la prima del tipo "High Capacity G25" (HC-G25) per applicazioni ad alta capacità e la seconda "High Rate Discharge G-12" (HRD-G12), per applicazioni di potenza. I materiali scelti e provati negli anni precedenti sono stati utilizzati per preparare degli elettrodi in scala significativa e successivamente caratterizzati da un punto di vista morfologico.

Per evitare la formazione di crepe nel materiale elettrodico si è provato a compensare gli andamenti dei vari componenti dell'elettrodo in fase plastica (la formazione di crepe è legata al fatto che il materiale elettrodico è molto resistente a compressione, ma piuttosto debole nei confronti di sforzi di trazione). Al tal fine l'elettrodo idratato è stato inserito su una base rigida di alluminio e contenuto da una cornice di acciaio per delimitarne i confini. Sull'elettrodo uniformemente calandrato si applica un blocco di teflon, sul quale è sistemata una piastra di alluminio, ancorata alla prima piastra tramite delle viti. Le viti sono serrate con una chiave dinamometrica in modo da esercitare la stessa pressione su tutti i lati (Figura 17). Il blocco di teflon esercita in tal modo una pressione dall'alto che permette di compensare gli sforzi di trazione evitando quindi eventuali crepe.

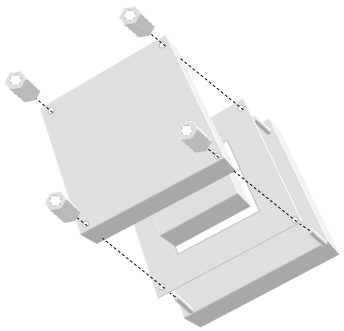


Figura 17. Sistema sperimentato per evitare la formazione di crepe durante la realizzazione degli elettrodi

Realizzazione elettrodi per batterie ad alta energia

Per la realizzazione dell'elettrodo catodico è stata preparata una sospensione mescolando 3 g di $LiFePO_4$ (77%p), 0,4 g di carbone Super P (10%p), e 1 g di PVAc al 50% in peso (13%p) e 6 g di acqua. Si ottiene in tal modo una pasta molto densa (Figura 18).

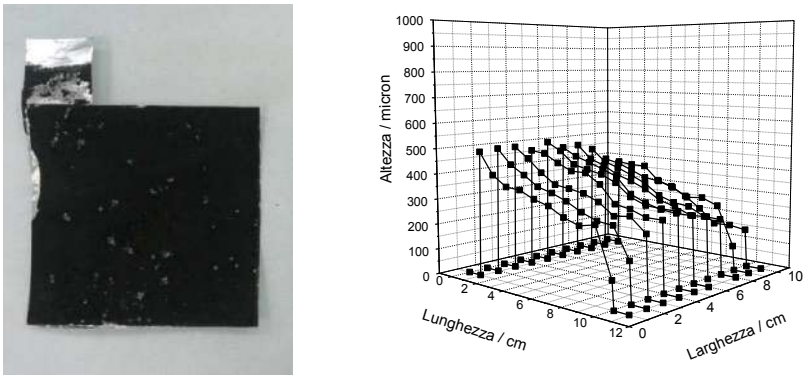


Figura 18. Immagine del primo elettrodo catodico e misura del suo profilo

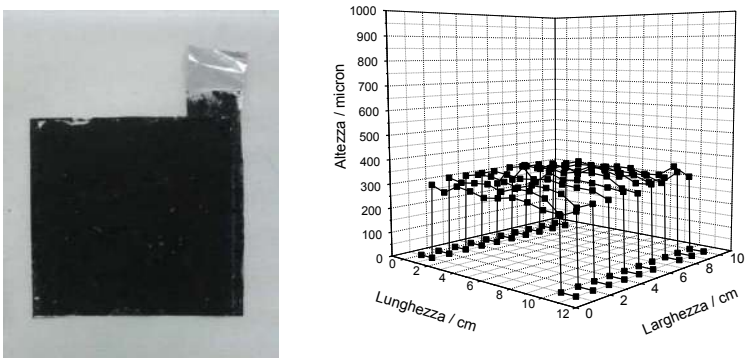


Figura 19. Immagine del secondo elettrodo catodico e misura del suo profilo

La pasta è stesa su un foglio di alluminio coprendo una superficie di 100 cm^2, compressa e lasciata asciugare a 150 °C per alcune ore. L'operazione è ripetuta su un secondo foglio. Al termine della stesa il foglio è pesato per valutare l'esatta quantità di materiale depositato (3,5 g per il primo foglio e 3,36 g per il secondo). Il primo elettrodo si presenta molto uniforme da un punto di vista macroscopico (Figura 18), l'analisi dimensionale mostra però che l'elettrodo non è uniforme da un punto di vista microscopico. La procedura applicata ha permesso di ottenere un secondo elettrodo molto uniforme sia da un punto di vista macroscopico, che da un punto di vista microscopico (Figura 19). Lo spessore del primo elettrodo è compreso tra 500 e 200 µm mentre quello del secondo oscilla intorno ai 300 µm. I valori medi sono di 322 e 303 µm, rispettivamente. Al termine della preparazione non è stata applicata nessuna pressione di calandratura.

La sospensione anodica è stata preparata mescolando 1,4 g di grafite (87%p) e 0,2 g di PMMA (13%p), disciolto in 10 mL di acqua. Si è scelto di non mettere carbone nell'anodo in quanto alle basse correnti di scarica operative di questa tipologia di batteria, la grafite è più che sufficiente a consentire una buona conducibilità elettrica. La miscela è stata ulteriormente agitata e omogeneizzata con un sistema di dispersione meccanico. La sospensione anodica è stata poi posta sul foglio di rame (spessore 13 µm).

Dopo aver coperto una faccia il foglio è stato girato ed è stata coperta anche la faccia posteriore. Anche in questo caso non è stata applicata nessuna pressione di calandratura. Al termine della stesa il foglio è pesato per valutare l'esatta quantità di materiale depositato che risulta essere 2,68 g. L'elettrodo si presenta uniforme da un punto di vista macroscopico, mentre da un punto di vista microscopico presenta molte asperità (Figura 20). Lo spessore dell'elettrodo, escluso il collettore di corrente, è compreso tra 200 e 350 µm. Lo spessore medio risulta 134 µm per faccia.

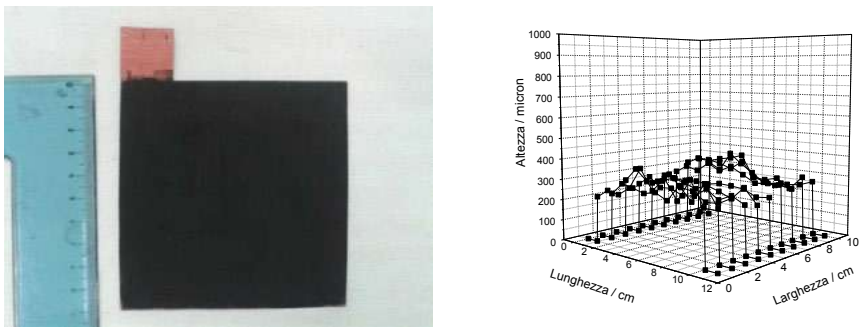


Figura 20. Immagine dell'elettrodo anodico e misura del suo profilo

Una procedura simile è stata impiegata per la realizzazione di elettrodi ad alta potenza, per i dettagli si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/171.

Successivamente si è proceduto alla progettazione e realizzazione di celle per la fabbricazione delle due tipologie di batteria. Le batterie complete così prodotte sono state sottoposte a cicli di prova elettrochimica per verificarne prestazioni e vita utile, nelle condizioni operative tipiche delle applicazioni individuate per la rete elettrica. Sono

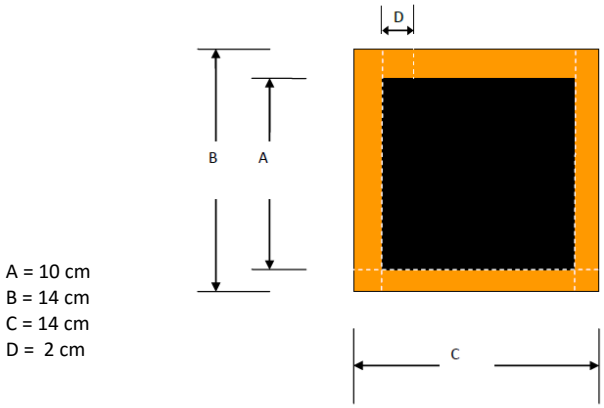


Figura 21. Dimensioni del foglio elettrodico sul quale effettuare le stese anodiche. I tratti definiscono le porzioni dove effettuare i tagli

state utilizzate le procedure di prova concordate nel Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE.

Per la batteria ad alta energia si è ipotizzato di stendere gli elettrodi su una superficie quadrata di 14 cm di lato, coprendo una superficie di 10 cm x 10 cm, in modo da avere tutti i bordi scoperti di circa 2 cm (Figura 21). Per l'anodo viene effettuata una copertura anche sul lato posteriore in modo da ottenere un elettrodo bipolare. Da questi elementi sono ritagliati i bordi come indicato in Figura 21 (linee tratteggiate) in modo da lasciare un tab portacorrente sporgente di circa 2x2 cm.

La batteria ad alta energia, di superficie totale 200 cm^2, è stata assemblata ponendo l'elettrodo negativo tra due fogli di separatore e completando con due fogli elettrodici positivi. Gli elettrodi sono preventivamente pesati per valutarne la capacità. I carichi medi di massa dell'elettrodo anodico e catodico erano rispettivamente ~13 mg cm^{-2} e ~34 mg cm^{-2}. I carichi medi di materiale attivo dell'elettrodo anodico e catodico erano ~11,3 mg cm^{-2} e ~26,2 mg cm^{-2}. Per il calcolo della capacità sono state usate una capacità specifica pari a 0,17 Ah g^{-1} per il $LiFePO_4$ e di 0,37 mAh g^{-1} per la grafite (capacità irreversibile + capacità reversibile) e 0,31 Ah g^{-1} per la capacità reversibile della grafite. Per rapporto si intende il rapporto tra la capacità del catodo e quella dell'anodo. Il rapporto elettrodico vale 1,06, cioè la batteria è anodo limitata.

La capacità nominale della batteria, calcolata sottraendo alla capacità del catodo la capacità irreversibile dell'anodo, è risultata pari a 0,788 Ah. In Figura 22 è rappresentata la sequenza di formazione della batteria ad alta energia.

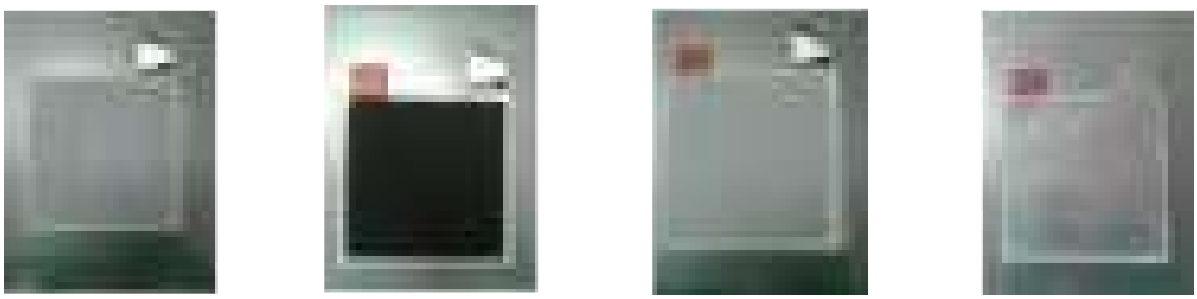


Figura 22. Sequenza di formazione della batteria ad alta energia: a) separatore sovrapposto al primo elettrodo positivo, b) aggiunta dell'elettrodo bipolare anodico, c) aggiunta del secondo separatore, d) completamento della cella con il secondo elettrodo positivo

La batteria è posta sotto pressione tra due piastre di alluminio e quindi lasciata asciugare per una notte a 120°C. La Figura 23 a sinistra mostra la batteria assemblata. Nella stessa foto a destra è riportato il profilo delle altezze. Lo spessore della batteria, incluso i collettori di corrente, è compreso tra 1000 e 1400 µm. Lo spessore medio risulta 1200 µm.

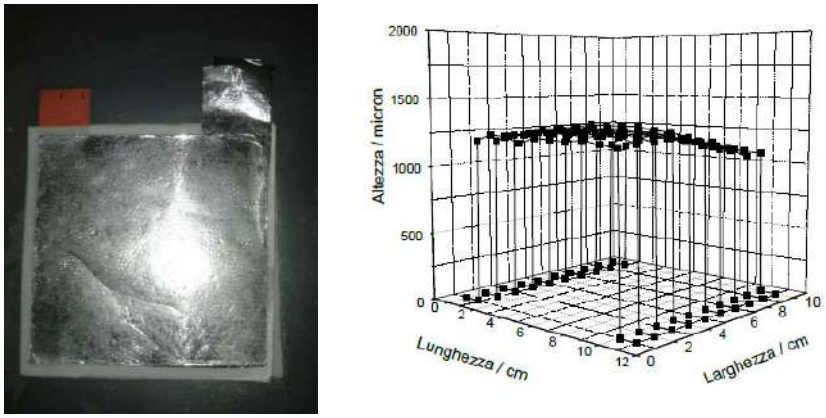


Figura 23. Immagine della batteria e misura del suo profilo

Dopo aver posto la batteria all'interno di una busta di plastica la stessa è stata imbibita con la soluzione elettrolitica (LP 30, soluzione 1,0 M di $LiPF_6$ in EC/DMC = 50/50 v/v). La batteria è stata caratterizzata da un punto di vista elettrico ed elettrochimico. La spettroscopia di impedenza ha permesso di misurare la resistenza dell'elettrolita (R) che è risultata di circa 0,86 Ω, da cui è stata calcolata una resistenza specifica (ρ) dell'elettrolita pari a 8600 Ω cm ed una conducibilità specifica (κ) pari a $1{,}16 \times 10^{-4}$ S cm^{-1}. La resistenza al trasferimento di carica è di circa 7 Ω, cui corrisponde una resistenza specifica al trasferimento di carica (X) di 700 Ω cm^2.

La batteria è stata quindi fatta ciclare a C/10 rate; è stata impiegata una corrente di scarica di 0,1 A. I risultati della prova sono riportati in Figura 24. A sinistra sono mostrati i profili di tensione per il primo ciclo di carica e scarica della batteria, mentre sulla destra si riporta la capacità specifica in funzione del numero dei cicli per i primi dieci cicli di carica e scarica e il rapporto di carica inteso come il rapporto tra la capacità caricata e quella scaricata nel ciclo successivo.

Durante il primo ciclo, la batteria è riuscita a caricare circa 0,9 Ah. Di questi ne sono stati rilasciati circa 0,71, per cui la capacità irreversibile può essere calcolata pari a 0,19 Ah, che corrisponde a circa il 20% della capacità. Durante il ciclo successivo, la batteria è riuscita a ciclare reversibilmente circa 0,8 Ah. La tensione media di scarica è pari a 2,97 e sale a circa 3,06 V nei cicli successivi. Come si può osservare nella Figura 24b, nei cicli successivi si nota una lenta diminuzione della capacità. Il rapporto di capacità è sbilanciato al primo ciclo dove raggiunge un valore pari a 1,29 mentre è leggermente superiore all'unità nei cicli successivi.

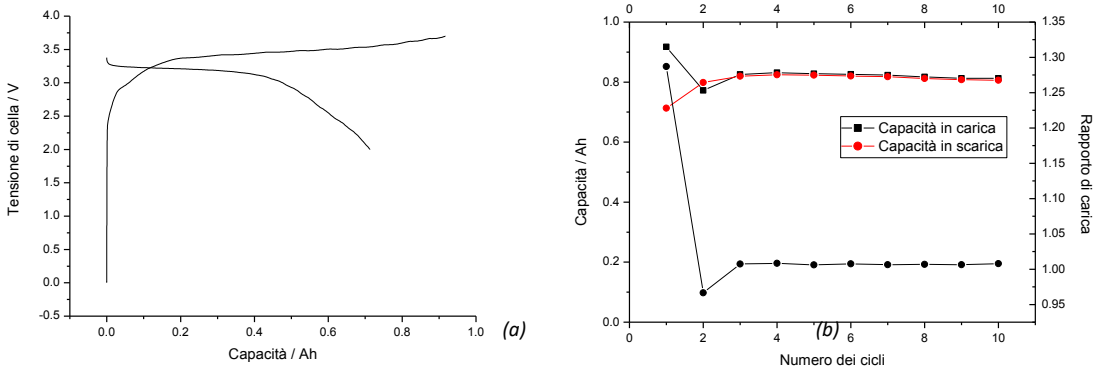


Figura 24. Profilo di tensione in funzione della capacità per il primo ciclo di carica e scarica (a) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per la batteria ad alta energia. La batteria è stata fatta ciclare in scarica ed in carica a C/10 rate tra 3,7 e 2,0 V. Nella figura b è riportato anche il rapporto tra la capacità in carica e quella in scarica (pallini neri)

Durante il primo ciclo, la batteria è riuscita a caricare circa 0,9 Ah. Di questi ne sono stati rilasciati circa 0,71, per cui la capacità irreversibile può essere calcolata pari a 0,19 Ah, che corrisponde a circa il 20% della capacità. Durante il ciclo successivo, la batteria è riuscita a ciclare reversibilmente circa 0,8 Ah. La tensione media di scarica è pari a 2,97 e sale a circa 3,06 V nei cicli successivi. Come si può osservare nella Figura 24b, nei cicli successivi si nota una lenta diminuzione della capacità. Il rapporto di capacità è sbilanciato al primo ciclo dove raggiunge un valore pari a 1,29 mentre è leggermente superiore all'unità nei cicli successivi.

La batteria ad alta potenza è progettata in modo simile a quella ad alta energia. La batteria, di superficie totale di 400 cm^2, è assemblata ponendo un foglio di separatore tra l'elettrodo negativo e quello positivo (Figura 25). La batteria è stata realizzata accoppiando tra loro quattro celle da 100 cm^2..

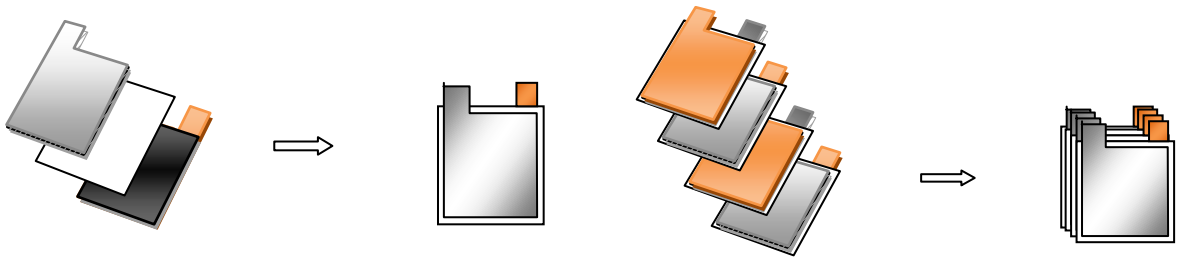


Figura 25. Schema di preparazione di una cella

Le singole celle erano formate usando elettrodi monopolari. Gli elettrodi. I carichi medi di massa dell'elettrodo anodico e catodico erano ~6,4 mg cm^{-2} e ~15 mg cm^{-2}, rispettivamente. Dopo imbibizione con la soluzione elettrolitica la batteria è stata caratterizzata da un punto di vista elettrico ed elettrochimico. La resistenza dell'elettrolita è risultata di circa 0,5 Ω, da cui è stata calcolata una resistenza specifica dell'elettrolita pari a 10000 Ω cm ed una conducibilità specifica pari a $1{,}0\times10^{-4}$ S cm^{-1}. La resistenza al trasferimento di carica è di circa 5 Ω, cui corrisponde una resistenza specifica al trasferimento di carica di 1000 Ω cm^2.

La caratterizzazione elettrochimica ha evidenziato che la batteria scaricata a C/10 rate ha una capacità pari a quella nominale. A C rate la capacità diminuisce leggermente. Anche questa batteria presenta una lieve perdita di capacità con il progredire del numero dei cicli.

A titolo di esempio in Figura 26 si riportano i risultati ottenuti della batteria fatta ciclare a C rate. Durante il primo ciclo di carica la batteria non riesce a raggiungere la condizione di fine carica relativa alla tensione massima di 3,7 V ma raggiunge la seconda condizione di carica relativa al tempo massimo di 1 h. A questo punto la capacità accumulata è pari a 0,75 Ah. Questo comportamento è probabilmente dovuto al fatto che il rapporto di capacità catodo/anodo è molto alto. In scarica la batteria riesce a liberare circa 0,6 Ah per cui la capacità irreversibile può essere calcolata pari a 0,15 Ah, che corrisponde a circa il 20% della capacità. Durante il seguente ciclo di carica la batteria raggiunge la condizione di fine carica relativa alla tensione massima di 3,7 V accumulando 0,71 Ah che cede reversibilmente nel successivo ciclo di scarica. La tensione media di scarica al primo ciclo è di 3,025 V e sale a circa 3,09 V nei cicli successivi. Per evidenziare il comportamento nei successivi cicli, in Figura 26b è riportata la capacità specifica in funzione del numero dei cicli. La batteria è riuscita a ciclare reversibilmente circa 0,7 Ah anche se si nota una lenta diminuzione della capacità con il progredire del numero dei cicli. Il rapporto di capacità raggiunge un valore pari a 1,28 al primo ciclo mentre è leggermente superiore all'unità nei cicli successivi.

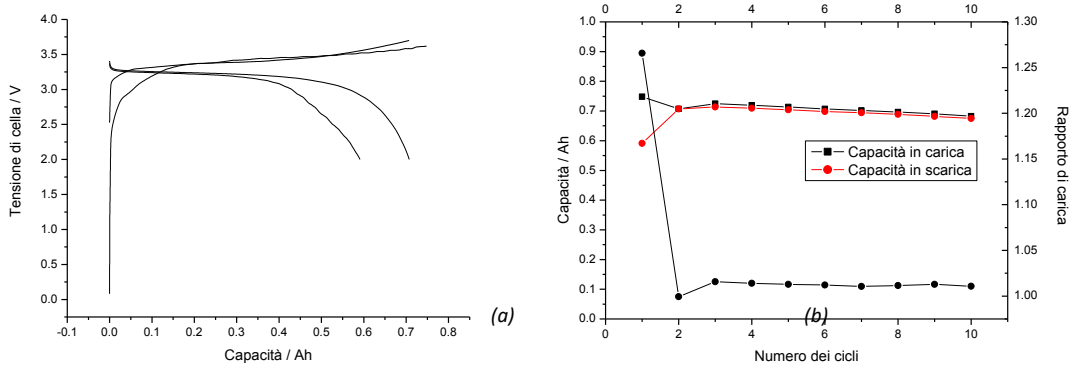


Figura 26. Profilo di tensione in funzione della capacità per i primi due cicli di carica e scarica (a) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per la batteria ad alta potenza. La batteria è stata fatta ciclare in scarica ed in carica a C rate tra 3,7 e 2,0 V. Nella figura a destra riportato anche il rapporto tra la capacità in carica e quella in scarica (pallini neri)

b. Analisi sperimentali di cicli di lavoro, di condizioni di degrado e riutilizzo e di sicurezza di sistemi di accumulo elettrochimico

Le attività svolte in questo obiettivo hanno riguardato:

- l'analisi del comportamento di sistemi di accumulo in applicazioni con elevati potenziali risparmi di energia elettrica; è stata completata la messa a punto di un modello matematico, con l'effettuazione di prove al banco su batterie al litio commerciali e condotta un'analisi dell'introduzione di un sistema di accumulo stazionario in una metropolitana di superficie (tranvia di Bergamo);
- la prosecuzione delle prove di vita di celle al litio per la valutazione sperimentale della "second life" e del comportamento termico, utilizzando campioni parzialmente usati, sulla base dei profili caratteristici in alcune applicazioni tipiche per le reti elettriche. Queste prove sono state affiancate da prove di invecchiamento e degrado accelerato di celle litio-ione.
- attività preparatorie degli studi di sicurezza per la messa a punto di impianti e di procedure per studiare sperimentalmente il problema dell'estinzione di un eventuale incendio di batterie litio-ione.

Le attività di ricerca sono state svolte da ENEA e nell'ambito delle collaborazioni con le Università di Pisa e di Roma Tor Vergata.

b.1 Analisi sperimentali e validazioni di sistemi di accumulo per una tranvia leggera e per la "second life" e l'invecchiamento di celle litio-ione

Le attività hanno riguardato l'aggiornamento dello strumento di simulazione del sistema tramvia per la modellazione delle nuove configurazioni da esaminare, con l'aggiunta di una fonte energetica rinnovabile (impianto fotovoltaico) e la valutazione dei flussi di energia sul sistema, confrontandoli con quanto ottenuto negli anni precedenti, per valutare gli effetti complessivi dell'uso dell'accumulo sull'efficienza energetica e sui costi dell'intero sistema tranvia con generazione rinnovabile. Il dimensionamento dell'accumulo ha richiesto anche una validazione di tipo sperimentale, con particolare attenzione alla stima della vita utile. Le attività hanno permesso di valutare sperimentalmente il massimo numero di micro-cicli tollerabile dalle celle al litio ad alta potenza ed un aggiornamento del ciclo di lavoro semplificato sviluppato nell'anno precedente. Infine è stato definito un nuovo ciclo per la prova di vita delle batterie che tiene conto del diverso utilizzo della rete. Le attività in laboratorio sono state svolte presso le strutture dell'Università di Pisa e di ENEA.

Relativamente alla attività sulla "second life", è stato studiato il decadimento della vita residua di celle litio-ione a capacità ridotta. Durante le prove si è effettuato un monitoraggio termico delle celle mediante termocoppie e termografie, al fine di individuare punti di criticità e valutare le necessità di condizionamento termico delle celle.

Infine, sono stati studiati, in collaborazione con l'Università di Roma, attraverso prove di "second life" e di invecchiamento, modelli di comportamento delle batterie litio-ione, con un'analisi delle procedure di invecchiamento adottate ai fini dello sviluppo di un modello in grado di stimare la vita effettiva della batteria, da utilizzare per la preparazione di un piano di prove di funzionamento ed invecchiamento su chimiche diverse dal litio per il prossimo triennio di attività, d'intesa con CNR e RSE.

Dimensionamento e prove sperimentali di un sistema di accumulo per una tramvia con integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica

La produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica per alimentare i trasporti su rotaia è un'applicazione di significativo interesse. Avendo già studiato e monitorato, nelle annualità precedenti, una tramvia e sviluppato i sistemi di accumulo da introdurre in una o più sottostazioni (SSE) per il recupero dell'energia in frenatura, questa stessa struttura può, con piccole modifiche di dimensionamento e controllo, essere in grado di sopperire alla non sincronicità per brevi tempi tra produzione solare ed assorbimento dei treni.

Le attività svolte dall'Università di Pisa prevedevano l'aggiornamento dello strumento di simulazione e la sua validazione alla luce di una campagna di prove della durata di oltre un anno solare. Sulla base di ciò, sono state effettuate nuove simulazioni anche con integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica, finalizzate ad analizzare i flussi energetici sul sistema a confronto con quanto già analizzato in precedenza.

Inoltre l'Università di Pisa ha previsto anche una valutazione sperimentale del massimo numero di micro-cicli tollerabile dalle celle al litio ad alta potenza, sotto le citate condizioni di impiego. Per la definizione dei cicli si è fatto riferimento ai risultati delle simulazioni e alle misure in campo sulla tramvia di Bergamo. L'attività di sperimentazione in laboratorio di seguito presentata è stata svolta presso l'Università di Pisa, che si è dedicata a test di vita su un ciclo idealizzato particolarmente semplificato, meno rappresentativo degli effettivi profili di utilizzo, descritti da ENEA, ma più idoneo al fine di trarre indicazioni più generalizzate. Infatti i profili analizzati

sono rappresentativi in senso più generalizzato del caso della tramvia, e sono riferibili alle sollecitazioni cui sono soggetti gli accumuli impiegati in altre applicazioni veicolari, quali ad esempio i veicoli ibridi. In più si deve considerare che la simmetria di impiego in carica e scarica, unitamente ai picchi di corrente imposti, rendono cautelativi i risultati raggiunti, poiché rappresentativi di sollecitazioni più severe rispetto a quelle riscontrate nel caso della tramvia.

In Figura 27 si riportano i risultati ottenuti dalla simulazione svolta, dal quale si nota che il risparmio energetico cresce spostandosi dalla configurazione ad accumulo singolo fino a quella dotata di quattro accumuli. Al contrario, per un numero di accumuli più elevato, il livello del risparmio energetico tende a saturare verso un limite superiore.

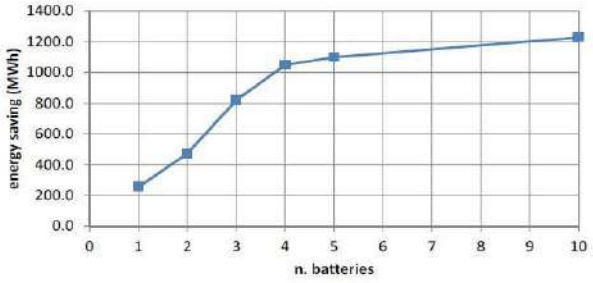


Figura 27. Risparmio energetico in funzione del numero di accumuli installati, configurazione senza DC/DC

La Tabella 2 riporta i consumi energetici rilevati sperimentalmente; l'energia annua disponibile per la trazione è pari a 2756 MWh annui rispetto ai 2994 MWh simulati, dunque con un errore del 8,6% in eccesso.

Tabella 2. Energia totale erogata dalle SSE, valore su base annua

Misura	Energia totale SSE [MWh/anno]
MT	4099,5
Perdite	737,9
Ausiliari BT	605,7
Trazione	2755,9

Una volta scelta l'architettura più idonea, si è posto il problema di valutare la produzione di energia da parte di questi dispositivi. Tenuto conto delle superfici disponibili di installazione, pari a circa 100 m^2 per ciascuna SSE, è possibile contare su una potenza di picco prossima a 15 kW. Nota la potenza di picco e il posizionamento dei pannelli, è possibile attraverso software di calcolo PVGIS valutare l'energia annua prodotta. Una volta identificate le principali caratteristiche, l'orientamento e le coordinate di installazione, come visibile in Figura 28, il software calcola l'energia prodotta su base annua.

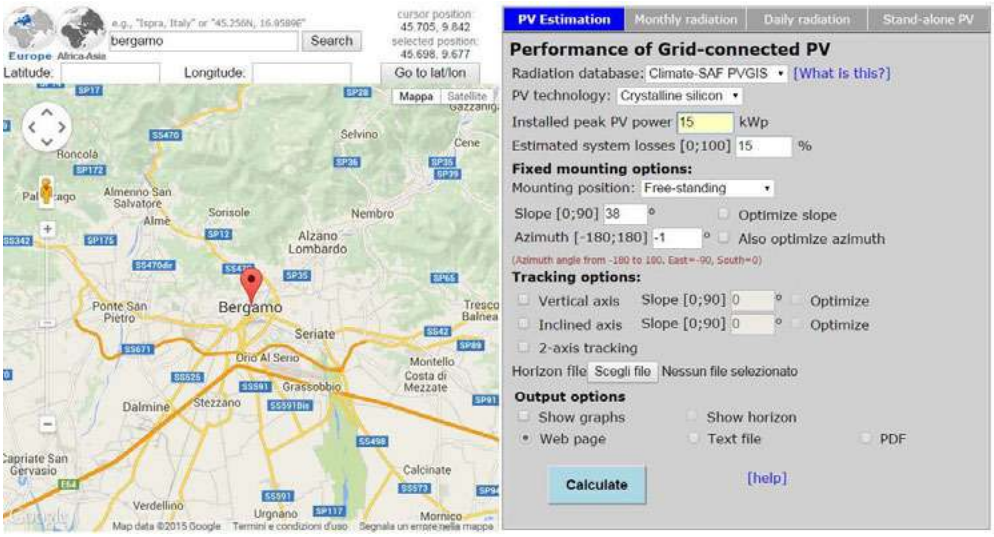


Figura 28. Schermata di calcolo del software utilizzato

I risultati sono stati riassunti in Tabella 3 nella quale sono riportate la produzione di energia media giornaliera e mensile, per l'intero anno. Come è osservabile, la media mensile è pari a 1560 kWh, per una produzione totale annua di 18700 kWh, per ciascuna SSE. In prima approssimazione, la produzione annua è dunque calcolabile ipotizzando circa 1000 ore equivalenti alla massima potenza. Ipotizzando una produzione equivalente sulle 10 SSE in esame, si ottiene dunque una produzione da solare pari a 187 MWh.

Tabella 3. Energia totale erogata dal sistema di produzione PV per singola SSE

Mese	Energia quotidiana [kWh]	Energia mensile [kWh]
Gennaio	30,0	931
Febbraio	45,9	1290
Marzo	57,6	1790
Aprile	57,3	1720
Maggio	63,5	1970
Giugno	66,3	1990
Luglio	72,2	2240
Agosto	66,7	2070
Settembre	57,7	1730
Ottobre	41,3	1280
Novembre	30,0	901
Dicembre	26,8	832
Media	**51,3**	**1560**
Totale	**18700**	

Come riportato in Figura 29, cinque accumuli sono sufficienti per sfruttare l'intera produzione energetica fotovoltaica.

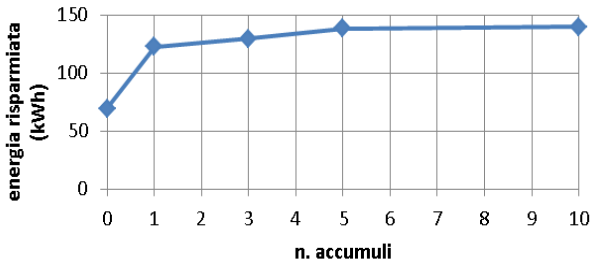


Figura 29. Curva di risparmio energetico dovuto alla generazione PV in funzione del numero di accumuli, ora di morbida

Per l'esecuzione della campagna di sperimentazione, il dispositivo in prova è una cella al litio ad alta potenza, tra le più efficienti, avente una capacità nominale di 13,0 Ah. Le prestazioni indicate dal costruttore indicano correnti massime continuative in scarica fino a 8 C_n, impulsive fino a 15 C_n, espresse sempre in multipli della capacità nominale. Dalla documentazione del costruttore, la batteria appare dunque orientata ad applicazioni a alta potenza. D'altra parte, non è chiaro per quanto tempo scariche impulsive possano essere mantenute senza danneggiamento del dispositivo, né quali siano i limiti di corrente impulsiva in carica, poiché solo quelli continuativi sono menzionati, rispettivamente pari a 3 C_n. Nessuna indicazione anche per quel che riguarda la vita a cicli, in caso di ridotte profondità di scarica. In conclusione è stata programmata un'intensa serie di test sperimentali, al fine di valutare le prestazioni dell'accumulo nell'ambito di applicazioni ad alta potenza. A questo proposito, un' inziale campagna di test è stata effettuata ai fini di caratterizzare le prestazioni del dispositivo.

La sollecitazione ipotizzata per l'accumulo dovrebbe dunque riprodurre la sollecitazione tipica per applicazioni orientate alla potenza. Conseguentemente, i seguenti profili tipo sono stati utilizzati:

A. cicli ripetuti a ridotta profondità di scarica, effettuati a corrente costante senza oltrepassare i limiti di temperatura del dispositivo. Questa è la condizione più generale possibile per applicazioni ad alta potenza;
B. cicli ripetuti a ridotta profondità di scarica, effettuati a corrente linearmente variabile. Questa sollecitazione è assai più rappresentativa degli stress cui è effettivamente sottoposto l'accumulo per applicazioni veicolari

A questo proposito, una singolo ciclo di tipo A (corrente costante) è mostrato in Figura 30: esso è costituito da una fase di carica a corrente costante, una fase di pausa, una fase di scarica sempre a corrente costante, con i seguenti vincoli:

- durata e ampiezza delle fasi di carica (ab) e scarica (cd) sono le stesse. I valori sono stati scelti per mantenere la cella al litio all'interno dei valori di tensione limiti ammessi (4.2-2.7 V). Le ampiezze sono state scelte rispettivamente pari a $5C_n$, $7{,}5C_n$, $10C_n$, mentre le durate corrispondenti sono pari a 30, 20, 10 s;
- la fase di pausa ha durata fissa di 20 s.

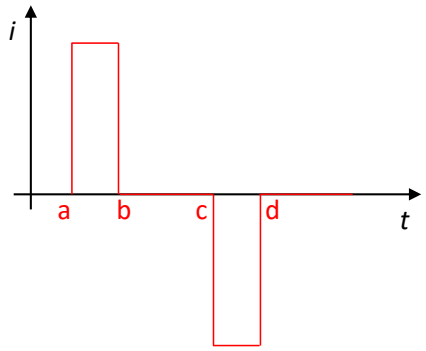


Figura 30. Sollecitazione di tipo A

Per quanto riguarda il test di tipo B invece, sia la fase di carica che quella di scarica sono variabili linearmente, sempre distanziate da una fase di pausa. Un singolo ciclo di tipo B è mostrato in Figura 31. In particolare:

- durata e valori di picco delle fasi di carica (ab) e scarica (cd) sono le stesse. I valori sono stati scelti per mantenere la cella al litio all'interno dei valori di tensione limiti ammessi (4,2-2,7 V). Le correnti di picco sono state scelte rispettivamente pari a $10C_n$, mentre le durate corrispondenti sono pari a 20 e 10 s;
- la fase di pausa ha durata fissa di 20 s.

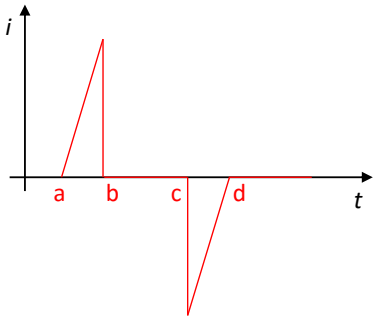


Figura 31. Sollecitazioni di tipo B

Il test di tipo B è maggiormente rappresentativo del tipo A ai fini di una caratterizzazione realistica per applicazioni di tipo veicolare. In effetti, ipotizzando fasi ad accelerazione costante, la potenza valutata alla ruota (o al cerchione nel caso ferroviario) ha andamento triangolare. Risalendo nella catena dell'apparato di propulsione dunque, il medesimo profilo di potenza caratterizzerà l'azionamento e, più a monte, eventuali dispositivi di accumulo. In prima approssimazione, per risalire dal profilo di potenza al profilo di corrente, si considera un valor medio di tensione costante.

I test di tipo A e B sono stati effettuati testando la cella al litio in una camera climatica, alla temperatura ambiente di 22 °C. I risultati sono riassunti in Tabella 4, nella quale è riportato il salto termico ΔT rispetto alla temperatura ambiente di riferimento di 22 °C, e la massima variazione di stato di carica ΔSOC corrispondente al singolo impulso di corrente di carica (o scarica).

I risultati mostrano che anche la temperatura rimane entro i limiti, visto che la massima temperatura ammessa per le celle in questione è di 60 °C.

Tabella 4. Principali caratteristiche della batteria

I/C_n [A/Ah]	Durata [s]	ΔSOC [%]	ΔT [°C]
5	30	4,1	4,7
7.5	10	2,1	6,2
10	10	2,8	12,3
10	20	5,6	15,5

Sono state quindi condotte valutazioni della durata della cella sottoposta a micro-cicli effettuate avendo a riferimento il test di tipo B, caratterizzato da corrente linearmente variabile (Figura 31), essendo molto più caratterizzante delle effettive sollecitazioni cui è sottoposto l'accumulo.

Dopo circa 200000 micro-cicli (Tabella 5) la capacità è risultata sostanzialmente invariata, mantenendosi attorno ai 12 Ah. Anzi è addirittura possibile osservare un leggero incremento, a testimonianza che la cella si trova ancora in condizioni di "allenamento".

Si può pertanto concludere che questo tipo di sollecitazione ha avuto un impatto trascurabile sulla vita della cella, in particolar modo rispetto a cicli di carica e scarica completi, effettuati a correnti più ridotte.

In definitiva, l'accumulatore è stato provato per centinaia di migliaia di micro-cicli senza variazione della capacità, il che fa prevedere che sia possibile impiegarlo fino al milione di micro-cicli, aspetto che consentirebbe di coprire l'intera vita utile dell'impianto, stimato in 10-15 anni.

Maggiori informazioni sull'attività svolta sono contenute nei rapporti RdS/PAR2014/174 e RdS/PAR2014/175.

Tabella 5. Risultati di vita a micro-cicli, verifica di capacità

Check capacità	Microcicli	Capacità [Ah]
1	0	12,0
2	12290	12,0
3	22390	12,0
4	32365	12,0
5	42515	12,0
6	52265	12,0
7	62465	12,0
8	72065	12,0
9	82240	12,0
10	92410	12,1
11	102075	12,1
12	112490	12,1
13	121890	12,1
14	132375	12,1
15	142075	12,0
16	151875	12,0
17	162665	12,1
18	172440	12,1
19	182430	12,2
20	192540	12,2
21	203050	12,2
22	212160	12,2

Ottimizzazione del ciclo di prova

L'ENEA ha proseguito ed approfondito lo studio e lo sviluppo di cicli test per la prova vita di sistemi di accumulo, riferendosi al caso studio della metropolitana leggera di Bergamo [rapporto RdS/PAR2015/176].

I prodotti finali dello studio sono stati un ciclo test che tiene conto delle diverse modalità di gestione della tramvia, legate alla fruizione giornaliera e stagionale del servizio da parte degli utenti, ed uno strumento di sintesi delle prestazioni richieste al sistema di accumulo che può essere utilizzato per un'eventuale revisione del

dimensionamento dello stesso o delle logiche con cui è gestito

I parametri presi in esame che influenzano la vita della cella sono stati il numero ed il valore delle correnti di picco a cui è sottoposta, la corrente 'continuativa' di scarica ed il valore e la variazione dello stato di carica rilevati durante l'esecuzione del ciclo.

Nel caso dell'applicazione considerata il dimensionamento e l'utilizzo del sistema di accumulo sono tali che la variazione dello stato di carica è estremamente limitata nell'arco del tempo, ed è quindi difficile ed anche superfluo definire una 'corrente continuativa' media di carica o scarica dello stesso.

Un parametro che non viene trattato nel presente studio, ma che è fondamentale per la vita delle celle è la temperatura di lavoro, per questo il test deve considerare anche le condizioni ambientali in cui opera il sistema di accumulo.

I cicli test che si vogliono costruire devono rispondere all'esigenza di essere facilmente implementabili con la maggior parte delle strumentazioni disponibili in laboratorio (ciclatori, alimentatori controllati), di essere caratterizzabili con semplicità (in termini di corrente massima di lavoro, potenza ed energia, ecc.) e di massimizzare le sollecitazioni richieste al sistema di accumulo, essi devono presentare rispetto ai cicli reali:

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

La struttura che si vuole proporre è costituita da una serie di scariche e cariche a gradino, costruite in modo da rappresentare le correnti di picco ed una corrente continuativa di carica/scarica (Figura 32).

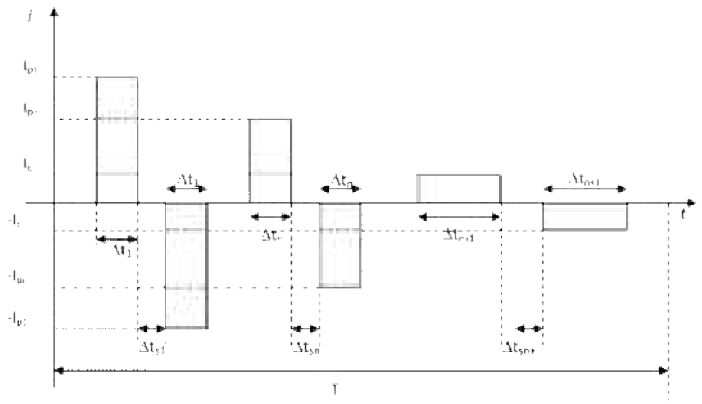


Figura 32. Struttura base del ciclo di riferimento

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

In generale il valore della corrente continuativa può essere ricavato considerando una corrente 'efficace' di scarica che compendia le perdite Joule del ciclo reale: come già detto nel caso in studio non ha senso proporre questa componente in quanto la variazione di stato di carica è estremamente limitata, si decide quindi di utilizzare soli 'gradini' di corrente della durata di dieci secondi. La Tabella 6 riporta i parametri caratteristici dei cicli test.

Tabella 6. Parametri caratteristici dei cicli test

Ciclo	Corrente massima [A]	Corrente minima [A]	Numero picchi	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	E_{joule} [kJ]
Rush	1000	-1000	26	0.000	0.064	383
Soft	895	-895	20	0.000	0.064	190
Holiday	895	-895	20	0.000	0.060	151

Il lavoro svolto, quindi, non solo ha portato a definire le basi per realizzare un test sulla vita del sistema di accumulo, ma mette a disposizione del progettista un semplice strumento di esame delle prestazioni richieste al

sistema stesso.

L'attività è consistita nella stesura di un ciclo di laboratorio in grado di riprodurre in modo fedele le sollecitazioni che subirebbe un modulo di batterie installato nella tranvia di Bergamo: il ciclo eguaglia o maggiora queste sollecitazioni e permette quindi una stima affidabile della vita dell'accumulo, stima che in ogni caso sarà per difetto e quindi cautelativa.

La base della costruzione della prova è espressa secondo una sequenza predeterminata: il progettista, in base alle sue esigenze, può decidere di costruire un test complessivo che rappresenti l'esercizio annuale del sistema di accumulo o dei test più approfonditi che entrino nel dettaglio dei mesi di lavoro o delle prove parziali relative a determinati periodi di lavoro. Una volta fatta la scelta occorrerà procedere all'esecuzione della prova, inframmezzata periodicamente da test che permettano la stima del degrado dei parametri della batteria o più verosimilmente, di una cella in prova: capacità, resistenza interna e, se di interesse, analisi in frequenza, risposta al gradino, ecc. (Figura 33).

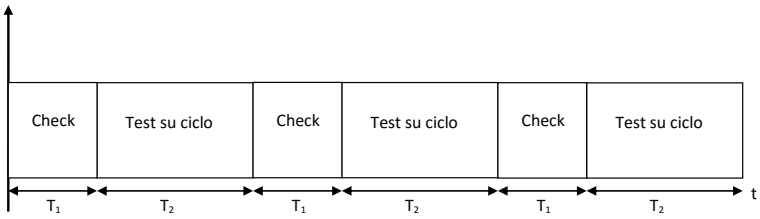


Figura 33. Struttura della prova vita

Dal sistema di accumulo ci si aspetta che nei primi cicli di lavoro presenti o delle prestazioni costanti o un miglioramento delle stesse, per poi rimanere stabile per un lungo periodo e successivamente inizi a degradare. In Figura 34 è mostrato un possibile generico andamento della capacità nel tempo.

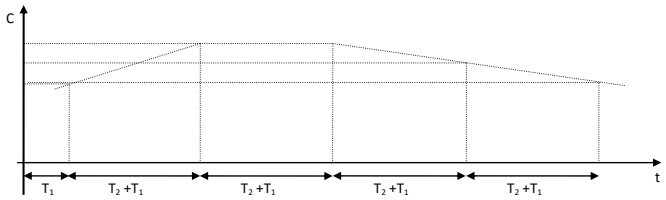


Figura 34. Possibile andamento della capacità

Scopo del progettista è di ottenere una vita delle batterie tale che esse non solo ripaghino il costo della loro installazione, ma producano un sensibile risparmio economico, conseguenza di quello energetico, per far questo ci si attende che la vita operativa sia dell'ordine degli anni e per lo stesso motivo ci si attende che la prova vita impostata duri anni.

Non è detto in generale che si abbia a disposizione un tempo di anni per testare le celle, sorge quindi il problema di velocizzare la prova. La figura 34 mostra che si può iniziare una previsione di vita quando il sistema inizia a degradare, provando per esempio ad interpolare i primi dati a disposizione per costruire una curva di previsione del degrado della capacità.

A priori non è certo che la curva di degrado non presenti una discontinuità che renda vano il processo di interpolazione: in generale però la discontinuità dovrebbe apparire quando ormai la cella ha perso le sue caratteristiche di resistenza interna e potenza specifica, ovvero quando la capacità è molto ridotta rispetto a quella nominale (70/75 per cento della C nominale), condizioni nelle quali normalmente essa è stata già ritirata dal servizio.

Analisi sperimentale del "second life"

Il presente studio riprende e prosegue le attività sperimentali di prova di celle al litio avviate nella precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico [rapporto RdS/PAR2013/190], in cui furono sviluppati dei cicli di prova per l'esecuzione di un test di vita su celle da trazione elettrica destinate ad un secondo utilizzo, dopo essere state ritirate dall'impiego su veicoli elettrici a causa della perdita delle loro caratteristiche iniziali, non più compatibili

con le applicazioni nei veicoli.

La "second life" consiste nel riutilizzo di questo tipo di celle, prevalentemente in applicazioni stazionarie: affinché ciò sia possibile occorre identificare le nuove prestazioni delle celle degradate e la loro durata di vita in tali applicazioni, in quanto il riutilizzo della cella richiede un investimento economico, sia nella composizione di un nuovo modulo batterie configurato secondo le esigenze del nuovo impiego, che nello sviluppo dell'elettronica di controllo.

Nel corso dell'annualità sono state sottoposte a caratterizzazione termografica alcune celle litio-ione considerate a fine vita per un utilizzo nel settore automotive. Tali celle sono state sottoposte ad opportuni cicli di carica e scarica per la valutazione del loro uso ulteriore in applicazioni stazionarie.

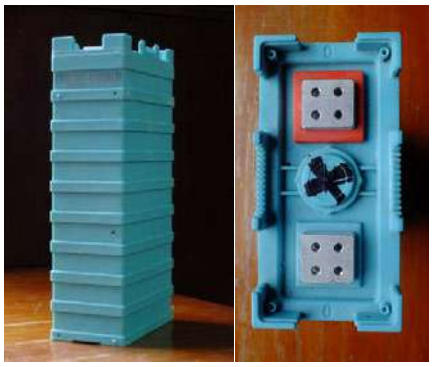


Figura 35. Cella in prova

Le prove sono state effettuate su celle LFMP90Ah (litio ferro fosfato) da 90 Ah messe a disposizione dalla Società FIB S.r.l.. La Figura 35 mostra una delle celle in prova.

Per caratterizzare le celle sono stati eseguiti dei cicli di carica e scarica ad una determinata corrente ed a fine prova è stato verificato lo stato di salute della cella, espresso in termini di capacità residua, variazione di resistenza interna ed eventuali modifiche della geometria del contenitore. In base al risultato di questa analisi è stata stabilita una nuova corrente di lavoro per la prova successiva. In Figura 36 è mostrata l'impostazione al ciclatore di una prova standard usata per la caratterizzazione e la selezione delle celle da destinare successivamente alla prova vita: si realizzano due cicli di carica e scarica con una corrente continuativa di 90 A e, successivamente, un ulteriore ciclo di carica e scarica con un'intensità di corrente pari a 45 A.

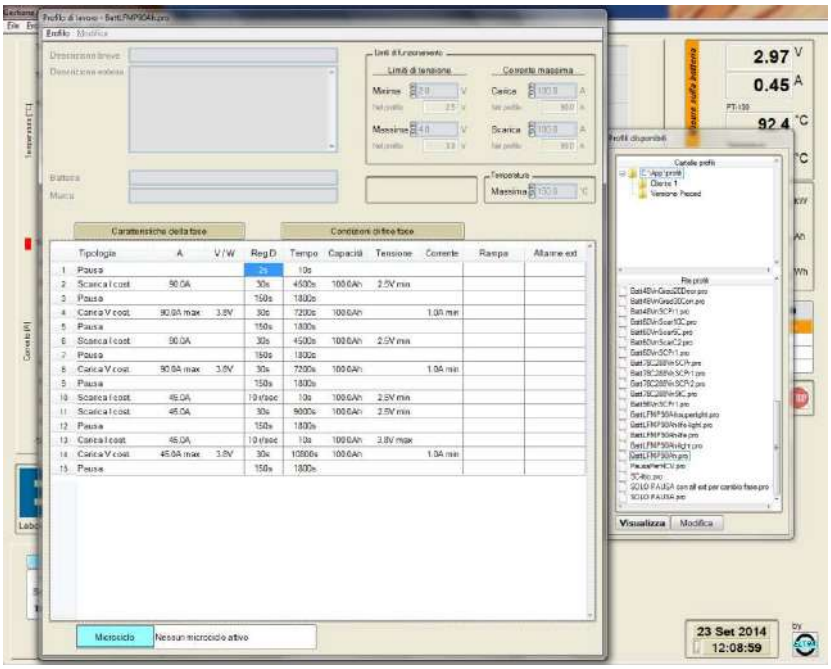


Figura 36. Impostazione al ciclatore della prova di caratterizzazione

Le prove di caratterizzazione, eseguite in precedenza, hanno permesso di stabilire che le caratteristiche delle celle fornite dalla FIB S.r.l. sono uniformi: esse presentano una capacità residua che ha una variazione compresa tra il 78 e l'88 % del valore nominale. Le correnti di lavoro, impulsive e continuative, che le celle possono sopportare senza subire un veloce degrado delle prestazioni, sono rispettivamente 90 e 30 A. Sulla base di questi risultati sono state impostati i cicli per il test di vita.

Sono state realizzate tre diverse versioni del ciclo di prova: "Pro", "Light" ed "Intermedio", caratterizzate da diversi valori per le correnti massime I_{max}, e continuative I_c (Tabella 7).

Tabella 7. Correnti nei cicli di test

Ciclo	I_c [A]	I_{max} [A]
Light	15	30
Intermedio	22,5	45
Pro	30	90

In Tabella 8 è riportata una stima del valore delle energie erogate, assorbite e disperse, nei tre casi in esame.

Tabella 8. Stima delle energie per i tre cicli di prova

Ciclo	Energia erogata [kJ]	Energia assorbita [kJ]	Energia dispersa [kJ]	Rendimento
Pro	575	1077	502	0,53
Intermedio	667	1032	365	0,65
Light	770	1025	255	0,75

L'energia assorbita dalla celle durante la fase di ricarica è paragonabile. Ci si aspetta quindi che il degrado sia legato ai valori delle correnti di punta e delle perdite per effetto Joule e perciò molto più elevato nei cicli "Pro" ed "Intermedio" rispetto al ciclo "Light".

Il numero di cicli che le celle hanno sopportato durante la prova vita è diverso nei tre casi: le prove sono state interrotte quando la cella, oltre ad aver perso una grande parte della sua capacità, ha mostrato una deformazione del contenitore tale da poterne compromettere l'integrità. In Figura 37 viene mostrata la comparazione tra una cella integra e quella ritirata dal ciclo "Pro".



Figura 37. Deformazione del contenitore della cella in prova (sinistra) e confronto con una cella integra

Nel caso del ciclo "Light" la prova è stata interrotta dopo l'esecuzione di 340 cicli, senza che fossero evidenziate deformazioni o rilevante decadimento delle prestazioni. Rispettando rigorosamente la definizione della condizione di fine test, tale prova non potrebbe considerarsi conclusa in quanto non si sono manifestate deformazioni o perdita rilevante di capacità. Proprio in considerazione della probabile traslazione a tempo indefinito del raggiungimento della condizione rigorosa di fine prova, è stato deciso di interrompere l'esecuzione del ciclo "Light" e passare alla definizione ed esecuzione del ciclo "Intermedio", per individuare un ciclo più impegnativo di quello "Light" e quindi più utile nel definire al meglio i limiti operativi delle celle in applicazioni di "second life".

La Tabella 8 riporta la durata dei test di vita e le capacità, iniziali e residue, registrate rispettivamente all'inizio ed al termine delle prove. La capacità residua del ciclo "Pro" è molto diversa da quella del ciclo "Intermedio", in quanto in questo caso le deformazioni del case si sono presentate solo a fine prova, ma sono state molto più accentuate. Il notevole e repentino rigonfiamento dell'involucro è abbinato all'altrettanto notevole e repentina riduzione di capacità

Tabella 9. Durata dei test di vita

Ciclo	Capacità iniziale [Ah]	Capacità residua [Ah]	Numero di ripetizioni
Pro	73	32	75
Intermedio	74	6	120
Light	78	75	341

La Figura 38 mostra le deformazioni subite dai contenitori nei tre casi: a sinistra il ciclo "Light", al centro il ciclo "Pro" ed a destra il ciclo "Intermedio".

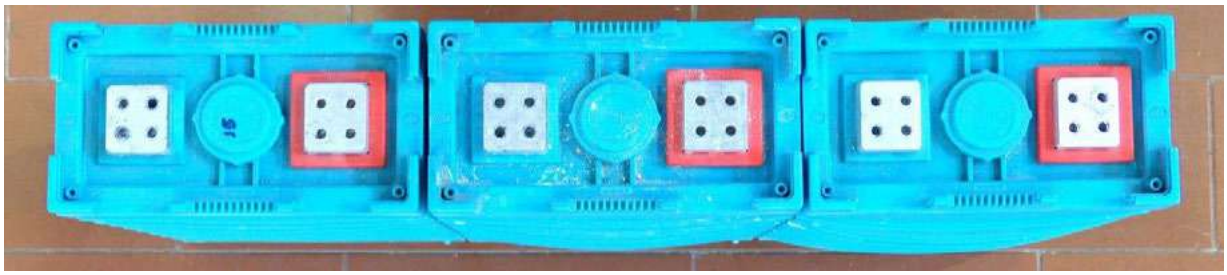


Figura 38. Deformazione delle celle sottoposte ai cicli di prova

I risultati ottenuti nelle prove permettono di eseguire una prima analisi di fattibilità sull'utilizzo delle celle fornite dalla FIB S.r.l. in una possibile applicazione stazionaria: infatti, i cicli "Light", "Intermedio" e "Pro" sono stati sviluppati considerando un'applicazione di tipo stazionario, in cui le celle potrebbero, ad esempio, essere integrate ad un sistema di generazione fotovoltaico e supportare la rete in caso di richiesta di potenza da parte di una macchina operatrice.

Per poter interfacciare le celle con la rete occorre utilizzare più celle e connetterle per costituire un modulo batterie. Inoltre bisogna stabilire la tensione totale del modulo. Considerando di operare in BT (bassa tensione) il modulo deve essere accoppiato ad un'elettronica di potenza che dovrebbe presentare una tensione totale compresa tra 400 e 600 V. Assumendo, come riferimento della tensione totale, il valore minimo di 400 V, è possibile calcolare le potenze e le energie erogate/assorbite dal modulo nei tre casi. I risultati del calcolo sono, presentati in Tabella 10.

Tabella 10. Stima delle prestazioni in un'applicazione stazionaria

Ciclo	Potenza massima [kW]	Potenza continuativa [kW]	Energia erogata [kWh]	Energia assorbita [kWh]
Light	3,75	1,86	27	36
Intermedio	5,60	2,81	23	36
Pro	11,25	3,75	20	37

La tabella mostra che anche nel caso del ciclo Light, che assicura anni di durata delle celle, la potenza erogata dal modulo, sia di punta che continuativa, è perfettamente compatibile con molte applicazioni stazionarie, anzi, è da considerarsi sovrabbondante nel caso si considerino applicazioni residenziali.

L'analisi sperimentale, comprensiva anche dello studio del comportamento termico, conferma la possibilità di utilizzare batterie usate per una loro "second life". Per fare ciò, sono state sviluppate delle prove vita che schematizzano delle applicazioni reali. Le stesse prove potrebbero essere utilizzate per determinare quali parametri leghino la durata di vita delle celle alle prestazioni ad esse richieste.

Per la caratterizzazione del transitorio termico durante i cicli di carica e scarica delle batterie, è stata utilizzata una termocamera con acquisizione automatica delle termografie ad intervalli regolari per tutta la durata dei test (Figura 39). Questo permette di correlare la mappatura delle temperature della superficie con lo stato di carica e l'intensità della corrente della batteria.

Per quanto riguarda la distribuzione delle temperature sulla superficie, sono stati controllati gli andamenti nel tempo dei profili di temperatura lungo tre rette (Figura 40).

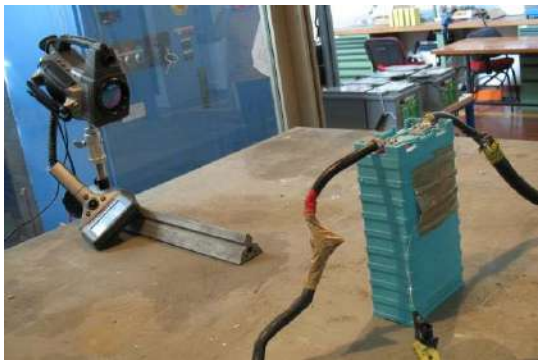


Figura 39. Termografia su batteria in esercizio

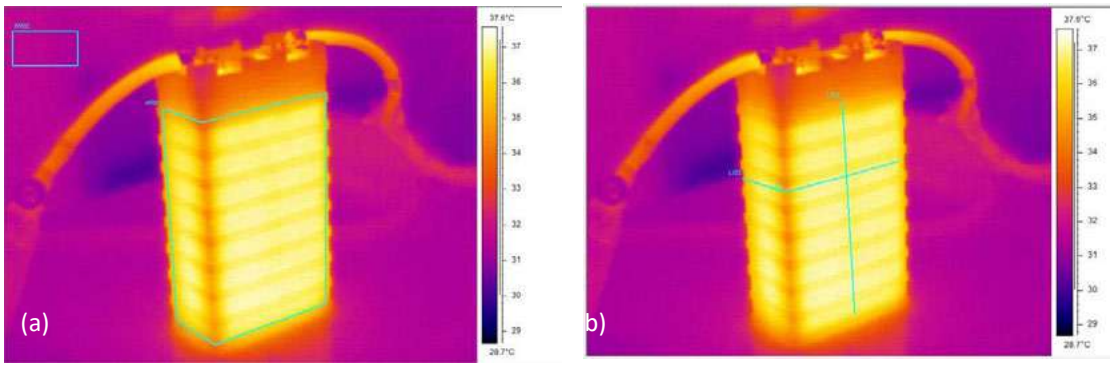


Figura 40. a) Tipiche aree di controllo per gli andamenti di temperatura nel tempo; (b) linee per il controllo della distribuzione della temperatura sulla superficie

Per quanto riguarda il metodo di elaborazione e presentazione dei dati [rapporto RdS/2013/190], per annullare l'effetto della temperatura iniziale e quella ambiente non costanti, si è definito il riscaldamento sperimentale come:

$$DT(t) = [T(t)-T_0] - [T_{amb}(t)-T_{amb0}]$$

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

I grafici ottenuti con questi DT per alcuni cicli di caratterizzazione (Figura 41a) mostrano un sensibile miglioramento nella regolarità degli andamenti rispetto alle temperature T(t) acquisite direttamente (Figura 41b) Tenendo presente, però, che i DT ottenuti permettono il confronto delle fasi di riscaldamento della cella tra diversi cicli, mentre non hanno utilità per la fase di raffreddamento, le parti a DT<0 non sono state visualizzate.

Dalla Figura 41 si vede che i picchi maggiori si hanno in corrispondenza della fase finale della scarica. Considerando che carica e scarica sono con la stessa intensità di corrente, questo indica che la produzione di calore (e quindi la resistenza interna) è diversa tra le due fasi, soprattutto durante l'ultimo periodo di scarica, in cui quindi si ha una notevole perdita dell'efficienza. In questo intervallo, quando la tensione subisce la brusca diminuzione, le temperature hanno un aumento della pendenza, in special modo la T_{max}.

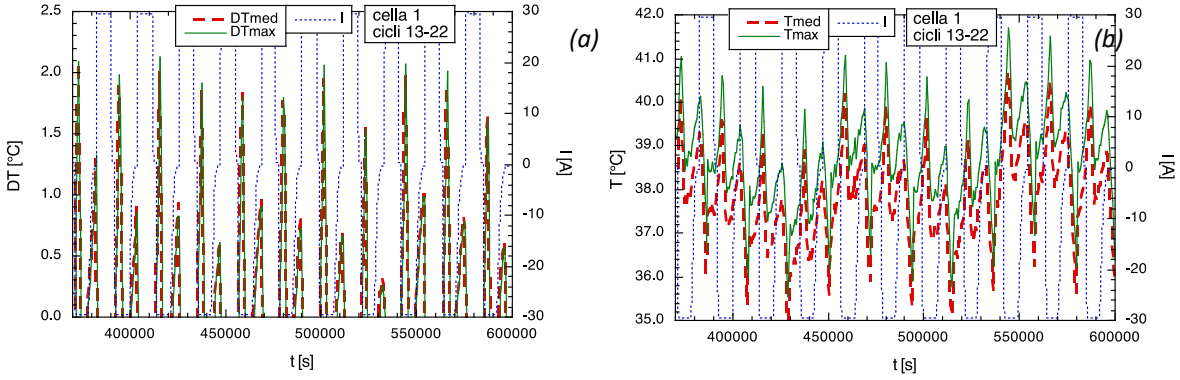


Figura 41. Variazioni di temperatura media e massima durante i cicli, individuabili dal segno della corrente (positiva=scarica, negativa=carica): a) DT dalla equazione (1); b) temperatura acquisita

In Figura 42, che riporta le temperature in funzione della capacità raggiunta al progredire della fase di carica/scarica, si vede che il riscaldamento è identico nelle due cariche (Ah <0) e molto simile tra le tre scariche.

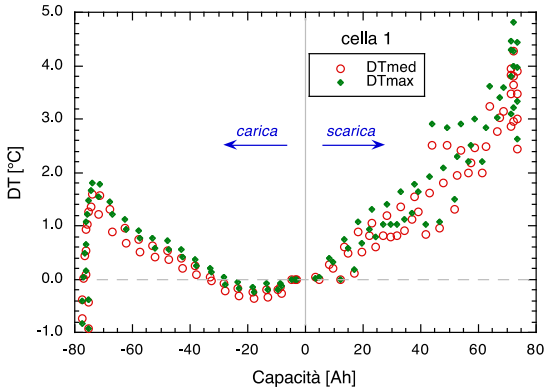


Figura 42. DT media e massima in funzione della quantità di carica

I risultati relativi alle prove sulle diverse celle analizzate, sottoposte ai differenti cicli, sono illustrati nel rapporto RdS/PAR2014/178.

In conclusione, i risultati dell'analisi termografica durante i cicli di lavoro hanno mostrato che per questo tipo di utilizzo l'aumento di temperatura non raggiunge mai valori pericolosi. Il riscaldamento, a parità di corrente, è sempre maggiore durante la scarica e raggiunge il massimo riscaldamento nell'ultimo periodo, quando la tensione subisce una brusca diminuzione. Comunque la variazione di temperatura è sempre contenuta: per correnti 1/3 C si rimane sotto i 4 °C nei primi cicli, per avvicinarsi agli 8 °C quando la cella, dopo circa 40 cicli, si è danneggiata e le sue prestazioni si sono notevolmente ridotte. Anche la distribuzione superficiale della temperatura è variata in corrispondenza di questo danneggiamento.

Nel caso di correnti minori, 1/6 C, il riscaldamento si è ridotto ulteriormente a valori massimi minori di 2 °C, e con una variazione molto ridotta sia delle prestazioni che del comportamento termico. Quindi anche in questo caso si è confermato il legame tra il riscaldamento e il danneggiamento, che per queste correnti è stato molto più piccolo nonostante i 344 cicli.

Con la corrente 1/4 C si è avuto di nuovo un notevole danneggiamento dopo circa 80 cicli dei 121 totali, ed il riscaldamento è stato intermedio tra i due casi precedenti.

Si può concludere che l'eventuale danneggiamento della cella provocherebbe un aumento del riscaldamento, ma la contemporanea riduzione delle prestazioni e quindi dell'energia totale scaricata porta ad una limitazione di questo aumento. Quindi, per quanto riguarda l'aspetto termico, nell'esecuzione di esperienze di second life non sono stati individuati punti di criticità e non è emersa la necessità di raffreddamento in esercizio.

Prove di invecchiamento

L'Università di Roma Tor Vergata ha studiato il comportamento di un modello circuitale per la rappresentazione di una batteria Li-ione al variare del tempo di invecchiamento e delle condizioni di stoccaggio in termini di temperature [rapporti RdS/PAR2014/180 e RdS/PAR2014/181].

La possibilità di rappresentare il comportamento di batterie o sistemi di batterie tramite modelli dalle assunzioni semplificate, ma in grado di replicare pur con un certo inevitabile errore l'evoluzione nel tempo dei parametri di prestazione fondamentali, e cioè tipicamente tensione, corrente e stato di carica o capacità è di grande utilità nel contesto sia della progettazione di componenti, sia nel contesto del loro controllo. In quest'ultimo caso, l'utilizzo di modelli, ad esempio, consente di valutare lo stato di carica mediante la misura della tensione, o con maggior accuratezza mediante la misura combinata della tensione e della corrente, con tecniche quali l'utilizzo del filtro di Kalman[1]. Tale metodologia è stata anche applicata con successo alla stima dello SOH (State Of Health), definito come rapporto tra la capacità attuale e quella nominale $SOH=Q_{aged}/Q_0$[2-3].

Sia nel caso dell'utilizzo di metodologie on-line (basate su filtro di Kalman), che nel caso di applicazioni diagnostiche off-line, si fa riferimento a modelli di comportamento della batteria, con caratteristiche più o meno

[1] Plett G.L., Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs Part 3. State and Parameter Estimation, J. Power Sources, 13 (2004) 277

[2] Kuhn E., Forgez C., Lagonotte P., Friedrich G., Modeling Ni-MH Battery Using Cauer and Foster Structures, J. Power Sources, 158 (2006) 1490

[3] Galeotti M., Gianmarco C., Cinà L., Cordiner S., Di Carlo A., Synthetic Methods for the Evaluation of the State of Health of Nickel-Metal hydride (NiMH) Batteries, Energy Conversion and Management, 92 (2015) 1

semplificate, e basate su diverse tipologie di approccio. Modelli ancora più accurati sono infine selezionati per il design di celle e batterie, laddove si entri nel merito di una rappresentazione diretta dei fenomeni elettrochimici e di scambio di calore.

Le metodologie di modellazione possono essere raggruppate identificando 3 diversi approcci alla rappresentazione del problema: sperimentale, elettrochimico e circuitale.

Nel presente studio per la simulazione del comportamento di batterie Li-ione, la scelta è caduta su un modello circuitale, in grado valutare l'evoluzione dinamica della tensione una volta imposto il profilo di corrente nel tempo. Utilizzando una definizione relativamente semplice, il modello consente di rappresentare non solo le non linearità del comportamento della batteria - in corrispondenza di estremali dello stato di carica - ma anche i fenomeni dinamici di rilassamento della tensione durante il transitorio di erogazione della corrente.

I risultati ottenuti possono essere considerati incoraggianti data la semplicità del modello, e i ridotti tempi di calcolo, che ne fanno potenzialmente un ottimo strumento per la valutazione diagnostica dello stato di salute della batteria, in sede predittiva o diagnostica, una volta misurato sperimentalmente un ciclo completo di carica/scarica profonda.

Il modello circuitale adottato è schematizzato in Figura 43.

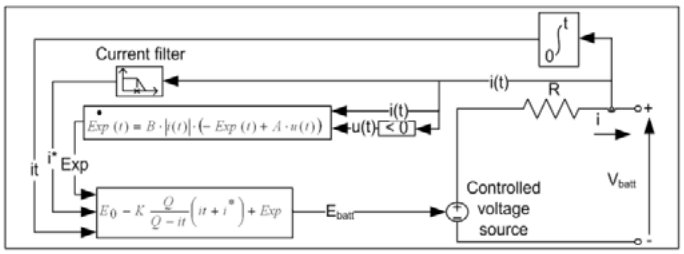


Figura 43. Schema circuitale del modello della batteria

Il modello di batteria è stato confrontato con dati sperimentali acquisiti su batterie Li-ione, e disponibili sotto forma di curve di scarica e carica, di celle appena prodotte. Il modello è stato utilizzato per replicare gli esperimenti condotti, che prevedevano la scarica completa della cella a 4,3 A, la stabilizzazione del valore della tensione, e l'effettuazione di un processo di carica completa al medesimo valore della corrente (4,3 A). Durante il ciclo di carica, date le condizioni di sovratensione, il test è effettuato in modo da imporre, in feedback, una limitazione di corrente tale da mantenere le condizioni di tensione costante nel tempo.

Dall'analisi di Figura 44, dove è riportato il confronto numerico - sperimentale tra l'evoluzione della tensione durante ciclo di scarica completa, rilassamento e ciclo di carica completa, risulta evidente come il modello sia sostanzialmente in grado di replicare con buona accuratezza l'evoluzione della tensione nel tempo, una volta calibrati i parametri di tensione (V_{full}, V_{exp} e V_{nom}), di definizione dei domini non lineari (SOC_{exp} e SOC_{nom}), insieme alla definizione della dinamica di rilassamento.

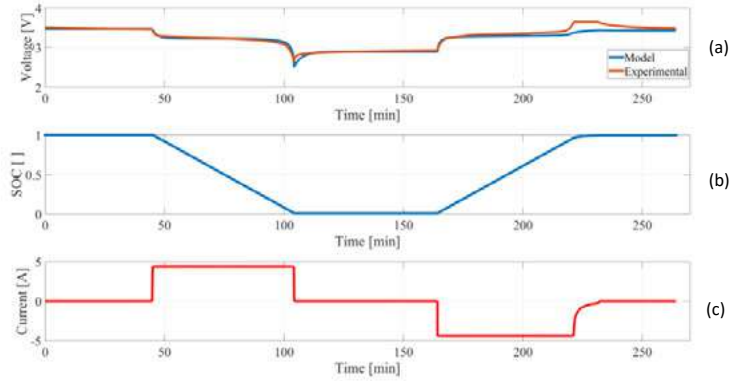


Figura 44. Ciclo di test di una batteria nuova. (a) confronto numerico-sperimentale dell'evoluzione della tensione in funzione del tempo; (b) stato di carica (SOC) calcolato dal modello in funzione del tempo; (c) corrente in funzione del tempo, imposta sia durante l'esperimento che come dato di input del modello

La formulazione del modello, sebbene semplificata, consente di tenere conto delle non linearità del comportamento della batteria in corrispondenza degli stati sia a ridotto sia a elevato stato di carica (SOC). I principali risultati ottenuti da un confronto con dati sperimentali, consentono di trarre le seguenti conclusioni sintetiche:

- il modello rappresenta in maniera sufficientemente accurata l'evoluzione dei processi di scarica, rilassamento e carica, mantenendo invariati i parametri di input;
- la deviazione tra dati numerici e sperimentali risulta minima soprattutto nella descrizione del processo di scarica, anche in corrispondenza dei tratti non lineari dell'evoluzione della tensione in funzione della corrente;
- la deviazione tra dati numerici e sperimentali risulta maggiore durante il processo di scarica, e particolarmente nella fase finale (fortemente non lineare) caratterizzata, sperimentalmente, da un comportamento a tensione costante.

Il modello di batteria è stato confrontato con dati sperimentali, disponibili sotto forma di curve di scarica e carica di batterie sottoposte a calendar aging, fully charged e in condizioni accelerate, alla temperatura di 40 e 60 °C.

Il confronto tra dati numerici (del modello) e sperimentali è stato condotto mediante la simulazione di un processo di scarica profonda ed uno di scarica profonda, a partire da condizioni di carica completa (SOC=100%) stabilizzate. I processi di carica e scarica sono stati condotti imponendo una corrente di 4,3 A, ed inoltre, tra il processo di scarica e carica, è stato imposto un lasso di tempo per stabilizzare la tensione in le condizione di circuito aperto. Durante il processo di carica, in corrispondenza della fase finale, si è adottata, sperimentalmente, una limitazione di corrente per ottenere un profilo di tensione costante nel tempo. Tale limitazione non è stata altresì implementata nel modello, dato che l'imposizione come dato di input del profilo di corrente in funzione del tempo fa sì che si possa automaticamente tenere conto di tale modalità di carica.

In Figura 45 sono riportati i confronti numerico-sperimentali condotti dopo periodi di aging accelerato a 45 °C, per 90 giorni. Come era avvenuto nel caso dell'aging condotto a 60 °C, si osserva un decadimento, anche se meno evidente, delle prestazioni della batteria, in termini di tensione operativa, resistenza interna, e tempo caratteristico di rilassamento della tensione.

Si può ancora rilevare come il modello sia in grado di rappresentare in maniera soddisfacente il comportamento transitorio della batteria, anche dopo processi di invecchiamento accelerato condotti in condizioni diverse (45 °C invece di 60°C).

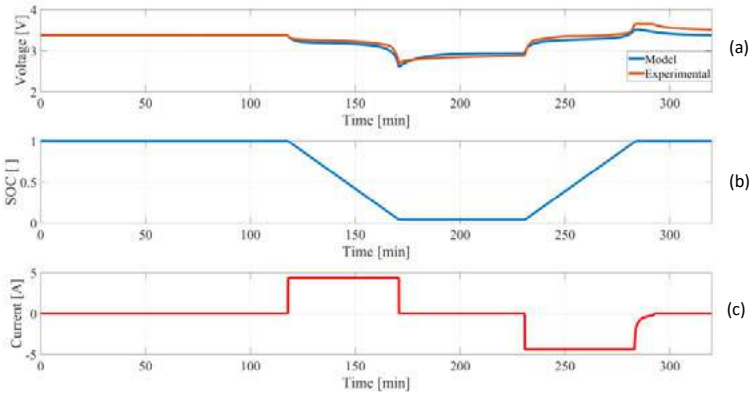


Figura 45. Ciclo di test di una batteria dopo un processo accelerato di aging condotto a 45°C per 90 gg. (a) confronto numerico-sperimentale dell' evoluzione della tensione in funzione del tempo; (b) stato di carica calcolato dal modello in funzione del tempo; (c) corrente in funzione del tempo, imposta sia durante l'esperimento che come dato di input del modello

Le prestazioni del modello per la rappresentazione del comportamento dinamico di una batteria invecchiata secondo calendar-aging sono state verificate, studiando anche la variazione dei parametri fondamentali di input del modello al variare del tempo di calendar-aging (modelli di invecchiamento).

I principali risultati ottenuti da un confronto con dati sperimentali, mantenendo invariati i parametri di input per i processi di carica/scarica per assegnati parametri di invecchiamento (tempo e temperatura di stoccaggio), consentono di trarre le seguenti conclusioni sintetiche:

- l'opportuna variazione dei parametri di input consente di ottenere un confronto soddisfacente tra l'evoluzione della tensione calcolata numericamente e misurata sperimentalmente, in corrispondenza di un ciclo caratterizzato da processi di scarica/carica profonda, consentendo anche un'opportuna rappresentazione dell'evoluzione dinamica della tensione durante i fenomeni di rilassamento al variare del tempo di aging e della temperatura di stoccaggio;
- il modello è in grado di descrivere, attraverso la variazione dei parametri di input, la diminuzione della capacità e l'aumento della resistenza interna della batteria, nonché il rallentamento degli effetti dinamici di rilassamento della tensione al variare del tempo di aging. Gli intervalli di variazione di detti parametri sono non lineari sia rispetto al tempo di invecchiamento, che rispetto alla temperatura di stoccaggio della batteria. Più precisamente, dopo 180 giorni di aging:
  - la capacità si porta all'88% di quella nominale (45 °C) e al 66% di quella nominale (60 °C)
  - la resistenza interna aumenta di circa il 30% (45 °C) e di circa il 50% (60 °C)
  - il tempo di rilassamento aumenta di circa il 400% (45 °C) e di circa il 600% (60 °C);
- gli effetti di decadimento della tensione operativa della batteria sono descritti attraverso i parametri di tensione massima (V_{full}) e nominale (V_{nom}), che osservano una immediata repentina variazione (dopo i primi 45 gg) per stabilizzarsi al variare del tempo di aging (fino a 180 gg);
- gli intervalli di definizione del comportamento non lineare della caratteristica di tensione in funzione della capacità variano con il tempo di aging, e più precisamente:
  - l'intervallo superiore di non linearità (descritto attraverso il parametro SOC_{exp}) tende a estendersi con il tempo di aging, e con la temperatura di stoccaggio
  - l'intervallo inferiore di non linearità tende a contrarsi, con effetto di contrazione meno pronunciato per lo stoccaggio a temperatura ridotta.

b.2 Studi sperimentali di sicurezza nell'applicazione dei sistemi di accumulo elettrochimico al litio

Lo stato attuale delle conoscenze mostra una scarsità degli studi di caratterizzazione della infiammabilità delle sostanze che costituiscono le varie tipologie di celle litio-ione e delle sostanze che compongono i gas che possono essere emessi dalle celle. Inoltre l'intervento da attuare in caso di incendio è ancora allo studio a livello internazionale ed ancora non sono state emesse specifiche certe, risalgono al 2004 i primi studi sperimentali disponibili in letteratura.

A tal fine, con la squadra di emergenza incendio interna al C.R .ENEA Casaccia, sono state studiate le cause esogene ed endogene dell'incendio di celle litio-ione, effettuate verifiche sperimentali con i sistemi di estinzione selezionati.

Le prove, effettuate sono preparatorie alla conduzione in sicurezza delle prove di abuso e di apertura delle celle e si ritengono fondamentali per affrontare le problematiche relative alla gestione degli incendi di sistemi di accumulo stazionario e di sistemi di ricarica rapida e sono estendibili anche ad incidenti di veicoli elettrici, in termini di prevenzione, protezione e intervento in emergenza. Le attività sono state rivolte a capire le condizioni per un piano di ricerca per il prossimo triennio, comprendente azioni e linee guida per la formazione degli addetti alla lotta antincendio di questi sistemi.

Analisi di sicurezza

L'ENEA si è concentrata sulla messa a punto di una procedura di prevenzione e protezione dei rischi di incendio e di esplosione nel corso di esperimenti effettuati su scala di laboratorio, ovvero di definire le modalità di intervento in caso di emergenza [rapporto RdS/PAR2014/182]. In particolare, per quanto riguarda prove che vedono coinvolti sistemi di accumulo elettrochimico, tra i quali quelli litio-ione, diventa necessario effettuare: l'identificazione della chimica delle celle utilizzate; l'acquisizione della scheda di sicurezza; la "storia" dei sistemi elettrochimici. È inoltre necessario dotare i laboratori di opportuni sistemi di estinzione del fuoco e addestrare il personale ad utilizzarli.

Per raggiungere l'obiettivo prefissato, si è tentato di consolidare la ricostruzione della catena di eventi che, all'aumentare della temperatura, possono provocare i fenomeni chimici che possono determinare incendio ed esplosione di celle litio-ione ed è stato impostato lo studio dell'entità delle conseguenze di questi fenomeni. Sono state acquisite informazioni sulla esistenza e sulla tipologia di dispositivi di protezione e controllo presenti sia a livello di cella che a livello di sistemi di accumulo di varie dimensioni; si è trattato il concetto di "Affidabilità" legato intimamente al concetto di "Rateo di Guasto" e agli esiti delle prove prestazionali; sono stati individuati alcuni criteri di scelta degli agenti estinguenti da utilizzare e, infine, è stato preso in esame un incidente (senza danni alle persone) avvenuto recentemente in un laboratorio di ricerca, nel corso della prova di un ciclatore su una batteria

di quattro celle litio-ione del tipo Li-NMC.

Infine sono state delineate le attività di prevenzione e protezione da adottare all'interno di un laboratorio e le indicazioni per mettere a punto la procedura di intervento in caso di emergenza [rapporto RdS/PAR2014/182].

Da un punto di vista della sicurezza e della protezione da incendio ed esplosione, occorre tenere presente che questi sistemi sono caratterizzati da una elevata densità di energia accoppiata alla presenza di sostanze organiche infiammabili, ovvero di un elettrolita costituito da composti organici ossigenati e da composti contenenti fluoruri. Nei sistemi precedenti era presente un elettrolita acquoso, tutto questo ha creato un numero abbastanza grande di cambiamenti che riguardano la progettazione, lo stoccaggio e la manipolazione delle batterie che contengono celle litio ione.

Si è inizialmente cercato di chiarire le differenze che esistono tra incendio ed esplosione e come questi fenomeni siano spesso consequenziali, sono state fornite le grandezze che caratterizzano una sostanza definita come infiammabile, si è trattato dei sistemi di estinzione e di come la loro scelta sia vincolata alla "classificazione" della tipologia di fuoco. Successivamente si è cercato di approfondire la catena di eventi che portano all'esplosione e/o all'incendio di celle litio-ione, con attenzione ai sistemi di protezione e controllo di cui sono generalmente dotati i sistemi di accumulo litio-ione, ed ai concetti di Qualità e di Affidabilità.

In Tabella 11 sono stati riassunti, per alcune tipologie di estinguenti, i meccanismi di azione sul fuoco e gli effetti sull'uomo che vengono mitigati attraverso l'uso di adeguati dispositivi di protezione Individuale. La scelta dell'agente estinguente si effettua sulla base della determinazione della "Classe di fuoco".

Una cella litio ione è sicura se attentamente controllata. La perdita del controllo della temperatura interna della cella provoca l'innesco di una serie di reazioni indesiderate che possono culminare in reazioni auto acceleranti di decomposizione completa dei materiali attivi e dell'elettrolita (*runaway* della cella) con conseguente esplosione ed incendio.

Tabella 11. Principali agenti estinguenti e loro meccanismi di azione

ESTINGUENTE	EFFETTI SULL'UOMO	TIPOLOGIA DI AZIONE			
		SEPARAZIONE	SOFFOCAMENTO	RAFFREDDAMENTO	INIBIZIONE CHIMICA
Acqua					
Anidride carbonica	Congelamento (e soffocamento)				
Polvere	Irritazione occhi e vie respiratorie				
Schiuma					
Idrocarburi alogenati	Possibile formazione di sostanze tossiche per decomposizione				

Legenda	Qualità dell'azione estinguente	BUONA	MEDIOCRE	NULLA

A tal fine dispositivi di protezione e controllo sono presenti sia a livello di cella che a livello di batterie, e a livello di sistemi di accumulo di dimensioni elevate (centinaia o migliaia di celle).

Generalmente questi dispositivi hanno un ragionevole livello di *affidabilità*: se combinati ad altre misure di sicurezza possono portare il *rateo di guasto* di una cella nel campo del valore 10^{-7} (1 cella ogni 10 milioni di celle), un valore assolutamente apprezzabile dagli analisti di rischio.

Quando le densità di energia della generazione di corrente di celle litio ione raggiunge e supera i 200 Wh/kg, la cella contiene abbastanza energia elettrochimica per auto riscaldarsi in modo adiabatico e aumentare la sua temperatura interna oltre i 660 °C. Questa temperatura è al di sopra della stabilità termica dei materiali attivi e si trasforma nel rilascio di un quante applicativo significativo di energia a seguito della decomposizione del catodo, dell'anodo, e della combustione dell'elettrolita. Il vigore con cui l'energia chimica viene rilasciata e tale da consentire la propagazione degli eventi accaduti ad una singola cella, a quelle vicine.

La chiave per realizzare una batteria più sicura è:

- ridurre la probabilità che il guasto di una singola cella si propaghi alle altre;
- diminuire la severità di ogni guasto successivo.

Come caso studio è stato esaminato un incidente avvenuto in un laboratorio di ricerca del C.R. Casaccia dell'ENEA. Nel corso del ciclaggio di 4 celle del tipo Li-NMC (20 Ah), finalizzato al test dei quattro canali di un ciclatore, si è sviluppato un incendio interrotto dall'utilizzo di un estintore. Tre su quattro celle sono state completamente distrutte dal fuoco. La modalità di estinzione ha provocato una deviazione della fiamma verso il ciclatore che ha riportato danni ai connettori. Hanno subito danni anche i cavi di collegamento. Nessun danno a persone.

Descrizione dell'incidente. Dopo circa due ore, l'operatore ritorna in laboratorio per preparare altre prove con nessuna relazione con quelle in corso. Passano pochi istanti, e un sibilo lo induce a rivolgersi verso il ciclatore e nota che proviene dalla cella n. 1 che si stava gonfiando. L'operatore decide di andare al ciclatore ed interrompere l'erogazione di corrente. Fatti pochi passi (siamo nell'ordine della decina di secondi) inizia l'incendio della cella n.1. L'operatore interviene con un primo estintore che non funziona. Utilizza il secondo, probabilmente a polvere (No polvere di rame per incendi classe D). Nel frattempo la fiamma investe le celle adiacenti e ne induce l'incendio (circa un minuto: scenario di partecipazione al fuoco/abuso termico). Durante l'utilizzo dell'estintore, le fiamme vengono deviate dalla pressione dell'estinguente, verso il ciclatore fondendo i connettori. Viene parzialmente salvata la cella n. 4.

L'operatore si è accorto dell'avvenimento solo per una singolare coincidenza. La presenza di un sistema di controllo della temperatura avrebbe potuto interrompere la carica della cella. Per limitare o estinguere l'incendio, ha utilizzato i normali estintori in dotazione degli ambienti di lavoro peggiorando i danni causati dall'incendio, ovvero estendendoli alle attrezzature di prova. Nel caso di non intervento gli effetti, probabilmente, avrebbero interessato solo l'area in cui erano installate le celle. E' critica, sia la scelta dell'estintore (ovvero dell'estinguente) che la modalità di utilizzo .

Di fatto, la cella n.1 si è comportata come una resistenza. Il peso di una di queste celle è di circa 400 g. Al termine dell'incidente di tre celle su quattro era rimasto meno di 150 g, con una perdita in peso di 1100 g, interamente combusti.

In conclusione, al fine di redigere una procedura di prevenzione di incendio ed esplosione e di intervento in caso di emergenza su scala di laboratorio, è necessario tenere conto che i sistemi litio-ione possono incendiarsi e/o esplodere. Le informazioni necessarie per una corretta procedura operativa devono tenere conto, tra l'altro, della "storia" dei sistemi di prova. La scelta degli agenti estinguenti e delle modalità di intervento, nell'ambito di un vuoto legislativo, si richiede la sperimentazione su campo degli agenti indicati dal costruttore per gli utenti finali, giacché le condizioni sperimentali possono deviare notevolmente dalle condizioni di uso finale per le quali il costruttore garantisce il prodotto.

Le informazioni sul comportamento ad abuso o guasto delle tecnologie litio-ione, tra le quali campeggia l'osservazione che il "triangolo del fuoco" è già presente all'interno di una cella, sono le stesse di cui si deve servire il produttore per la progettazione delle condizioni di sicurezza all'interno dei propri siti produttivi. E sono quelle necessarie per la progettazione di locali batteria o dei sistemi di controllo per i sistemi di accumulo destinati alla rete elettrica o ai veicoli elettrici/ibridi.

Si riscontra la necessità di consolidare definitivamente la conoscenza della catena di eventi conseguenti alla perdita di controllo della temperatura interna di una cella o di un sistema di accumulo, di effettuare in modo sistematico prove in campo per al verifica dei comportamenti all'abuso e di diversi estinguenti, di celle con diversa tipologia di catodo e in diverse condizioni di SOC; di verificare le capacità previsionali della analisi di rischio condotta con metodologie standardizzate; di sviluppare una adeguata sensoristica per gli ambienti d'uso o di sperimentazione.

Lo studio dell'incidente occorso nei laboratori ENEA, costituisce, tra le altre cose, un importante riferimento per la progettazione delle prove in campo con l'impianto costruito dalla squadra antincendio del CR Casaccia. All'interno del Centro Casaccia, è operativa un'area di esercitazione per lo spegnimento di incendi sviluppati da idrocarburi su vasche, da autovetture, da quadri elettrici, ecc.. Per effettuare le prove per la valutazione e l'analisi di incendi e/o esplosioni di celle litio-ione è stato pensato di dedicare una zona di questa area e realizzare le infrastrutture necessarie. Tali infrastrutture consistono principalmente in tre macro componenti:

- attrezzatura di contenimento e sviluppo incendio;
- attrezzatura di spegnimento incendio
- attrezzatura di monitoraggio e registrazione evento.

La costruzione di tali attrezzature permetterà di condurre le prove in un'area riservata, utilizzabile anche in futuro, ottemperando a tutti i canoni di sicurezza sia per gli operatori, sia per le infrastrutture limitrofe.

Per la progettazione esecutiva di dette attrezzature si è tenuto presente, sia la fattibilità tecnico economica con le apparecchiature disponibili sul mercato, sia le variabili tecniche da valutare nel corso delle prove, proprio per la



Figura 46. Vista laterale del banco prova incendio

natura sperimentale delle stesse.

È stato realizzato un tavolo alto 75 cm, dove è posta una vasca metallica di contenimento dotata di fori di drenaggio, delle dimensioni di 90 x 100 cm (Figura 46). Sulla stessa è stato posizionato un piccolo circuito tubolare a forma di scorpione (Scorpion) che sarà usato per innescare l'incendio tramite flussaggio di gas propano. Lo Scorpion è stato costruito con tubi, zincati utilizzando la tecnologia idrica, sia per una maggiore economicità, sia soprattutto per una più semplice e rapida modifica delle geometrie e dei componenti, dovuti alle probabili diverse grandezze delle "batterie" e/o alla verifica sul campo di reazioni diverse a quelle ipotizzate. Da ultimo l'intercambiabilità degli ugelli di fuoriuscita del gas utilizzato per alimentare il fuoco di inizio incendio, confermano la grande versatilità di tutta l'attrezzatura. Lo Scorpion sarà collegato alla bombola di gas posizionata a distanza di sicurezza tramite un tubo metallico munito di una valvola di intercettazione.

L'equipaggiamento del personale ENEA è quello previsto per le squadre d'emergenza antincendio secondo le norme tecniche e giuridiche specifiche, ed include l'uso di autorespiratori. Verranno sperimentate, se del caso, anche tute a contenimento completo, necessarie in presenza di fumi tossici o irritanti. Il personale utilizzatore deve essere adeguatamente addestrato e deve essere idoneo all'utilizzo di tali sistemi.

Benché esistano numerosi studi sulla stabilità termica delle celle litio ione, questi riguardano generalmente la caratterizzazione delle reazioni chimiche che possono innescare reazioni fuggitive indesiderate (*thermal runaway reactions).* Scarsi sono, invece, gli studi effettuati sulle proprietà combustibili delle varie tipologie di elettrolita e dei gas emessi durante l'operatività (*vented gases*) o sul pericolo di incendio associato ai prodotti delle reazioni fuggitive.

I limiti della sperimentazione condotta su scala di laboratorio su una chimica e una configurazione di cella specifici ed è stata messa in evidenza la necessità di effettuare uno scale up delle conclusioni sperimentali, di ulteriori prove, di disporre di un benchmark con cui confrontare i risultati, di effettuare prove su celle con chimiche e configurazioni strutturali diverse.

I dati pubblicati riguardano ambiti molto specifici di utilizzo di queste tecnologie, come l'estinzione di incendi nel trasporto aereo in cabina passeggeri, dove possono accadere alle celle (in numero limitato: bassa quantità di materia ed energia) utilizzate in apparati elettronici e generalmente disponibili estintori ad Halon e ad acqua; oppure, nel caso di aerei cargo che trasportano celle a litio-ione e dispongono di estintori ad Halon. Solo di recente si iniziano ad affrontare studi sulla configurazione e sui criteri di progettazione di sistemi estinguenti a *sprinkler* (con acqua o altri agenti) per le *commodities* litio ione, aumentando così la scala di sperimentazione.

Questi dati sono stati indispensabili per la progettazione e realizzazione di un impianto di prova in campo aperto dove potranno essere sperimentati agenti estinguenti per le classi di fuoco A, B e C e l'acqua, normalmente presente nei magazzini di stoccaggio.

Le condizioni di prova dovranno includere i seguenti :scenari partecipazione al fuoco; abuso termico; cortocircuito. Dovranno inoltre essere effettuate in diversi stati di carica (SOC) dei sistemi di accumulo.

La sperimentazione verrà effettuata nei prossimi anni, anche con l'obiettivo di predisporre procedure di informazione, formazione ed intervento di coloro che sono coinvolti nella gestione di sistemi di accumulo elettrochimici di nuova generazione.

Per approfondimenti sulle attività svolte si rimanda ai rapporti RdS/PAR2014/182 e RdS/PAR2014/183.

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

L'attività di ricerca svolta nel presente anno ha avuto come obiettivo la definizione di due processi innovativi di separazione e recupero ecosostenibile dei materiali attivi (catodo e anodo) ottenuti da batterie al litio esauste di due diverse chimiche (una a base di litio-ferro fosfato e l'altra con cobaltite di litio).

L'obiettivo finale dell'attività è stato raggiunto con il completamento delle attività sperimentali sulle fasi più critiche dei due processi analizzati e la progettazione preliminare dei due processi di recupero.

c.1 Recupero di componenti da batterie al litio-ione esauste con cobaltite di litio: processo eco-sostenibile e innovativo

L'attività è stata rivolta al completamento dello studio di un processo a basso impatto ambientale e consumo energetico, per il recupero di materiali da batterie al litio secondarie esauste (materiale catodico e anodico, legante, elettrolita, supporti metallici e polimerici), separandoli direttamente o dopo semplici processi di pre-trattamento, recuperati per una seconda vita senza la produzione di scorie ed emissioni dannose per l'ambiente.

In questa annualità, si è cercato di sviluppare lo scale-up del processo di separazione chimica mediante la miscela formulata, ottimizzando i diversi parametri (tempo, temperatura), insieme allo sviluppo di metodologie di purificazione dei materiali attivi recuperati sia con metodo sia fisico che chimico per l'ottenimento di un prodotto privo del legante polimerico (PVDF). Era prevista inoltre la realizzazione di un progetto di massima di un impianto pilota dell'intero processo.

I prodotti del processo di separazione sono stati sottoposti a caratterizzazione chimico-fisica completa e indicativa dei materiali recuperati con le diverse tecniche (TG/DTA, FT-IR, raggi X, e SEM), per verificarne l'effettiva utilizzabilità in nuove celle. Infine è stato condotto uno studio preliminare del processo industriale derivante dagli studi finora condotti.

Processo eco-sostenibile e innovativo di recupero celle al litio-ione

L'ENEA ha proseguito la progettazione e lo sviluppo di un processo eco-sostenibile di recupero diretto di materiali da batterie al litio ione esauste [rapporti RdS/PAR2014/184 e RdS/PAR2014/185].

Con l'obiettivo di sviluppare un tale processo, nel corso della ricerca effettuata nei due anni precedenti, è stato proposto uno schema di processo in cui i principali componenti delle batterie litio sono separati e direttamente recuperati. Il cuore del processo di recupero diretto è l'operazione di separazione di tutti i componenti principali dei nastri catodici e anodici che sono costituiti da: materiale catodico/anodico, del legante e dai collettori metallici Al/Cu e dal separatore polimerico. L'operazione di separazione è stata sviluppata utilizzando sia un processo chimico di solvatazione del legante PVDF con una miscela di solventi eco-sostenibili appositamente formulata sia un processo fisico con l'utilizzo di ultrasuoni.

L'operazione di separazione è la parte più rilevante e consistente del processo eco-sostenibile per il recupero non distruttivo dei materiali; da essa può dipendere la quantità, la purezza e la struttura del materiale recuperato. A tale proposito sono state ottimizzate le procedure per lo smantellamento delle batterie verificando e analizzando sperimentalmente in laboratorio le seguenti fasi unitarie: a) scarica completa della batteria commerciale tipo Sony 18650; b) apertura della batteria in sicurezza; c) smontaggio della batteria per la separazione meccanica dei nastri catodici/anodici e del separatore polimerico.

Inoltre, sono state affrontate le problematiche legate al distacco del materiale elettrodico dal separatore polimerico per il loro recupero, poiché non analizzate e sviluppate nel corso degli anni precedenti. L'applicazione delle metodiche chimiche e fisiche già utilizzate, per il recupero dei collettori metallici Al/Cu e delle polveri elettrodiche dai nastri catodici e anodici negli anni precedenti, ha dato scarsi risultati. Diversamente, un ottimo risultato è stato ottenuto mediante ultrasuoni utilizzando come mezzo di propagazione delle onde acustiche l'acqua distillata a temperatura ambiente.

L'attività si è quindi focalizzata sull'analisi tecnica e sull'ottimizzazione, per il trattamento di una quantità maggiore di materiale rispetto agli anni precedenti, dei parametri operativi del processo di separazione dei collettori metallici dalla polvere elettrodica per via chimica. In Figura 47 è riportato lo schema a blocchi del processo.

Lo schema del processo di recupero proposto prevede:

- una prima operazione di scarica completa della batteria.
- L'apertura della batteria che comporta una prima separazione fisica del materiale plastico e metallico dell'involucro esterno dal resto della batteria.
- il degassaggio di eventuali sostanze nocive volatili.
- il recupero dell'elettrolita mediante un'operazione di estrazione con l'anidride carbonica liquida supercritica ($ScCO_2$).
- la suddivisione dei nastri (catodico, anodico e separatore polimerico) contenuti all'interno della batteria.
- l'operazione di separazione per il recupero dei materiali utilizzando processi di sonificazione e solvatazione.

Per i dettagli sulle singole operazioni che costituiscono il processo di recupero e sulla loro messa a punto si rimanda al rapporto tecnico RdS/PAR2014/184.

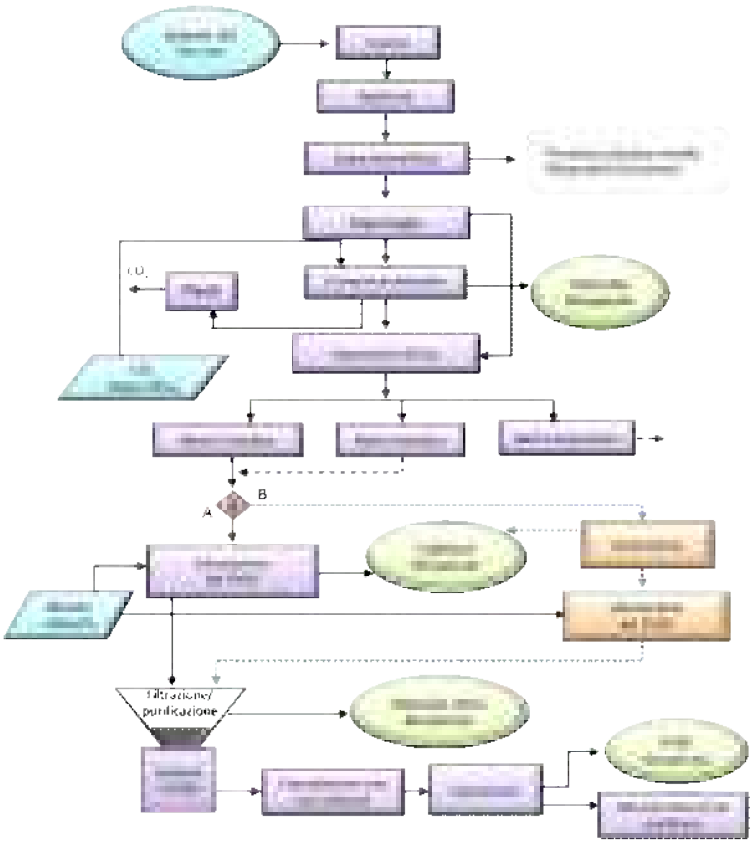


Figura 47. Schema del processo di recupero eco-sostenibile diretto di materiali da batterie al litio ione esauste

Si è poi affrontato il problema della fattibilità economica e dell'eventuale convenienza del recupero di materiali da batterie ione-litio esauste [rapporto RdS/PAR2014/185], tema che sarà di fondamentale importanza soprattutto negli anni futuri, considerando il loro crescente utilizzo nel mercato tecnologico e automobilistico.

Per quanto riguarda il processo di recupero proposto (Figura 48) in cui sono recuperati i materiali tal quali, sarebbe interessante, in un futuro in previsione di uno scale-up semi industriale, eseguire l'analisi costo-beneficio specifica per il processo.

A tale proposito, in letteratura ci sono lavori in cui sono proposti leganti che sono solubili in acqua in questo modo, tutto il processo di recupero proposto potrebbe usare come solvente solo acqua distillata con indubbi vantaggi economici e di sostenibilità ambientale.

Lo studio preliminare del un processo di recupero di materiali da batterie al litio ione a fine vita proposto (Figura 48), prevede una prima serie di operazioni alcune delle quali comuni a molti processi di recupero**.** Il processo recupera i seguenti materiali:

- rivestimento esterno plastico
- rivestimento esterno in alluminio
- "Elettrolita"
- collettore catodico in alluminio
- collettore anodico in rame
- materiale attivo catodico
- materiale attivo anodico

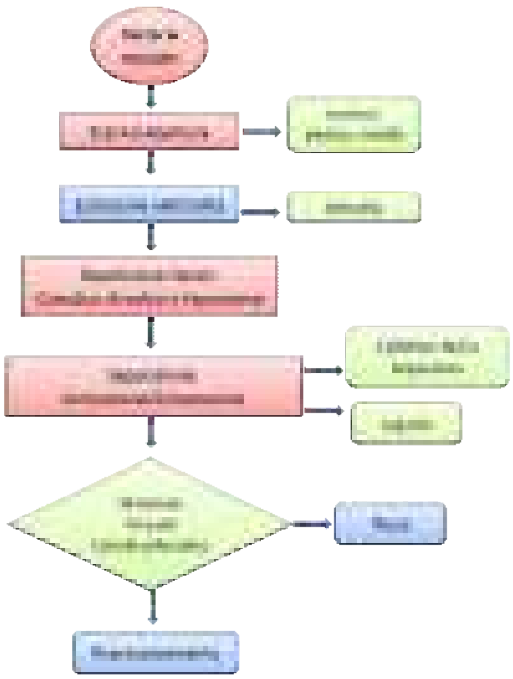


Figura 48. Schema a blocchi del processo di recupero

- separatore
- legante PVDF.

È stata anche effettuata una stima della fattibilità economica del processo in sintonia con le regole dettate dalla Green Chemistry e dall'Unione Europea. Tuttavia, è importante sottolineare l'elevata incertezza sull'andamento dei prezzi delle materie prime e soprattutto del litio e del cobalto.

In questo contesto, anche la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie di accumulatori possono giocare un ruolo fondamentale nello spostare la convenienza di un processo di recupero l'uno rispetto ad un altro.

In accordo con la maggior parte delle pubblicazioni scientifiche, si ritiene che la tecnologia Li-ione, soprattutto quella che utilizza come materiale attivo catodico la cobaltite di litio, sia la candidata favorita per l'accumulo di energia non solo per i dispositivi elettronici ma anche per i veicoli elettrici. Questi ultimi, rappresentano il traino per lo sviluppo di un'economia basata sulla produzione, utilizzo e riciclo di questo tipo di batterie avvalorando processi di recupero eco-sostenibili di materiali.

Una visione generale e incoraggiante sulla fattibilità di un processo eco-sostenibile di recupero completo è offerta dalla analisti SWOT illustrata nello schema riportato in Figura 49.

	Helpful	*Harmful*
Internal Origin	Strengths ✓Recupero completo di tutti i componenti ✓Recupero materiali non Rinnovabili ✓Know How a livello tecnologico importante ✓Evitati costi di stoccaggio EOL Battery ✓Nullo l'impatto ambientale	Weaknesses ✓Minor convenienza economica rispetto ad altre soluzioni meno Sostenibili ✓Tecnologia non matura
External Origin	*Opportunities* ✓Politiche europee a sostegno ✓Approvvigionamento materie prime non disponibili sul territorio ✓Poca e non organizzata concorrenza ✓Creazione di posti di lavoro ✓Aumento del mercato delle macchine elettriche	*Threats* ✓Costo materie prime in calo ✓Introduzione di nuove tecnologie di accumulo più economiche ✓Mercato delle materie prime fortemente instabile

Figura 49. Analisi SWOT del processo di recupero eco sostenibile

I punti di forza sono notevoli e importanti, l'approvvigionamento di materie prime da riciclo efficiente di batterie a fine vita tutelerebbe un territorio come quello italiano, povero di risorse strategiche in previsione di scenari sfavorevoli di mercato estero.

Un'opportunità da cogliere è offerta dalle politiche europee a sostegno delle "buone prassi" per il processo eco-sostenibile che andrebbe a colmare l'eventuale punto di debolezza della minor convenienza economica di questo processo rispetto ad altri meno efficienti in termini di recupero totale dei materiali e di sostenibilità ambientale.

Al momento una stima quantitativa puntuale e precisa di questi processi non è possibile e forse anche prematura. Incrociando alcuni studi in letteratura con i nostri dati da laboratorio si possono giungere ad alcune considerazioni qualitative.

In particolare uno studio americano[4] propone un'analisi costo/beneficio del riciclaggio totale di batterie a fine vita di veicoli elettrici, mostrando un prospetto a 5 anni.

Un'ipotesi credibile sarebbe quella in cui non si considerano le voci di costo riguardante il trasporto e l'accettazione delle batterie esauste verso il centro di riciclaggio poiché andrebbero a elidersi con i costi che comunque si avrebbero anche nello scenario dello stoccaggio delle batterie secondarie al litio.

In tabella 12 è riportata l'analisi effettuata partendo dai dati di letteratura.

[4] M. Foster, P. Isely, C.R. Standridge, M.M. Hasan, "Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries", Journal of Industrial Engineering and Management, 7(3), 698-715, 2014.

Tabella 12. Stima analisi costi-benefici per lo scenario di recupero di batterie Li-ione esauste per veicoli elettrici Chevrolet (in dollari)

Analisi costi benefici riciclo		2012	2013	2014	2015	2016	Totale
Costi	Costi operativi	783.20	806.40	830.40	856.00	881.60	4156.80
	Manodopera /R&D	195.80	201.60	207.60	214.00	220.40	1039.20
	Totale Costi	**979.00**	**1008.00**	**1038.00**	**1070.00**	**1102.00**	**5196.00**
Benefici	Evitato stoccaggio	605	623	642	661	681	3212
	Cobalto	185	190	196	202	208	980
	Sali di litio	118	122	126	129	133	629
	Alluminio	118	122	125	129	133	626
	Altri materiali	120	124	127	131	135	637
	Totale benefici	**1146**	**1181**	**1216**	**1252**	**1290**	**6084**
Convenienza economica (costi-benefici)		**-167.00**	**-173.00**	**-178.00**	**-182.00**	**-188.00**	**- 888.00**

Considerando lo studio preso come riferimento e l'ipotesi introdotta di non considerare i costi di trasporto e ricezione delle batterie esauste, dalla Tabella 12 può notare una convenienza piena minima di circa 167 $ per ogni batteria processata rispetto allo scenario di non riciclaggio.

In conclusione, per quanto riguarda il processo di recupero proposto dall'ENEA, il vantaggio potrebbe essere ancora maggiore poiché il recupero di materiale tal quale potrebbe ridurre i costi di fabbricazione del materiale catodico e anodico.

Per quanto riguarda il processo di recupero proposto in cui sono recuperati i materiali tal quali, sarebbe interessante, in un futuro in previsione di uno scale-up semi industriale, eseguire l'analisi costo-beneficio specifica per il processo sviluppato per capire quantitativamente anche l'efficacia economica.

Comunque, qualche considerazione qualitativa importante può essere presa. I consumi elettrici sono relativamente bassi poiché le apparecchiature durante tutto il processo, in accordo con le linee guida dettate dalla "green chemistry" lavorano a basse temperature (max 115 °C), favorendo un'alimentazione esclusiva da fonti rinnovabili. L'utilizzo del solvente eco-sostenibile è una voce di costo importante ma si è stimato mediamente un recupero del 90% dello stesso.

c.2 Sviluppo di un processo per il recupero di materiali di elevato valore aggiunto da batterie al litio-ione esauste con litio-ferro fosfato tramite processi idrometallurgici

La sperimentazione, intrapresa nel corso del precedente anno, per il recupero dei materiali da batterie al litio esauste, è proseguita con l'ottimizzazione del processo idrometallurgico studiato. L'attività prevedeva le seguenti azioni:

- ottimizzazione del processo idrometallurgico individuato per il recupero dei materiali di interesse attraverso l'analisi di diverse tecniche di lisciviazione e di separazione chimica con particolare riguardo alla precipitazione;
- sperimentazione sistematica in scala laboratorio delle diverse fasi del processo che seguono la lisciviazione acida, già messa a punto nel corso della precedente annualità, su soluzioni simulate di materiale catodico;
- sperimentazione del processo in scala da laboratorio a partire da batterie litio ferro fosfato (LFP) esauste seguendo un approccio prodotto-centrico che mira al recupero di tutti i materiali che compongono la batteria. Partire dalla batteria esausta rende necessario aggiungere al processo e quindi studiare in modo sistematico, anche le fasi di pretrattamento meccanico che sono finalizzate al successivo processo di recupero idro-metallurgico.

Era prevista la definizione di un processo in scala laboratorio con l'ipotesi preliminare di impianto dimostrativo.

Pre-trattamento celle al litio-ione

L'Università Sapienza di Roma ha effettuato un approfondito studio della procedura di pre-trattamento in scala di laboratorio delle batterie litio-ione, in particolare di batterie al Litio-Ferro-Fosfato ($LiFePO_4$), ai fini del recupero del litio e di altri materiali.
Le attività svolte hanno consentito la separazione del nastro anodico e catodico, del materiale catodico per l'estrazione del litio, dei collettori in Cu e Al, nonché degli altri materiali componenti le batterie in esame, per

l'applicazione del successivo processo di recupero.

È stato innanzitutto esaminato lo stato dell'arte dei processi di pre-trattamento delle batterie al $LiFePO_4$, ai fini del recupero del litio e degli altri componenti. In particolare, sono state analizzate le tecnologie attualmente disponibili alla scala sperimentale, al fine di identificare buone prassi basate sull'innovazione di metodologie e processi di trattamento e valorizzazione. Successivamente si è proceduto all'identificazione della tipologia di batteria da trattare, mediante ricognizione presso produttori/assemblatori presenti sul territorio nazionale e della disponibilità di campioni in numero sufficiente ad eseguire le attività di pre-trattamento previste. Grazie alla disponibilità della *International Battery Company* Srl sono state reperite un numero sufficiente di batterie $LiFePO_4$ per poter effettuare le necessarie prove di laboratorio, ovvero:

- verifica dello stato di carica residua delle batterie da trattare ed eventuale operazione di scarica: tale operazione si rende necessaria per operare in sicurezza;
- apertura in sicurezza della batteria, mediante individuazione della più appropriata modalità di apertura ai fini delle successive operazioni di separazione degli involucri ed estrazione del materiale anodico e catodico;
- separazione dell'elettrolita ed estrazione del materiale anodico e catodico mediante procedure manuali in condizioni di sicurezza;
- caratterizzazione dei componenti mediante analisi fisiche e chimiche ai fini di identificare componenti di valore e le possibilità di recupero.

Per la tutela della salute e della sicurezza degli operatori, nello svolgimento delle attività sono state prese in considerazione le regolamentazioni nazionali vigenti, sia a scala industriale che di laboratorio (D.Lgs. 81/08). Nel primo caso deve essere presa in considerazione la normativa nazionale sulla prevenzione del rischio di incidenti rilevanti (D.Lgs. 334/1999 come modificato dal D.Lgs. 238/2005) e le norme di prevenzione di emissioni atmosferiche-suolo-acque dannose per l'uomo e l'ambiente (Testo unico ambientale: D.Lgs. 152/06 come aggiornato dal D.Lgs. 36/2010). Tali norme prescrivono la prevenzione attraverso l'identificazione dei pericoli e la valutazione dei rischi del processo produttivo, ovvero di ogni singola fase, per poi contenere il rischio mediante informazione e formazione, procedure di lavoro, l'uso di dispositivi di protezione collettiva e, infine, l'uso di dispositivi di protezione individuale. Pertanto, nella descrizione della procedura sono state messe in evidenzia le azioni potenzialmente pericolose, con le relative azioni di prevenzione.

Prima di definire la procedura di apertura delle batterie esauste, occorre valutare eventuali anomalie che possono essere intervenute nel corso del ciclo di vita della batteria stessa. In particolare, le seguenti condizioni potrebbero aumentare il rischio di incendio ed esplosione durante la manipolazione della batteria:

- presenza di impurezze;
- carica al di sopra della tensione massima indicata dal costruttore (overcharging);
- scarica al di sotto della tensione minima indicata dal costruttore (overdischarging);
- corto circuito,
- manipolazione meccanica (abuso meccanico);
- utilizzo o stoccaggio in condizioni di temperatura al di fuori degli intervalli indicati dal costruttore (abuso termico).

Informazioni dettagliate sulle varie fasi della procedura messa a punto per l'apertura e disassemblaggio della batteria sono contenute nel rapporto RdS/PAR2014/187.

Sui componenti ottenuti dalla batteria, sono state effettuate analisi volte ad individuare i bilanci di massa complessivi, per tutte i componenti presenti, nell'ottica di un recupero focalizzato sull'intero prodotto e non su specifici costituenti. Dai risultati ottenuti, si evincono le percentuali di composizione di tutti i costituenti di maggior interesse, quali il $LiFePO_4$ (14,50%), alluminio (5,42%) e rame 12,64%). Tuttavia si richiama l'attenzione anche su altri costituenti (31,13% di polimeri, 29,79% di altri materiali e 6,47% materiali composti): su queste frazioni si ritiene opportuno approfondire la composizione specifica (tipologia di polimero e/o di materiale) per poter individuare la più corretta opzione di gestione (recupero o smaltimento).

Di particolare interesse è risultato il processo di estrazione del litio, per cui sono stati testati due trattamenti: (i) un trattamento ad ultrasuoni con soluzione TISAB II[5]; (ii) un trattamento mediante l'utilizzo di $K_2S_2O_8$. Il primo si è dimostrato non sufficientemente efficace, avendo estratto solo il 16% del litio totale presente. Risultati più interessanti emergono, invece, con il secondo trattamento che, in particolari condizioni sperimentali, ha consentito l'estrazione del 100% del litio in forma ionica (non come $LiFePO_4$). Ulteriori prove sperimentali dovranno essere realizzate per lo studio delle migliori condizioni di estrazione per ottimizzare le quantità di reattivi da impiegare e per diminuire la concentrazione di alluminio che potrebbe potenzialmente interferire nei successivi

[5] Composizione TISAB II: acqua 83,7%, cloruro di sodio 5,8%. acido acetico 5,7%, sodio idrossido 4,4, CDTA 0,4%

processi di recupero del litio dalla soluzione.

Processo di recupero idrometallurgico di celle al litio-ione

Le attività sperimentali, svolte da ENEA, hanno riguardato la progettazione e lo sviluppo di processi ecosostenibili per il recupero di materiali da batterie litio ione [rapporti RdS/PAR2014/186 e RdS/PAR2014/188].

In generale con riferimento ai sistemi avanzati di accumulo di energia occorre tenere presente e valutare tutto il ciclo, fino a fine vita di tali dispositivi dove è auspicabile il recupero dei suoi componenti e/o materiali in alternativa al loro smaltimento come rifiuti. Questa soluzione risulta in accordo sia con considerazioni di efficienza delle risorse, una delle sette iniziative prioritarie della strategia decennale Europa 2020, sia per motivazioni di sicurezza e impatto ambientale, particolarmente rilevanti a causa della particolare composizione chimica delle batterie litio-ione che una volta esauste diventano rifiuti pericolosi.

La sperimentazione, già intrapresa nel corso della precedente annualità, per il recupero dei materiali da batterie al litio esauste del tipo LFP (materiale catodico $LiFePO_4$), è proseguita con l'ottimizzazione del processo idrometallurgico proposto, attraverso le seguenti attività:

- ottimizzazione del processo idrometallurgico individuato per il recupero dei materiali di interesse mediante l'analisi di diverse tecniche di lisciviazione e di separazione chimica con particolare riguardo alla precipitazione;
- sperimentazione sistematica in scala laboratorio delle diverse fasi del processo che seguono la lisciviazione acida, messa a punto in precedenza, ma ulteriormente ottimizzata, su soluzioni simulate di materiale catodico; in particolare sono state investigate le seguenti operazioni unitarie:
  - separazione per precipitazione del ferro in soluzione come idrossido ferrico;
  - recupero per precipitazione del litio come carbonato e fosfato;
  - separazione per filtrazione condotta in diversi modi (gravità, pressione ridotta, su carta o membrana filtrante;
  - purificazione del precipitato.

La sperimentazione del processo proposto è stata condotta in scala da laboratorio a partire da materiale catodico $LiFePO_4$ commerciale con rese in litio di circa il 96%.

Il processo di recupero si basa su un approccio prodotto-centrico in cui il rifiuto è considerato nella sua interezza; in generale, in questo modo tramite un processo idrometallurgico, preceduto da una fase di pretrattamento opportuna (Figura 50), si garantisce il massimo recupero di metalli, plastiche e altre materie prime dalle batterie e dai flussi di rifiuti in genere; si supera così il tipico processo di tipo metallo-centrico dove si punta al solo recupero dei metalli strategici e nella fattispecie delle batterie al cobalto e nichel principalmente, trascurando tutto i resto, litio compreso. L'obiettivo ultimo è quello della chiusura dei cicli e minimizzazione della produzione dei rifiuti, cosa che può rendere le soluzioni tecniche di trattamento fattibili non solo dal punto di vista dell'impatto ambientale, ma anche in termini economici.

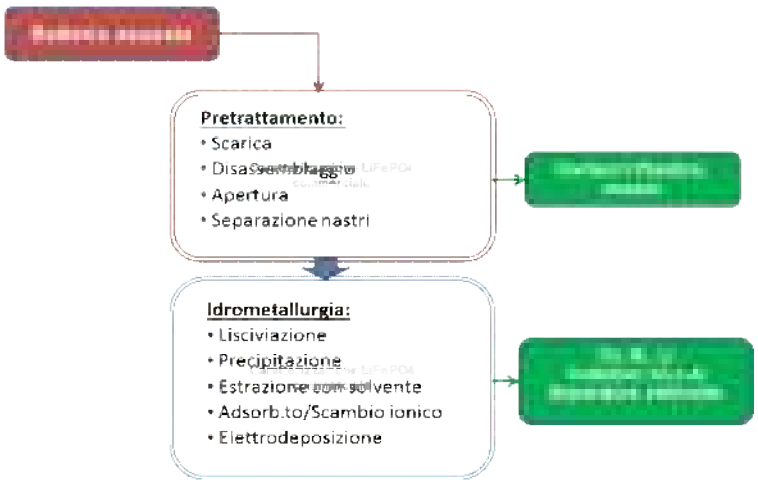


Figura 50. Schema di trattamento delle batterie litio-ione di tipo prodotto-centrico

La Figura 51 descrive il processo idrometallurgico sviluppato, dove il termine "idrometallurgia" comprende l'insieme delle tecniche chimiche e chimico-fisiche di trattamento in fase liquida di residui provenienti da lavorazioni industriali o di reflui di varia natura, mirate al recupero dei metalli in essi presenti.

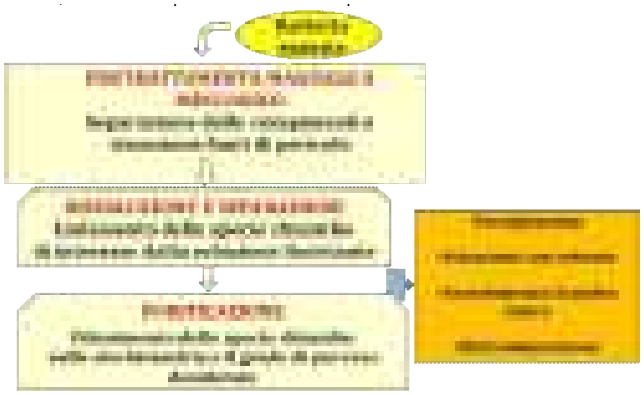


Figura 51. Processo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie esauste o in generale da RAEE

Il processo proposto per il recupero del materiale catodico di batterie LFP, illustrato nella Figura 52, deve essere ovviamente preceduto da un pretrattamento che riesca a separare dal resto la polvere catodica; tipicamente si procede operando innanzitutto la scarica della batteria per prevenire corto-circuito e auto-combustione; quindi, le batterie devono essere sottoposte a smontaggio per ottenere la separazione dei componenti, in particolare è necessario separare i nastri catodico e anodico e operarne lo svolgimento per poter accedere alla polvere attiva che viene su di essi adesa. Tale operazioni potrà essere svolta sia con metodi fisici, per applicazioni di ultrasuoni ad esempio, sia con un processo chimico di solvatazione.

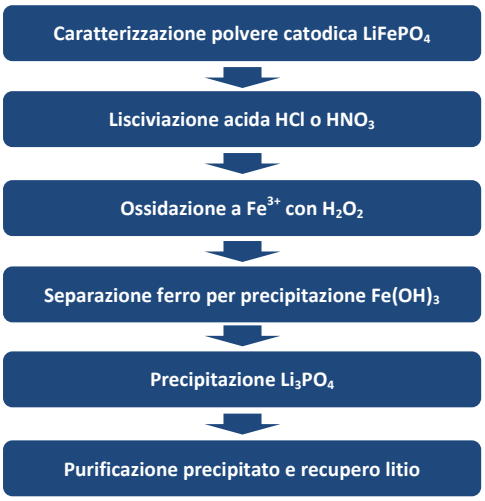


Figura 52. Proposta di processo di recupero del litio da materiale catodico da batterie LFP

Una volta ottenuta la polvere catodica si applica il processo idrometallurgico vero e proprio che parte da una lisciviazione acida, capace di portare in soluzione i metalli di interesse; questa può essere condotta sia con acido cloridrico che nitrico a seconda delle esigenze; la concentrazione ottimale dell'acido è 2 M e la reazione si protrae per circa 1 ora.

Dopo lisciviazione acida, è necessario allontanare il ferro dalla soluzione precipitandolo come idrossido; a tale scopo tale reazione deve essere preceduta dall'ossidazione del ferro a ferro III poiché in questo modo, a causa del basso prodotto di solubilità dell'idrossido ferrico si riesce a precipitare tale metallo in modo quantitativo. il litio rimasto in soluzione viene infine recuperato per precipitazione di litio fosfato, aggiungendo un eccesso di Na_2HPO_4 alla soluzione proveniente dallo step precedente opportunamente concentrata, il tutto ad una temperatura di circa 80 °C; si recupera così più del 95% del litio inizialmente presente nella polvere catodica, tale precipitato mostra generalmente elevata purezza.

In Figura 53 è rappresentato un tipico schema di processo generalmente adottato in idrometallurgia per il recupero di materiali da batterie al litio esauste. Inizialmente le batterie esauste devono essere sottoposte a

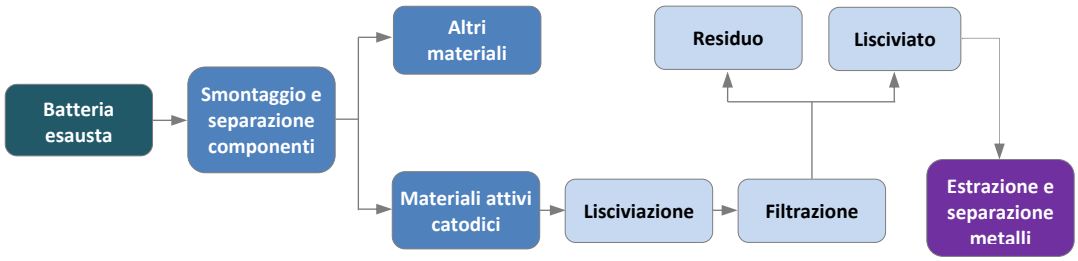


Figura 53. Flow-sheet generale di un processo di recupero idrometallurgico applicato alle batterie litio-ione

qualche tipo di trattamento fisico, di tipo meccanico o manuale che attraverso più passaggi di smontaggio e apertura riescano a separare il materiale catodico dal resto; tale materiale, che vede la presenza dei componenti a più alto valore aggiunto, viene quindi avviato al processo di recupero chimico, dove si separano e quindi purificano i metalli di interesse.

Per quanto concerne il pretrattamento iniziale, estrema cautela deve essere usata qualora le batterie vengano disassemblate manualmente, per la sicurezza degli operatori; infatti, tutte le celle che presentano una potenza residua devono essere scaricate a valori prossimi allo zero, perché quando la cella è ancora attiva l'operazione di apertura può indurre un incontrollato rilascio di energia chimica con fenomeni di corto-circuito e autocombustione.

Per consentire il recupero del materiale catodico $LiFePO_4$ adeso sul collettore e quindi realizzare l'estrazione del litio presente, si è adottato come primo metodo, un trattamento a umido coadiuvato da ultrasuoni.

Tale operazione, messa a punto in collaborazione con l'Università Sapienza di Roma, ha portato a sviluppare un metodo fisico che prevede l'applicazione al nastro catodico di ultrasuoni in soluzione TISAB; questa ha lo scopo di mantenere in soluzione gli ioni F^-, prevenendo così la formazione di acido fluoridrico. Risultato di tale tecnica è l'ottenimento di una soluzione che contiene il $LiFePO_4$ solubilizzato, che può essere sottoposta al successivo processo di tipo idrometallurgico. Il metodo, come accennato in precedenza, non ha fornito le rese sperate e si è quindi passati a sviluppare un metodo chimico di pretrattamento.

Il pretrattamento tramite lisciviazione con persolfato si è rivelato estremamente efficace in quanto non solo riesce ad estrarre tutto il litio presente come materiale catodico, ma non porta in soluzione né il ferro costituente il $LiFePO_4$, né l'alluminio che costituisce il supporto catodico. Ciò rappresenta un notevole vantaggio nel processo di recupero del litio in quanto permette di evitare lo step di precipitazione del ferro e alluminio con notevole risparmio sul consumo di composti chimici, energia, tempo e reflui e fanghi da smaltire.

Lo schema del processo è illustrato in Figura 54. Dopo aver portato in soluzione il litio, non è più necessario allontanare il ferro dalla soluzione precipitandolo come idrossido, ma si procede direttamente alla precipitazione di litio fosfato, aggiungendo un eccesso di Na_2HPO_4, a temperatura di circa 80°C; si recupera così più dell'80-85% del litio inizialmente presente nella soluzione proveniente dal pretrattamento e quindi dalla batteria; tale precipitato mostra generalmente elevata purezza.

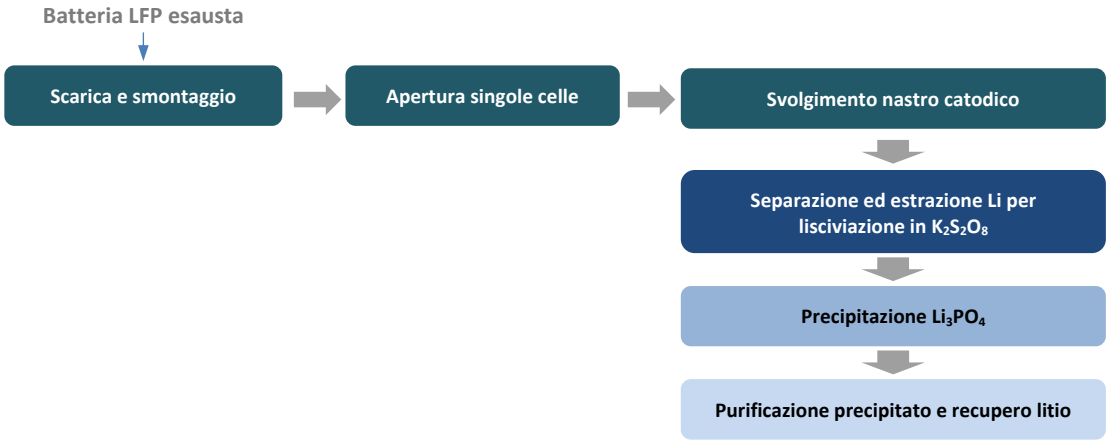


Figura 54. Proposta di processo di recupero del litio da batterie LFP esauste

Come ulteriore approfondimento è in via di definizione la sperimentazione del processo in scala pre-pilota e la progettazione di un impianto pilota sulla base del processo sviluppato.

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

d.1 Partecipazione a collaborazioni internazionali

L'attività ha comportato la partecipazione attiva a diverse iniziative internazionali che sono una fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni mobili e stazionarie. La partecipazione è stata funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso. Pertanto sono continuate le attività relative alla partecipazione all'International Energy Agency (IEA) su "Energy

Conservation through Energy Storage".

Inoltre, è stata aggiornata, a seguito del cambio di natura legale della EERA, l'attività di coordinamento e partecipazione all'alleanza europea, promossa dalla CE, contribuendo in particolare al tema "Energy storage", con il coordinamento dall'ENEA nella parte relativa all'Accumulo Elettrochimico.

Da ottobre 2014 a settembre 2015 si sono avute in sintesi le seguenti collaborazioni:

1. IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia)
   - CERT
   - IA ECES (Energy Conservation through Energy Storage)
2. EERA (European Energy Research Alliance)
   - Joint Programme (JP) Energy Storage
   - JP Smart Grids
3. COST (Scientific and Technological Cooperation)
   - MP1004 "Hybrid-ES – Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications",), relativamente all'azione riguardante i sistemi di accumulo ibridi, composte da batterie e supercondensatori, che sono state completate nel 2015.

d.2 Comunicazione e diffusione dei risultati

Per quanto riguarda le attività di comunicazione, ci sono state numerose e diversificate azioni di comunicazione e diffusione dei risultati ottenuti dal progetto accumulo nella Ricerca di Sistema, che hanno riguardato:

- Organizzazione del Workshop dedicato alla Ricerca per il Sistema Elettrico "Sistemi avanzati di accumulo dell'energia", organizzato il 3 luglio 2016, presso la Sede dell'ENEA
- Contributi a pubblicazioni e studi europei ed internazionali
- Presentazioni a convegni nazionali ed internazionali,
- Pubblicazioni su riviste scientifiche.

L'ENEA ha organizzato, nell'ambito della serie di convegni dedicati alla Ricerca di Sistema, uno specifico workshop sul Progetto "Sistemi Avanzati di Accumulo dell'Energia" con la finalità di presentare i risultati delle attività di ricerca svolte nei laboratori dell'ENEA in collaborazione con istituti universitari. Tale evento ha dato spazio ad un confronto tra la ricerca e le aspettative delle realtà produttive nazionali del settore. In questo modo si è cercato di delineare un percorso virtuoso col quale la ricerca punta a promuovere l'innovazione del settore industriale. Le attività riassunte nel Workshop sono articolate sulla ricerca di nuovi materiali a basso costo ed ad alte prestazioni di sistemi di accumulo al litio e sullo studio di applicazioni significative nelle reti elettriche e di aspetti legati alla sicurezza ed al riciclo delle batterie. Inoltre è stata organizzata una Tavola rotonda con la partecipazione di aziende produttrici ed utilizzatrici di sistemi di accumulo. Al Workshop hanno partecipato circa 90 persone a cui sono state presentate le principali attività del progetto ed il punto di vista delle aziende interessate.

In conclusione, il Workshop insieme alle altre azioni (con oltre 30 pubblicazioni e presentazioni a Convegni nazionali ed internazionali) hanno permesso di confrontare e valutare il livello e la qualità delle attività svolte e dei risultati raggiunti finora, di individuare gli orientamenti e le aspettative dalle aziende produttrici (quale FIAMM) ed utilizzatrici (quali ABB-POWERONE, ENEL, TERNA), le potenzialità del mondo della ricerca nazionale e delle possibilità di coordinamento con gli altri enti interessati (CNR e RSE), per allineare e sviluppare al meglio i contenuti del progetto, anche in vista del prossimo piano triennale 2015-2017.

Le attività svolte nel quadro dell'obiettivo sono dettagliate nel rapporto RdS/PAR2014/199.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Bologna, Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician"

L'Università di Bologna ha continuato le attività, inserite nel Subtask a.1, volte a sviluppare materiali catodici per celle litio-ione ad alta energia specifica operanti con elettroliti convenzionali a base di etilene carbonato-dimetilcarbonato-$LiPF_6$ (LP30). Gli elettrodi (circa 1 cm^2 e 1 mAh/cm^2) di formulazione ottimizzata sono stati poi caratterizzati elettrochimicamente in LP30, con e senza l'uso di additivi, in semicelle da laboratorio con un contro elettrodo di litio e in configurazione di cella completa con anodi realizzati da altri Partner.
Inizialmente è stata eseguita la sintesi di $LiMnPO_4$ nanometrico ricoperto di carbone (anche in presenza di composti del vanadio) mediante tecniche sol-gel a partire da precursori solubili di elevata purezza. È stata poi

effettuata la caratterizzazione strutturale e morfologica per valutare la qualità del materiale sintetizzato, che è stato poi utilizzato per preparare elettrodi di composizione ottimizzata. Inoltre sono stati anche preparati elettrodi a base di $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ commerciale o eventualmente sintetizzato, dopo caratterizzazione strutturale e morfologica delle polveri. Poiché il bilanciamento degli elettrodi è il fattore cruciale per il buon funzionamento di una batteria litio-ione, il coordinamento tra l'unità di Bologna e l'Università di Camerino che ha preparato il materiale anodico, è stato indirizzato all'ottimizzazione della formulazione e del carico elettrodico per renderlo funzionale all'abbinamento degli elettrodi in batteria.
Inoltre l'Università di Bologna, in collaborazione con l'Università di Camerino, ha prodotto e caratterizzato celle litio-ione in scala di laboratorio, a elevata energia specifica, secondo un protocollo concordato con ENEA.

Università di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie

L'Università di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie, ha svolto le attività, inserite nel Subtask a.1, riguardanti la preparazione e caratterizzazione preliminare di materiali nano-compositi Sn/grafene e Si/grafene per sistemi litio-ione da 1 Ah. I materiali sono stati forniti all'Università di Bologna ed all'ENEA in quantità tali da consentire la realizzazione di celle complete e piccoli sistemi (stack) da caratterizzare.

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

Le attività del Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria, che si inseriscono nei Subtask a.1 e a.2, hanno riguardato lo studio e la produzione di materiali anodici a base di ossido di titanio (TiO_2).
Il lavoro è stato strutturato nelle seguenti fasi:

- *Sintesi e caratterizzazione dei materiali anodici*. È stata eseguita la sintesi di TiO_2 con morfologia nanotubica mediante anodizzazione del Ti metallico, con successiva cristallizzazione in forma anatase e asportazione finale della polvere. Il TiO_2 prodotto in "batch" ha subìto caratterizzazione strutturale mediante diffrattometria a raggi X e morfologica mediante analisi SEM, per verificare la costanza dei parametri strutturali dell'anatase e le dimensioni dei nanotubi dei vari "batch" di materiale. Le prestazioni elettrochimiche degli elettrodi anodici sono state valutate in termini di capacità specifica di scarica a 4 diverse C-rate (da C/10 a 1C) mediante cariche galvanostatiche-potenziostatiche, oppure unicamente galvanostatiche, ripetendo alcuni cicli ad ogni C-rate
- *Preparazione e prova di celle/stack completi*. L'Università Sapienza di Roma ha collaborato con l'ENEA alla realizzazione di celle complete (piccoli sistemi fino a circa 1 Ah) di due diverse tipologie (di alta energia e di alta potenza), con particolare attenzione a quelli di alta potenza in cui è previsto l'utilizzo dei nanotubi di TiO_2. Inoltre ha partecipato alle attività sperimentali di caratterizzazione di componenti e celle/sistemi realizzati.

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

L'Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC), ha collaborato con l'ENEA, nel Subtask b.1. DESTEC ha concentrato le sue attività sulla variazione del dimensionamento di un sistema di accumulo per il recupero energetico in frenatura installato nelle sottostazioni di alimentazione della tranvia leggera di Bergamo, in presenza di impianti fotovoltaici installati nelle sottostazioni per integrare l'alimentazione elettrica con fonte rinnovabile.
Le attività prevedevano l'aggiornamento dello strumento di simulazione del sistema tramvia per la modellazione delle nuove configurazioni e la valutazione dei flussi di energia sul sistema, confrontandoli con quanto ottenuto nelle analisi precedenti. Il lavoro si articolato nelle seguenti fasi:

- modellazione, sulla base dell'atlante dell'insolazione, della radiazione e quindi della produzione di potenza elettrica in periodi tipici dell'anno.
- affinamento del modello degli assorbimenti della tramvia, sulla base delle registrazione storiche dell'ultimo anno rilevabili con la strumentazione in campo installata e modifica del programma di simulazione tenendo conto anche dell'apporto degli impianti fotovoltaici.
- dimensionamento e ottimazione del numero di sistemi di accumulo da installare nelle sottostazioni. Identificazione dei cicli tipici di sollecitazione degli accumulatori.
- validazione sperimentale in relazione ai cicli corrente-tempo derivanti dal nuovo assetto del sistema, con particolare attenzione alla stima della vita utile del sistema di accumulo, con l'esecuzione di prove di celle al litio ad alta potenza, sotto le citate condizioni di impiego.

L'attività di sperimentazione in laboratorio ed analisi dei risultati è stata svolta congiuntamente presso le strutture dell'Università di Pisa e di ENEA.

Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Le attività del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Roma "Tor Vergata", svolte all'interno del Subtask b.1, hanno riguardato lo sviluppo di modelli di simulazione di celle litio-ione e l'esecuzione di verifiche sperimentali a supporto delle attività di "second life"" e di studio dell'invecchiamento mediante procedure di vita accelerata, utilizzando anche dati sperimentali forniti dall'ENEA.

Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente

Le attività svolte dall'Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente (DICMA), nel quadro del Subtask c.2, hanno riguardato lo studio della fase di pre-trattamento delle batterie al litio-ferro-fosfato ($LiFePO_4$) ai fini del recupero del litio e di altri materiali alla fine della vita operativa.

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

Il progetto è finalizzato allo sviluppo di sistemi per produrre elettricità da biomasse non destinate ad uso alimentare, costituite in gran parte da residui e reflui di produzioni agricole, allevamenti zootecnici, lavorazioni agroindustriali e dalla frazione organica dei rifiuti urbani disponibili nell'ambito "locale", in particolare mediante la loro conversione in biocombustibili gassosi in impianti di taglia medio-piccola distribuiti sul territorio. La produzione di biocombustibili gassosi può essere realizzata mediante la digestione anaerobica (DA) delle biomasse fermentescibili per la produzione di biogas, mentre per quelle lignocellulosiche si può utilizzare la gassificazione, per ottenere il cosiddetto syngas.

Sia il biogas che il syngas possono essere utilizzati non solo presso i siti di produzione, ma anche, dopo adeguato trattamento (il cosiddetto "upgrading") che ne consenta l'immissione nelle esistenti reti di distribuzione del gas naturale o in serbatoi di stoccaggio, usati per alimentare sistemi cogenerativi delocalizzati, sulla base delle effettive esigenze energetiche delle utenze finali.

Questo richiede da un lato l'ottimizzazione dei processi di conversione per una più ampia gamma di biomasse in biocombustibili gassosi e per aumentare la resa e la quota di metano prodotta, dall'altro lo sviluppo di sistemi di clean up ed upgrading che consentano di ottenere il gas della qualità necessaria e di minimizzare le emissioni nocive per la salute e per l'ambiente, oltre a poter disporre di impianti affidabili e di più facile gestione.

Di conseguenza, i processi di DA e le successive fasi di clean up e di upgrading del biogas sono oggetto di crescente attenzione per i vantaggi che una loro più ampia diffusione potrebbe ottenere come soluzione integrativa per incrementare il reddito derivante dalle attività del settore imprenditoriale agricolo ed agroindustriale, e per contribuire al raggiungimento degli obiettivi sull'impiego delle fonti rinnovabili, la diminuzione delle emissioni dei gas climalteranti e della dipendenza dai combustibili fossili. In questa direzione vanno le attività di ricerca e sviluppo nel campo della microbiologia per lo studio di sistemi di DA ottimizzati in termini di resa di biogas, presenza di inquinanti, utilizzo di nuove possibili miscele in co-digestione.

La presenza di contaminanti è critica sia per l'immissione in rete che per l'utilizzo del biogas in sistemi di cogenerazione, per cui vengono studiate metodologie innovative che inibiscono la formazione di acido solfidrico e metodi di abbattimento chimico-fisico o biologici, senza effetti negativi sulla concentrazione di metano.

Per quanto riguarda invece la produzione di syngas, il quadro si differenzia notevolmente passando dal processo che utilizza acqua supercritica, che è a livello di prove sperimentali di verifica a scala banco, ai sistemi di gassificazione "a secco", finalizzati alla produzione di syngas ricchi in metano (bio-SNG), in grado di definire operatività e prestazioni con sistemi ingegnerizzati di diversa taglia e tipologia.

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

Per lo sviluppo di caldaie a sali fusi, ne esistono alcuni sistemi applicati in settori di nicchia dell'industria chimica e sono stati effettuati studi sul possibile utilizzo di questo vettore energetico in caldaie a combustibile fossile in associazione con sistemi di riscaldamento solare ad alta temperatura per impianti di produzione di energia elettrica di grande potenza mediante cicli combinati. Non sono invece note attività di ricerca riguardanti combustori a biomassa con caldaie a sali fusi, né sui relativi sistemi di conversione, soprattutto in una fascia di potenza compatibile con la generazione elettrica distribuita

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività ENEA sulla valorizzazione energetica delle biomasse per il triennio 2012-2014 della Ricerca di Sistema Elettrico hanno avuto come principali obiettivi:

1. la messa a punto e la dimostrazione su scala pilota di sistemi innovativi per la produzione di biogas o syngas, da utilizzare per la co-generazione di elettricità e calore in impianti decentralizzati di piccola-media taglia o per l'immissione come biometano nella rete nazionale di distribuzione del gas;
2. lo studio e lo sviluppo di sistemi di cogenerazione ad elevato rendimento basati sull'impiego di sali fusi come vettori energetici;
3. la realizzazione e la sperimentazione di dispositivi innovativi - nello specifico sistemi di abbattimento basati su processi catalitici - in grado di ridurre i livelli di emissioni gassose di particolati fini e di altri inquinanti organici prodotte da impianti di combustione di piccola-media taglia.

L'ottimizzazione dei sistemi di produzione è stata perseguita mediante lo studio e lo sviluppo di processi che consentono di ampliare la tipologia di biomasse utilizzabili. In particolare, le attività hanno riguardato la:

1. produzione di biogas da biomasse lignocellulosiche e chitinose, con la sperimentazione in laboratorio dell'idrolisi con funghi anaerobici ruminali e batteri isolati precedentemente, e da altri substrati difficilmente digeribili da parte della flora microbica presente negli impianti di produzione del biogas, come le acque di vegetazione della molitura delle olive;
2. produzione di microalghe, aumentando la capacità dei sistemi di coltura basati sull'uso di nutrienti presenti nel digestato liquido prodotto dall'impianto di digestione anaerobica, con conseguenti test di producibilità di biogas;
3. sperimentazione in impianto pilota di processi di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di particolari tipologie di biomasse ad elevato tenore di umidità (digestato, biomassa algale, fanghi di depurazione, ecc.).

Il tema della produzione di biometano di qualità adatta all'immissione in rete è stato affrontato approfondendo lo studio e lo sviluppo dei processi di eliminazione dei contaminanti presenti nel biogas o nel syngas e di rimozione della CO_2 (fuel upgrading), sia dal punto di vista quantitativo che della selettività. In particolare, sono proseguite le sperimentazioni avviate nel corso degli anni precedenti sui processi che hanno prodotto risultati incoraggianti, quali i sistemi di separazione selettiva della CO_2 basati sull'utilizzo di ammine in soluzione organica con rigenerazione a bassa temperatura ed i processi di rimozione della CO_2 tramite formazione/dissociazione selettiva di gas idrati.

Sono state di conseguenza 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, insieme a quelle relative alla purificazione del biogas dall'H_2S con lo sviluppo e la sperimentazione su scala di laboratorio di due diversi processi di ossidazione del solfuro a zolfo elementare, il primo biologico, basato sulla fotosintesi anossigenica, che opera ad umido ed a temperatura ambiente, l'altro di tipo chimico-fisico "a secco", che utilizza nuovi catalizzatori ad ossidi metallici a temperature intorno ai 100 °C.

Analogamente, il processo di produzione di gas naturale di sintesi (BIOSNG) ottenuto dalla gassificazione di biomasse lignocellulosiche (syngas) è stato implementato utilizzando un impianto pilota di piccola taglia, in grado di operare sia in condizioni isoterme che adiabatiche, in modo da studiare la fluidodinamica del processo di metanazione e le prestazione dei relativi catalizzatori in condizioni simili a quelle di un impianto industriale.

Sono infine proseguite le attività avviate nel corso della precedente annualità finalizzate alla ricerca e sviluppo di sistemi cogenerativi innovativi di piccola-media taglia a maggior efficienza energetica con lo studio di caldaie a sali fusi ad alta temperatura e di nuovi dispositivi catalitici per la riduzione del particolato fine e degli inquinanti organici presenti nei fumi.

Oltre alle attività sopra descritte, nell'ambito del PAR 2014, facendo seguito a quanto previsto dall'Accordo MiSE/Regione Autonoma Sardegna/ENEA/Sotacarbo, sono state effettuate anche attività di sviluppo di tecnologie innovative per la co-gassificazione di biomasse e carbone, utilizzando in parte un impianto di gassificazione up-draft da 5 MWt della Sotacarbo S.p.A., con ENEA che collabora con quest'ultima per le modifiche all'impianto necessarie per utilizzare biomassa e la definizione delle condizioni operative migliori per la co-gassificazione.

Le attività ENEA previste nella presente annualità sono suddivise in due specifiche parti:

1. **Parte A**, relativa alle attività ENEA vere e proprie, previste in sede di pianificazione per il triennio 2012-2014 e per la maggior parte prosecuzione e implementazione di ricerche avviate nelle annualità precedenti;
2. **Parte B**, relativa alle attività svolte nell'ambito dell'Accordo MSE/RAS/ENEA/Sotacarbo per lo sviluppo del Polo Tecnologico del Sulcis.

Le attività ENEA relative alla Parte A si articolano in tre diverse linee di ricerca ed una linea specifica per le attività di comunicazione e diffusione dei risultati, supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali, come riportato nel

seguito:

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

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

PARTE A. ATTIVITÀ ENEA

a. Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili

Le attività svolte da ENEA in questo obiettivo hanno riguardato in particolare:

- la sperimentazione dell'idrolisi di substrati lignocellulosici e/o ad alto contenuto in chitina (quali i residui dalla lavorazione dei crostacei) con l'impiego di funghi anaerobici ruminali e batteri isolati nel corso delle annualità precedenti, per incrementarne la produzione di metano nel successivo processo di digestione anaerobica;
- la sperimentazione di processi innovativi per la produzione di biogas da substrati difficilmente degradabili, come le acque di vegetazione della molitura delle olive;
- l'ottimizzazione su impianto pilota di un processo bistadio per l'incremento della produzione di metano dalla digestione anaerobica di reflui dell'industria lattiero-casearia;
- la produzione di microalghe, sia in bioreattori di laboratorio che in vasche aperte, per determinarne la produzione di metano in termini di mL_{CH4}/g_{VS} e valutare la fattibilità tecnico-economica dell'impego del digestato liquido come fonte di nutrienti per la crescita delle colture;
- l'ottimizzazione, mediante sperimentazione su un impianto pilota di piccola taglia, del processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche (SCW) di biomasse ad elevato contenuto idrico per la produzione di un syngas con caratteristiche chimico-fisiche tali da renderlo idoneo per applicazioni energetiche.

a.1 Processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano

Studio e sviluppo di un processo fermentativo anaerobico di materiali ad alto contenuto in chitina

Le attività sperimentali di potenziamento dell'idrolisi di chitina grezza (scarti della lavorazione di gamberi) sono state svolte dall'Università della Tuscia in collaborazione con ENEA, e costituiscono il prosieguo delle attività svolte negli anni precedenti.

La chitina, un polimero della N-acetilglucosammina, è il principale componente dell'esoscheletro degli invertebrati e della parete cellulare dei funghi ed è il più abbondante biopolimero naturale dopo la cellulosa. La biodegradabilità di questo polisaccaride è piuttosto bassa e così, mentre il suo smaltimento da parte dell'industria della pesca è divenuto un problema piuttosto rilevante, parallelamente è aumentato l'interesse verso la sua trasformazione in prodotti di valore aggiunto, nonché verso la possibile valorizzazione energetica.

Nella presenta annualità sono state effettuate due diverse serie di prove sperimentali di produzione di biogas da questo substrato [rapporti RdS/PAR2014/143 e RdS/PAR2014/145] mediante processi basati rispettivamente sull'arricchimento della comunità microbica metanigena con:

- inoculo del pool batterico fermentante F210, una comunità di batteri idrogeno produttori selezionata presso i laboratori dell'ENEA;
- inoculo integrato di funghi ruminali anaerobi (ARF) più F210, al fine di potenziare ulteriormente la fase di idrolisi.

Esperimenti con inoculo del pool batterico fermentante F210

Gli esperimenti di inoculo con F210 sono stati avviati nel corso della precedente annualità sulla base di un piano sperimentale fattoriale, metodologia RMS (Response Surface Methodology), disegnato ed analizzato presso il laboratorio di Microbiologia del Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche dell'Università della Tuscia.

Il disegno sperimentale è stato realizzato sia con configurazione di processo monofase che bifase, al fine di porre in risalto la fermentazione primaria, costituita da idrolisi e acidogenesi, e la relativa produzione di idrogeno, un by-product intermedio della produzione di metano. La chitina grezza è stata utilizzata in 3 concentrazioni, rispettivamente 20, 12,5 e 5 g/L (corrispondenti a 10,8, 6,75 e 2,7 g_{VS}/L) utilizzando in alcuni casi Corn Steep Liquor (CSL) quale starter per l'attività batterica (concentrazione di 1 o 0,5 g/L).

I grafici relativi alle produzioni cumulative di metano (Figura 55) mostrano come i migliori risultati in termini di produzione cumulativa di CH_4 sono stati ottenuti con configurazione di processo monofase (oltre i 5.000 mL/L) alla maggiore concentrazione di substrato di 10,8 g_{VS}/L, con interessanti valori di concentrazione del metano nel biogas (fino a 67%).

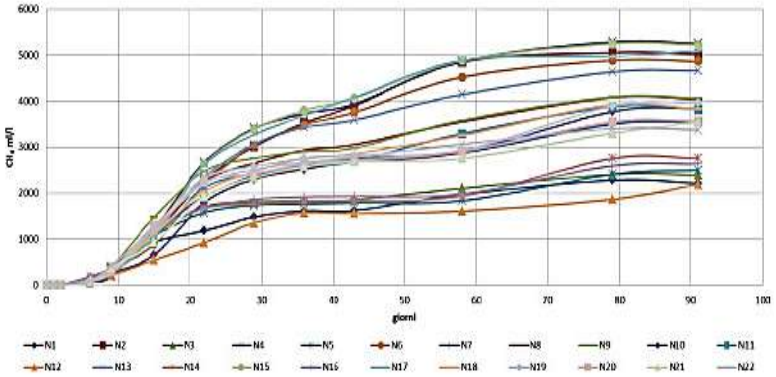


Figura 55. Produzioni cumulative di CH_4 ottenute in configurazione di processo monofase dell'esperimento disegnato tramite metodologia RMS (Response Surface Methodology)

D'altra parte, se si prendono in considerazione i valori delle rese, in termini di $mL_{CH4\ prodotto}/g_{VS}$, i migliori risultati si ottengono per le più basse concentrazioni di substrato, rispettivamente 884,2 mL/g_{VS}, 554,4 mL/g_{VS} e 464,8 mL/g_{VS}, per le prove con 2,7 g_{VS}/L, 6,75 g_{VS}/L e 10,8 g_{VS}/L di chitina grezza, facendo presumere una inibizione da substrato là dove la sua concentrazione è maggiore.

Inoltre solo nell'esperimento in monofase le maggiori produzioni di biogas corrispondono significativamente alle maggiori concentrazioni iniziali di chitina grezza, indipendentemente dalle concentrazione dello starter CSL, ordinando i risultati in 3 gruppi principali (Anova test). Gli incrementi percentuali tra produzioni medie ottenute con le diverse concentrazioni di chitina grezza sono riportati nella sottostante tabella delle produzioni medie (Tabella 13).

Tabella 13. Produzioni medie relativamente alle concentrazioni di chitina grezza e gli incrementi percentuali ottenuti per il processo in monofase

Concentrazione chitina		Produzione CH_4 da chitina grezza (mL/L)				Incremento %
g/L	g_{VS}/L	Bifase		Monofase		Monofase *vs* Bifase
		Media	St. dev.	Media	St. dev.	
5	2,7	2367,9	257,6	2387,3	304,6	0,82
12,5	6,75	3236,6	419,2	3742,1	274,8	15,62
20	10,8	4609,6	435,2	5019,4	240,5	8,89

Esperimenti con inoculo integrato di funghi anaerobi ARF più F210

Sulla base dei risultati ottenuti è stata pianificata la successiva serie sperimentale, tutta condotta in monofase, mirata a potenziare ulteriormente la fase idrolitica-acidogenica (fermentazione primaria) della chitina grezza utilizzando, oltre che il pool batterico F210, anche un mix di ceppi fungini ruminali anaerobi (di seguito indicati come ARF o FR) per incrementare le produzioni di CH_4, abbreviando contemporaneamente i tempi della DA. Ad oggi non sono noti studi sull'idrolisi della chitina grezza e/o alla produzione di biogas da questo substrato condotti integrando la comunità microbica spontanea (MS) con ARF. Nella Tabella 14 è riportato lo schema del piano sperimentale utilizzato.

I principali risultati relativi alle produzioni cumulative di biometano da chitina grezza, evidenziati nel grafico in Figura 56, possono venir così riassunti: con il potenziamento combinato della comunità metanigena con ARF e F210 si ottengono concentrazioni di CH_4 nel biogas interessanti: nelle prove C, D, E, H viene superato il 70% mentre per la prova D il valor medio è 78% (con punte anche dell'82%). D'altra parte la fase *lag* della produzione di biogas è molto lunga: gli andamenti più interessanti di produzione di CH_4 si realizzano a partire dal 40° giorno di sperimentazione, quando si registra per quasi tutte le prove una seconda e più marcata fase esponenziale di produzione

Tabella 14. Schema del piano sperimentale realizzato in configurazione di processo monofase con differenti combinazioni di inoculo e a diverse concentrazioni di chitina grezza

Prova	Inoculo	Concentrazione chitina g_{VS}/L
A	ARF+F210+MS	6,5 g/L
B	F210+MS	
C	MS	
D	ARF+F210+MS	9,75 g/L
E	ARF+F210+MS	13 g/L
F	MS	
H	ARF+MS	6,5 g/L

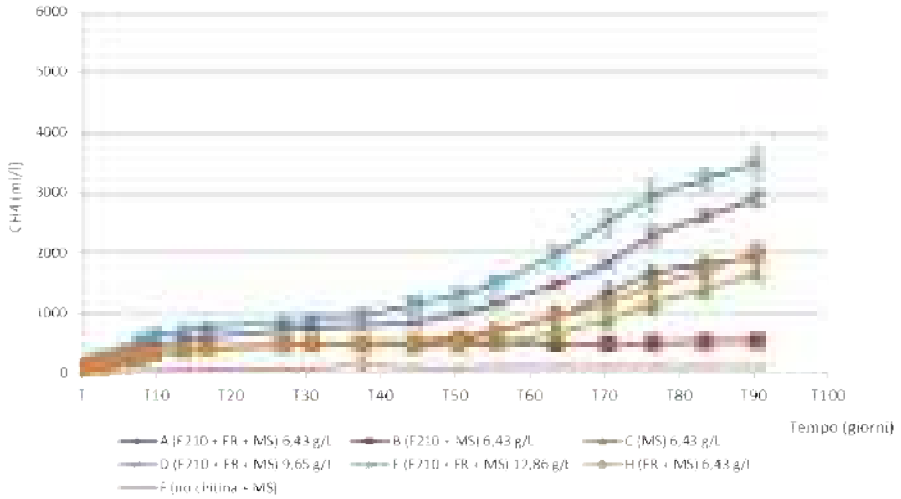


Figura 56. Produzioni cumulative di CH_4 ottenute in configurazione di processo monofase, per tre concentrazioni di substrato e in differenti combinazioni potenziamento della comunità metanigena

La produzione di biogas continua a protrarsi nel tempo, ma si può già rilevare che nelle prove con maggiore concentrazione di substrato si hanno maggiori produzioni cumulative di CH_4: all'aumentare del 50% della concentrazione di chitina grezza la produzione di CH_4 si incrementa del 51%; raddoppiando la concentrazione di substrato l'incremento è dell'82%. Le rese, in termini di mL di CH_4 prodotti per g_{VS} di chitina grezza, per le quattro migliori produzioni - A, E, D, H - sono rispettivamente di 271, 301, 314, 299, mostrando una riduzione della resa solo per la più elevata concentrazione del substrato.

Per questa serie di prove sperimentali è in corso l'indagine microbiologica della composizione e struttura delle comunità microbiche dei test che hanno fornito i migliori risultati. Sono state messe a punto presso i laboratori dell'ENEA le metodologie sperimentali che permetteranno di determinare la composizione della comunità microbica agli inizi del processo, nella sua fase esponenziale e nella fase terminale (plateau), scegliendo i campioni sulla base delle curve cumulative di produzione di metano.

Dal confronto tra il primo esperimento (condotto in monofase sulla base del disegno fattoriale, potenziando la comunità metanigena MS solo con F210 ed il suo attivatore CSL), rispetto al secondo esperimento (realizzato integrando MS sia con F210 che con ARF), si rileva che per quest'ultimo le quantità di mL di CH_4 prodotti sono minori rispetto a quelle ottenute per il precedente esperimento per lo stesso periodo di tempo, ed anzi nel precedente esperimento le produzioni al 60° giorno erano praticamente concluse. Questi risultati fanno in parte ipotizzare un ruolo di rilievo del CSL quale attivatore del pool fermentante F210, senza l'attività del quale, come è stato dimostrato nella precedente annualità, il "collo di bottiglia" creato dalla lenta idrolisi al primo step della DA viene traslocato al secondo step, quello dell'acidogenesi, rallentando comunque la produzione di metano. La produzione di biogas da scarti della lavorazione industriale dei crostacei resta comunque di grande interesse, soprattutto se confrontata con quella ottenuta da substrati cellulosici come la paglia di grano e il residuo di fungaia oggetto delle attività di ricerca descritte nelle pagine seguenti. Utilizzando la chitina si ottengono infatti più elevate concentrazioni di CH_4 nel biogas (mediamente 15-20% in più), maggiori rese per g_{VS} di substrato e

maggiori quantità cumulative di metano (da valutare per le differenti condizioni sperimentali ma da 2 a 4 volte di più).

Restano da migliorare i tempi della DA e da indagare come il rapporto C:N del substrato chitina incida sull'efficienza dell'attività microbica, responsabile della produzione di CH_4: la chitina infatti ha una struttura molecolare analoga a quella della cellulosa, ma differisce da quest'ultima per la presenza di un gruppo di acetilammina che sostituisce un gruppo di idrossile al C_2 su ogni monomero.

Ottimizzazione del processo di produzione di biogas da substrati lignocellulosici

Le attività di seguito presentate sono state svolte in collaborazione con l'Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale.

La resistenza alla biodegradabilità dei materiali lignocellulosici ha fatto finora prendere in considerazione costosi pretrattamenti termici e chimici che si traducono però in inevitabili modifiche agli impianti, complicando il layout del processo senza peraltro tradursi quasi mai in una maggiore convenienza economica della produzione del biogas. Per trovare una valida alternativa, molti autori hanno condotto studi e pubblicato ricerche mirate a potenziare la fase di idrolisi della componente lignocellulosica utilizzando funghi aerobi, puntando a sostituire il pretrattamento chimico-fisico con uno di tipo biologico.

D'altra parte, anche nella fase iniziale delle ricerche condotte nell'ambito della RdS, descritte nei rapporti tecnici della scorsa annualità, sono state realizzate prove sperimentali ipotizzando una migliore produzione di biogas dopo attacco dei substrati con ife di funghi aerobi. Non avendo però ottenuto buoni risultati, e al fine di avvalersi il più possibile di processi che si realizzano negli ambienti naturali, valorizzandone la biodiversità funzionale, ci si è rivolti con successo al potenziamento dell'idrolisi della paglia mediante funghi anaerobi di origine ruminale (*Neocallimastix sp*. ed *Orpinomyces sp.*) supportati da un pool microbico fermentante F210 selezionato nei laboratori ENEA.

Con le ricerche effettuate nel corso della presente annualità sono stati confrontati due substrati, paglia di grano (PG) e paglia di fungaia (PF), residuo della produzione industriale di funghi commestibili (*Pleurotus* sp), per verificare se l'attacco preventivo con ife di ceppi fungini anerobici (ARF) costituisca realmente un efficace pretrattamento di questo tipo di materiali, avvantaggiando il processo di DA senza richiedere alcuna modifica degli impianti esistenti.

Sulla base dei risultati ottenuti nella precedente annualità è stata quindi pianificata un'attività sperimentale strutturata in due fasi principali, in cui la seconda [rapporto RdS/PAR2014/145] costituisce lo scale up (10x) delle prove più interessanti ottenute dalla prima [rapporto RdS/PAR2014/144] (Tabella 15). Gli esperimenti sono stati condotti in configurazione di processo sia monofase che bifase al fine di porre in luce le caratteristiche della fermentazione primaria, composta da idrolisi e acidogenesi, con la relativa produzione di H_2. Gli esperimenti sono stati allestiti in batch da 120 mL e successivamente da 1.200 mL in condizioni di mesofilia (37 °C), utilizzando in tutti i casi una concentrazione del substrato di 8 g_{VS}/L.

Tabella 15. Schema dei piani sperimentali: a) in batch da 120 mL con working volume di 62,5 mL; b) in batch da 1200 mL (10 x) con working volume di 609,5 mL

(a)				
Prove	Substrati	Inoculi al t_0	Inoculo M dopo 168h	Configurazione processo
A	PG	M		monofase
B	PG	ARF + F210	M	bifase
C	PG	ARF + F210 + M		monofase
D	/	M		monofase
E	PF	M		monofase
F	PF	ARF + F210	M	bifase
G	PF	F210	M	bifase
H	PF	FR + F210 + M		monofase
(b)				
Prove	Substrati	Inoculi al t_0	Inoculo M dopo 168 h	configurazione processo
A	PG	M		monofase
B	PG	ARF + F210	M	bifase
D	/	M		monofase
E	PF	M		monofase
F	PF	ARF + F210	M	bifase

Le prove, condotte in triplicato su paglia di grano (PG) e paglia di fungaia (PF), sono state potenziate aggiungendo alla comunità metanigena (M) un inoculo di funghi ruminali anaerobi e il pool microbico fermentante F210 secondo il prospetto della precedente tabella. La comunità metanigena è stata aggiunta al t_0 (configurazione di processo monofase) oppure dopo 168 ore (configurazione di processo bifase) tempo in cui si compie il ciclo vitale completo dei ARF ed è terminata la produzione H_2.

Per tutte le prove sperimentali analoghe, cioè effettuate confrontando PF con PG alle stesse condizioni di inoculo, si rileva che le migliori produzioni si hanno sempre per la PG, smentendo l'ipotesi sostenuta da molti autori e riportata in letteratura che il preliminare attacco delle paglie con funghi aerobi possa costituire un promettente pretrattamento di tipo biologico, atto a favorire l'idrolisi. Evidentemente i miceli dei funghi aerobi utilizzano la parte maggiormente disponibile del substrato per la loro crescita, così che nelle paglie esauste viene concentrata la frazione più resistente e più difficilmente degradabile.

I principali risultati sono riportati nei grafici di Figura 57 e mostrano come le migliori produzioni cumulative di metano siano sempre ottenute con configurazioni di processo bifase, potenziando la comunità metanigena con ARF e F210

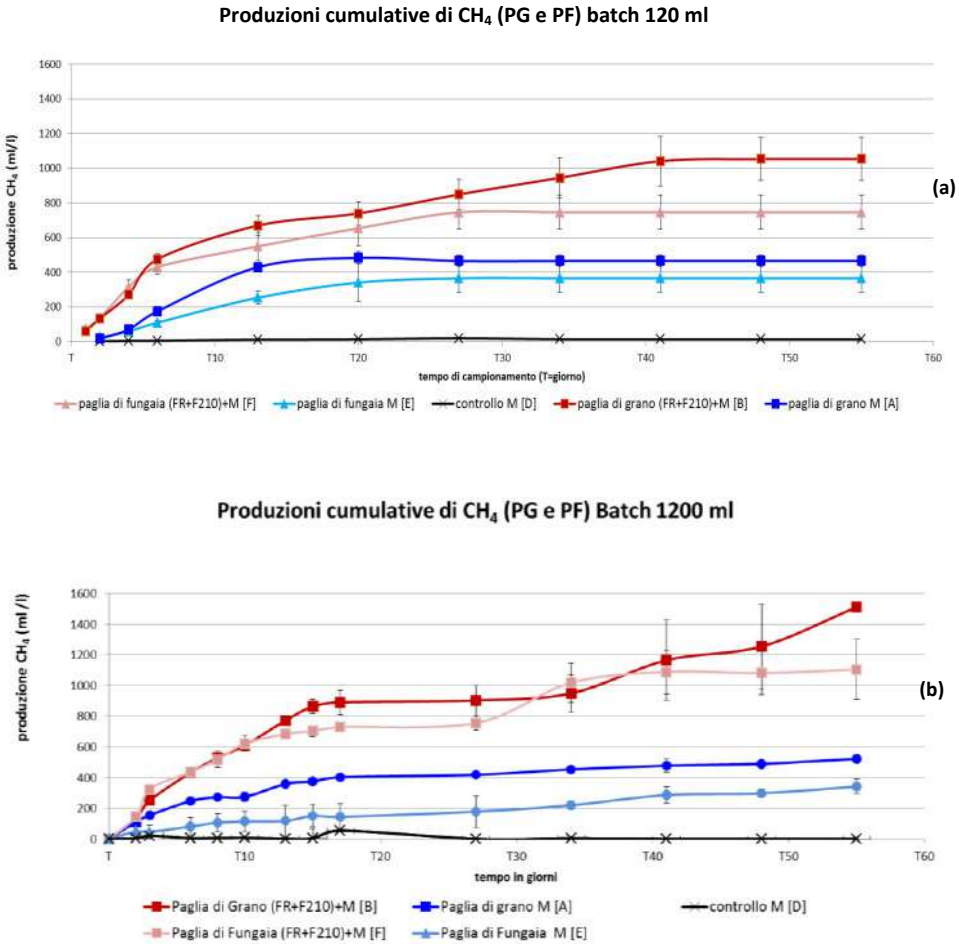


Figura 57. Produzioni cumulative di CH_4

Inoltre, è interessante rilevare che nelle prove dell'esperimento con incremento di scala 10x i risultati ottenuti nella precedente serie sperimentale vengono confermati ed anche enfatizzati: come si può vedere dai grafici di Figura 57, gli incrementi percentuali di produzione cumulativa di biogas ottenuti nelle due serie sperimentali sono notevoli e comparabili: tra i più salienti sono da riportare le produzioni di PF che in bifase, potenziata con ARF e F210, produce il 223% in più rispetto al monofase non potenziato, e lo stesso avviene per la PG, per la quale l'incremento è del 189%. Sempre in configurazione bifase, potenziando la comunità metanigena con ARF e F210, le rese di PG sono maggiori del 37% rispetto a PF.

E' in corso l'analisi microbiologica mediante microscopia in epifluorescenza per la caratterizzazione funzionale

della comunità microbica nelle diverse condizioni sperimentali e nel corso del tempo. Il dato innovativo da segnalare è che, per alcune prove, sono stati rilevati metanigeni idrogenotrofi metabolicamente attivi in mesofilia. Tale componente funzionale, ritenuta prevalente nei processi di DA in termofilia, è indicata come responsabile di circa il 30% della produzione di CH_4 in mesofilia, ma raramente si riesce a rilevarla in condizioni di attività, utilizzando la tecnica della "Fluorescence In Situ Hybridization" (FISH).

Utilizzando i risultati ottenuti dalle attività sperimentali, il gruppo dell'Università di Napoli "Federico II", ha studiato le cinetiche di produzione di metano e idrogeno modellizzandole. Le cinetiche sono state studiate sia mediante l'equazione di Gompertz, che mediante un modello di tipo differenziale e tutti i dettagli sono riportati nel rapporto RdS/PAR2014/144. In particolare, il modello di tipo differenziale descrive in maniera semplificata, attraverso equazioni di bilancio di massa, le diverse fasi del processo di trasformazione delle biomasse.

Poiché le cinetiche considerate dal modello sono, oltre a quella di bioconversione, quella di disintegrazione e quella di passaggio di fase dei gas (Gas-Transfer), esso è indicato come modello BDG-T ed è stato calibrato sulla base del primo esperimento e validato con i dati ottenuti dal secondo esperimento (scala 10x). I parametri considerati nel modello, al variare delle diverse configurazioni impiantistiche e sperimentali (bifase con e senza potenziamento della fermentazione primaria e monofase), sono stati: produzione di metano e di idrogeno nel tempo, degradazione del substrato iniziale ed evoluzione dei principali acidi grassi volatili, intermedi di reazione. Le costanti del modello sono state determinate sulla base dei risultati del primo esperimento e successivamente validate su quelli del secondo esperimento (10x).

I valori ottenuti per tali parametri sono riassunti in Tabella 16 e consentono di concludere che il modello BDG-T è in grado di riprodurre in maniera attendibile i dati relativi alla produzione di metano nel corso del processo di digestione analizzato, dimostrando inoltre la coerenza tra risultati sperimentali e quelli del modello.

I risultati ottenuti possono essere considerati propedeutici per lo sviluppo di un modello predittivo, utile alla progettazione di impianti in scala reale, che simuli il processo di DA e di *dark fermentation* (relativo cioè alla fermentazione primaria composta da idrolisi e acidogenesi) con produzioni rispettivamente di CH_4 e H_2. Tale modello potrà quindi essere calibrato sulla base di prove su scala laboratorio e poi validato su un impianto pilota.

Tabella 16 .Parametri modellistici calibrati con dati sperimentali della produzione di metano: costante di disintegrazione (K_d), parametro della conversione di parte del substrato iniziale in idrogeno (β), parametro di passaggio da fase liquida a fase gassosa (α). Indici di correlazione tra produzione di metano sperimentale e del modello calibrato di Gompertz (R_G^2) e cinetico semplificato (R^2)

	PAGLIA DI GRANO			PAGLIA DI FUNGAIA			
Inoculi	**M**	**(ARF+F_{210})+M**	**ARF+F_{210}+M**	**M**	**(ARF+F_{210})+M**	**(F_{210})+M**	**ARF+F_{210}+M**
Sigla	**A**	**B**	**C**	**E**	**F**	**G**	**H**
K_d (d^{-1})	0,58	0,70	0,73	0,50	0,60	0,62	0,65
β	1	10	2	1	8	5	2
α	0,10	0,11	0,12	0,10	0,11	0,12	0,11
R^2	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98
R_G^2	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Analisi microbiologiche

Presso i laboratori dell'ENEA sono in corso gli studi sulla composizione, struttura e caratteristiche funzionali delle comunità microbiche relativamente alle produzioni di biogas. Le indagini sulle differenti prove sperimentali nel corso del tempo, per entrambi i substrati sono condotte mediante microscopia in epifluorescenza utilizzando in particolare la tecnica "Fluorescence In Situ Hybridization" (FISH) che consente di individuare e quantificare solo le componenti microbiche metabolicamente attive nel processo, in altri termini quelle che concorrono alle produzioni finali di biogas, determinandone quantità e composizione [RdS/PAR2014/145].

Nello specifico, sono state avviate attività finalizzate alla messa a punto della tecnica FISH per il rilevamento dei batteri metanigeni idrogenotrofi obbligati, attivi nella DA. Infatti tutte le prove sperimentali sono state condotte in mesofilia (37 °C), condizione per la quale la maggior parte della produzione di CH_4 (circa il 70%) viene attribuita all'uso dell'acetato da parte di batteri metanigeni acetotrofi.

D'altra parte, si può supporre un'attiva partecipazione al processo di produzione di CH_4 anche attraverso l'uso dell'H_2 da parte dei metanigeni idrogenotrofi, che funzionalmente si dividono in idrogenotrofi facoltativi, in grado di *shiftare* il metabolismo verso le condizioni più convenienti e idrogenotrofi obbligati. L'effettiva identificazione di quest'ultimi mediante tecnica FISH è messa in discussione da molti autori, perché le caratteristiche della parete

cellulare, particolarmente resistente alla penetrazione delle sonde oligonucleotidiche, può condurre a falsi negativi nei risultati.

Per approfondire questo aspetto, che attualmente pone un limite allo studio della composizione funzionale della *guild* dei metanigeni, è stata svolta una specifica attività di rilevamento degli idrogenotrofi su ceppi puri ottenuti dalla banca di microrganismi DSMZ (Deutsche SammLung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH) selezionati tra i più interessanti rilevati in letteratura relativamente alle produzioni di biogas (Tabella 17).

La verifica della rispondenza delle specifiche sonde FISH alla presenza dei batteri idrogenotrofi obbligati in attività è stata ottenuta tramite confronto con colorazione DAPI (4',6-diamidin-2-fenilindolo), un composto fluorescente intercalante del DNA ampiamente utilizzato in microscopia per la rilevazione aspecifica di tutto il materiale genetico presente in un campione. Infatti il DAPI è in grado di attraversare la membrana delle cellule intatte sia vive che fissate, legandosi fortemente alle regioni del DNA ricche in A-T.

Tabella 17. Elenco dei ceppi di batteri metanigeni idrogenotrofi testati e relativi risultati ottenuti; (+)segnale positivo e (-) negativo alla sonda specifica per gli idrogenotrofi

n° DMSZ	n.	Ceppi batterici	Sonda FISH	Risposta
3045	4	*Methanoculleus bourgensis*	MG1200b	-
1093	5	*Methanobrevibacter ruminantium*	MB1174	+
11975	6	*Methanobrevibacter smithii*	MB1174	+
15999	7	*Methanobacterium beijingense*	MB1174	+
19844	8	*Methanobacterium arcticum*	MB1174	+
22026	9	*Methanobacterium kanagiense*	MB1174	+

I diversi ceppi esaminati rispondono al segnale con una diversa intensità, dovuta al differente grado di attività del metabolismo batterico. Problemi di visualizzazione si sono incontrati con il ceppo 4, unico rappresentante dell'ordine dei *Methanomicrobiales*. Questo ceppo è stato infatti analizzato anche con coloranti Live/Dead per verificarne la vitalità (test positivo) e pertanto in questo caso si ipotizzano problemi di penetrazione delle sonde.

Per quel che riguarda la componente fungina, tutte le attività presentate hanno richiesto il perfezionamento delle tecniche colturali degli ARF, nonché delle tecniche di rilevamento in microscopia. Quest'ultimo viene attualmente eseguito utilizzando la colorazione in Calcofluor. Inoltre il microscopio Zeiss (AXIOSKOP 40) è stato equipaggiato con un dispositivo Time-Lapse che ha contribuito all'acquisizione di micrografie relative alle differenti fasi del ciclo vitale degli ARF (Axio Vision Software, Axio Cam MRm, Zeiss Germania), di cui si riporta un esempio in Figura 58.

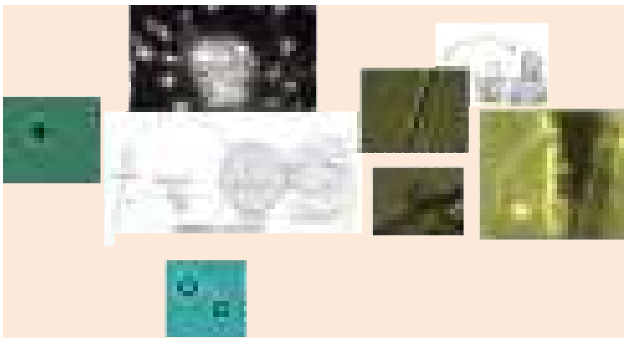


Figura 58. Micrografie relative alle differenti fasi del ciclo vitale dei funghi anaerobi ruminali

Studio e sviluppo di un processo fermentativo anaerobico di acque di vegetazione delle olive

La scelta di introdurre l'acqua di vegetazione come nuovo substrato per lo studio e lo sviluppo di un processo fermentativo anaerobico è stata motivata da contatti avuti sia con frantoi, sia con aziende agro-zootecniche dove sono presenti impianti a biogas. Inoltre la curiosità scientifica era stata stimolata dall'informazione che l'acqua di vegetazione lasciata depositata in contenitori chiusi produceva un biogas di cui non si conosceva la composizione (auto fermentazione). In bibliografia risultava scarsamente indagato sia il processo di produzione di idrogeno, sia il processo combinato di produzione di idrogeno e metano, e non erano presenti dati sull'autofermentazione.

L'acqua di vegetazione (AV), è ottenuta dal processo di estrazione dell'olio extravergine di oliva. Le caratteristiche chimico-fisiche e biologiche delle AV dipendono dal processo di estrazione, dalla cultivar e dalla regione di origine delle olive e dalle condizioni climatiche. Queste acque sono caratterizzate da colore scuro (dal violetto-rosso fino al nero), odore sgradevole, pH acido (4,5-5,9), elevata salinità, elevati valori di COD (45-220 g COD/L) e di polifenoli, composti tossici e con proprietà battericide, caratteristiche che le rendono un rifiuto potenzialmente molto inquinante.

Diversi trattamenti chimico-fisici e biologici sono stati da tempo sperimentati per cercare di ridurre il carico inquinante di questo refluo e, tra questi, l'utilizzo della digestione anaerobica sembra essere l'alternativa più promettente al puro e semplice spandimento sui terreni (che, pur essendo la pratica più diffusa, presenta comunque tutta una serie di controindicazioni) non solo per l'abbattimento degli inquinanti presenti, ma anche per la contemporanea valorizzazione economica del rifiuto stesso. Tuttavia, l'uso delle AV negli impianti di digestione anaerobica richiede una diluizione con altri substrati o un'acclimatazione a concentrazioni crescenti superiore ai 7 mesi.

Attualmente gli impianti di digestione anaerobica alimentati con AV in co-digestione utilizzano una percentuale non superiore al 20% a causa della tossicità dei composti fenolici presenti che inibiscono l'attività della comunità metanigena.

Lo scopo della presente ricerca è stato quello di valutare l'impatto di due differenti processi biologici sulla produzione finale di metano: un processo di autofermentazione delle acque di vegetazione, che non sono mai sterili e contengono quindi una microflora autoctona, e un processo di fermentazione indotto tramite l'utilizzo di una comunità selezionata di batteri idrogeno produttori. Le attività sperimentali sono state svolte dall'Università della Tuscia in collaborazione con ENEA [rapporti RdS/PAR2014/143 e RdS/PAR2014/145].

La prima linea sperimentale, è stata sviluppata allestendo 3 batch da 125 mL in duplicato con AV a diverse concentrazioni decrescenti, (Tq, 50%, 25%.), per un volume di lavoro pari a 50 mL, mantenuti a temperatura ambiente ed effettuando l'analisi qualitativa e quantitativa del biogas prodotto durante tutto il periodo della sperimentazione. Successivamente, riscontrata la fattibilità del processo autofermentativo, la sperimentazione è proseguita inoculando gli stessi batch con un pool di microorganismi metanigeni mesofili provenienti da liquame bovino. La seconda parte della sperimentazione prevista era tesa ad indagare se il processo in bistadio con produzione separata di idrogeno e di metano poteva aumentare l'efficienza di conversione, sia in termini energetici che come resa finale in metano (mL_{CH4}/g_{VS}).

Nella I fase batch da 125 mL (tre repliche) con AV a diverse concentrazioni decrescenti, (TQ , 50%, 25%.) per un volume di lavoro pari a 50 mL, sono stati inoculati con una comunità selezionata di batteri idrogeno produttori (F210). Nella II fase i batch sono stati inoculati con lo stesso pool di microrganismi metanigeni mesofili utilizzato per la sperimentazione precedente. Tutti i test di questa seconda serie sono stati condotti a 37 °C.

Entrambe le sperimentazioni sono state messe a confronto con un processo di produzione di metano, alle stesse condizioni sperimentali, da acque di vegetazione non trattate (due repliche).

Prove di autofermentazione

I risultati della prima serie di prove mostrano come la comunità batterica autoctona presente nelle acque di vegetazione sia capace di iniziare spontaneamente un processo fermentativo, producendo già alle 24 ore un biogas con presenza di H_2 e CO_2. Le produzioni massime di idrogeno si hanno dopo 11 giorni e sono pari rispettivamente a 30,92 mL/L per il campione non diluito, 103 mL/L per la diluizione al 50% e 95 mL/L per quello diluito al 25%. Per tutto il periodo dell'esperimento il pH dei campioni si è mantenuto stabile con valori intorno a pH 4,7-5. In Figura 59 vengono riportati i grafici sull'andamento nel tempo delle produzioni di biogas e di idrogeno a diverse concentrazioni di substrato.

Le successive prove di metanazione di entrambi i campioni (Figura 60), con e senza pretrattamento, mostrano come nonostante questi siano stati inoculati con liquame bovino al fine di introdurre la comunità metanigena, in entrambe le serie sperimentali si evidenzia già nelle prime 24-48 ore una produzione di idrogeno, a dimostrazione che nella comunità sono presenti tutti i microorganismi che effettuano sintroficamente le diverse fasi del processo di digestione anaerobica (idrolisi, acidogenesi con produzione di idrogeno, acetogenesi e metanogenesi). Aspetto invece più sorprendente ed attualmente poco studiato, che merita certamente future e più approfondite indagini è il veloce consumo di idrogeno che si registra prima dell'inoculo dei metanigeni.

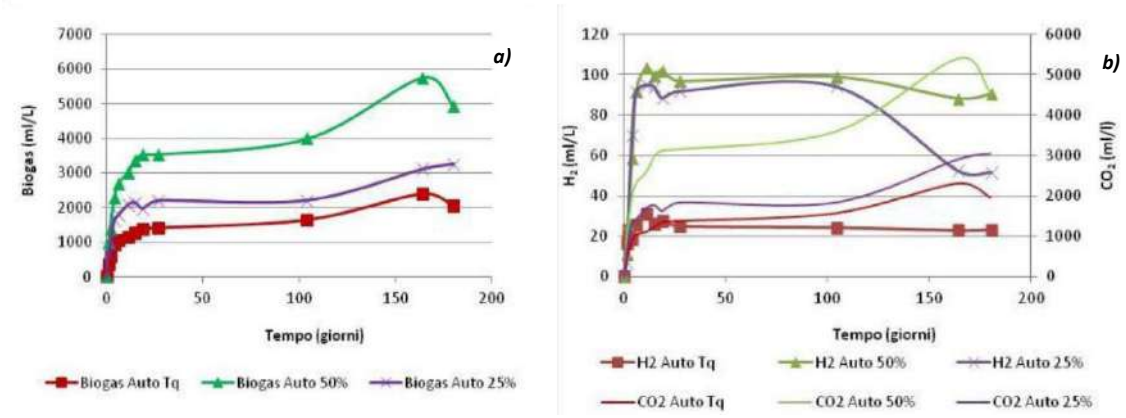


Figura 59. Autofermentazione di AV: (a) Produzione cumulativa di biogas; (b) produzione cumulativa di H_2 e CO_2 nel tempo a diverse concentrazioni di substrato

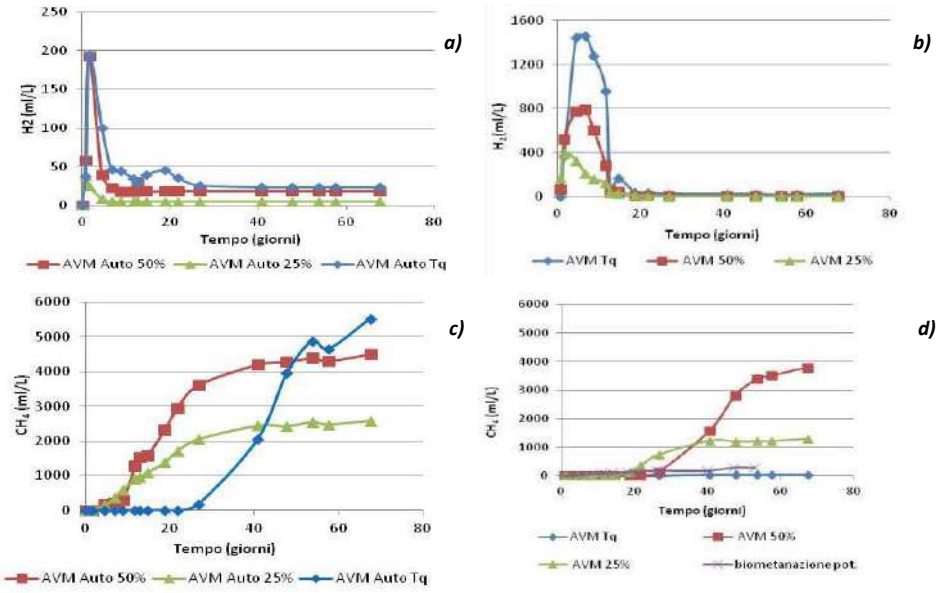


Figura 60. Produzione cumulativa di H_2 e CH_4 nelle diverse serie sperimentali: (a) Produzione di idrogeno in AVM Auto; (b) Produzione di metano in AVM Auto; (c) Produzione di Idrogeno in AVM; (d) Produzione di metano in AVM

Le prove AVM Auto raggiungono il loro massimo di produzione alle 40 ore per l'AVM Auto Tq e AVM Auto 50% ed alle 20 ore per la diluizione al 25%, con una produzione di idrogeno di 195 ± 5,80 mL/L, 193 ± 0,90 mL/L e 38,3 ± 0,10 mL/L rispettivamente. Le prove senza pretrattamento raggiungono il loro massimo di produzioni in 7 giorni per i campioni Tq e diluiti al 50%, con un volume prodotto rispettivamente di 1.461,6 ± 402,4 e 791,7 ± 33,4 mL/L, e in soli 2 giorni per i campioni più diluiti (25%), con un volume prodotto di 393,7 ± 62,0 mL/L.

Nelle Tabelle 18 e 19 sono riassunti i dati relativi alle percentuali di H_2 e di CH_4 presenti nel biogas con i rispettivi volumi e le rese in entrambe le condizioni sperimentali, con e senza pretrattamento. Sono anche riportati i dati di produzione di metano dall'inoculo utilizzato (BMP inoculo).

Tabella 18. Produzione di H_2 delle serie sperimentali AVM Auto e AVM

Campione	Tempo produzione max (giorni)	H_2 max (%)	Produzioni (mL_{H2}/L)	Resa (mL_{H2}/gVS)
AVM Auto Tq	2	4,60 ±0,13	194,6 ±5,8	6,66 ± 0,20
AVM Auto 50%	2	4,60 ± 0,08	192,9 ±0,9	13,0 ±0,10
AVM Auto 25%	1	0,88 ± 0,11	38,3 ±0,08	5,32 ±0,11
AVM Tq	7	21,2 ±4,5	1461,6 ±402,4	50,1 ± 13,7
AVM 50%	7	14,3 ± 0,3	791,7 ±33,4	53,5 ±2,25
AVM 25%	2	8,6 ±1,0	393,7 ±62,0	54,7 ± 8,72

Tabella 19. Produzione di CH_4 delle serie sperimentali AVM Auto e AVM

Campione	Tempo produzione max (giorni)	CH_4 max (%)	Produzioni (mL_{CH4}/L)	Resa (mL_{CH4}/gVS)
AVM Auto Tq	68+	65,6 ± 0,5	5519,8 ± 1986,2	189 ± 68,0
AVM Auto 50%	68+	60,1 ± 0,6	4497,1 ± 49,4	304 ± 3,34
AVM Auto 25%	68+	48,2 ± 2,8	2579,31 ± 187,7	358 ± 26,1
AVM Tq	54	1,15 ± 0,71	37,3 ± 25,2	1,51± 1,00
AVM 50%	68+	52,6 ± 2,6	3789 ± 69,3	256 ± 4,68
AVM 25%	41	46,8± 04	1230,9 ± 105,9	179 ± 2,45
6BMP inoculo	47	7,47 ± 0,56	291,7 ± 23,0	/ / /

Confrontando le rese di produzione di idrogeno, la serie AVM presenta valori più elevati della serie AVM Auto. Inoltre per entrambe le serie sperimentali si evidenzia un andamento non correlato alla concentrazione del substrato. Per quanto riguarda la produzione di metano, il pretrattamento di autofermentazione fornisce risultati migliori rispetto ai campioni non pretrattati, sia come produzione cumulativa di mL/L di CH_4 che in termini di resa, ottenendo con la diluizione al 50% un incremento del 19% e con la diluizione al 25% un incremento del 50%.

Fermentazione indotta: aggiunta di un inoculo di idrogeno produttori (F210)

Gli andamenti delle produzioni di idrogeno sono simili alle prove AVM e AVM Auto: per tutte e tre le diluizioni testate, dopo pochi giorni dal massimo di produzione di H_2, si assiste ad un suo immediato consumo fino a valori prossimi allo zero. Inoltre, come per la sperimentazione AVM, la produzione di H_2 diminuisce all'aumentare della diluizione dell'acqua di vegetazione con valori di 844 ± 67 mL H_2/L nel campione AVF Tq, 498 ± 67 mL_{H2}/L al 50% e 224 ± 7 mL_{H2}/L e 13,0 ± 0,4% nel campione diluito al 25%.

Per quanto riguarda la produzione di metano, già alle 24 ore dall'inoculo dei metanigeni, nei campioni diluiti si è registrata una produzione di metano, che ha raggiunto la massima produzione di 5397 ± 5 mL_{CH4}/L per il campione diluito al 50% e 2466 ± 183 mL_{CH4}/L per il campione al 25%. Per il campione non diluito, AVF Tq, si è registrata una minima produzione di metano (84,8 mL_{CH4}/L), confrontabile con AVM Tq ed entrambe ben al di sotto del valore di produzione di metano raggiunto nella biometanazione potenziale dell'inoculo (291,7 mL_{CH4}/L). Di seguito (Figura 61) sono riportati gli andamenti delle produzioni di idrogeno (mL H_2/L) e di metano (mL CH_4/L) a diverse concentrazioni di substrato (% AV).

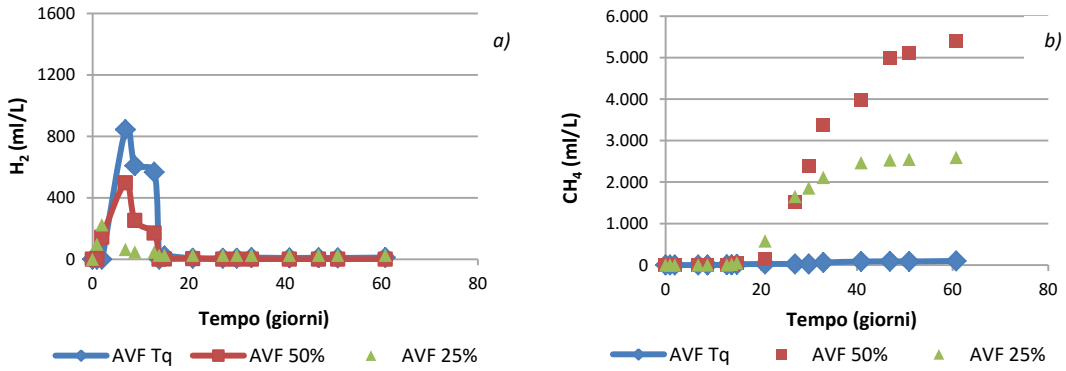


Figura 61. Produzione di H_2(a) e CH_4 (b) nella serie sperimentale AVF a diverse concentrazioni di substrato (AV)

Gli andamenti delle produzioni di idrogeno sono simili alle prove AVM e AVM Auto: per tutte e tre le diluizioni testate, dopo pochi giorni dal massimo di produzione di H_2, si assiste ad un suo immediato consumo fino a valori prossimi allo zero. Inoltre similmente alla sperimentazione AVM, la produzione di H_2 diminuisce all'aumentare della diluizione dell'acqua di vegetazione con valori di 844 ± 67 mL H_2/L nel campione AVF Tq, 498 ± 67 mL_{H2}/L al 50% e 224 ± 7 mL_{H2}/L e 13,0 ± 0,4% nel campione diluito al 25%.

Per quanto riguarda la produzione di metano, con la serie AVF, la fase lag risulta molto più breve rispetto alla serie AVM. Infatti i l'acqua di vegetazione è stata diluita con tampone fosfato 0,1M e questo ha permesso di mantenere il pH più stabile per l'intero periodo sperimentale con un valore di circa 6,8. Difatti già alle 24 ore dall'inoculo di metanigeni, nei campioni diluiti si è subito registrata una produzione di metano, che ha raggiunto la massima produzione di 5397 ± 5 mL_{CH4}/L per il campione diluito al 50% e 2466 ± 183 mL_{CH4}/L per il campione al 25%. Per il campione non diluito, AVF Tq, si è registrata una minima produzione di metano (84,8 mL_{CH4}/L) confrontabile con

AVM Tq ed entrambe ben al di sotto del valore di produzione di metano raggiunto nella biometanazione potenziale dell'inoculo (291,7 mL_{CH4}/L).

In Tabella 20 sono riassunti i dati relativi alle rese di idrogeno e metano nelle linee sperimentali AVMF e AVM, per facilitare il confronto tra le efficienze di produzione registrate per entrambe.

Tabella 20. Confronto delle rese di produzione di H_2 e CH_4 in AVF e AVM

Campione	AVF (mL_{H2}/g_{VS})	AVM (mL_{H2}/g_{VS})	AVF (mL_{CH4}/g_{VS})	AVF (mL_{CH4}/g_{VS})
Tq	28,7 ± 2,26	50,1 ± 13,7	3,39 ± 1,83	1,51± 1,00
50%	34,1 ± 4,59	53,5 ± 2,25	370 ± 0,36	256 ± 4,68
25%	30,3 ± 0,38	54,7 ± 8,72	350 ± 14,7	179 ± 2,45

Dai risultati a confronto emerge che per tutte e tre le diluizioni i campioni inoculati con il pool di idrogeno produttori selezionati (F210) hanno prodotto meno idrogeno a parità di substrato rispetto alla comunità di idrogeno produttori presente nel liquame: un incremento del 43% per il Tq, del 36% per quelli diluiti al 50% ed infine del 45% per i campioni diluiti al 25%. E' possibile ipotizzate che l'inoculo utilizzato nella serie AVM abbia al suo interno una comunità di idrogeno produttori più acclimatata su un substrato complesso come l'acqua di vegetazione, in cui oltre ai carboidrati sono presenti anche acidi organici e polimeri lignocellulosici.

Una situazione opposta si osserva invece per le rese di metano: le rese per le serie sperimentale AVF 25% (350 ± 14,7 mL_{H2}/g_{VS}) e AVF 50% (370 ± 0,36 mL_{H2}/g_{VS}) mostrano valori incrementati del 30% e del 49% rispetto alla serie AVM alle stesse diluizioni, mentre in entrambe gli AV Tq la produzione di metano è trascurabile.

In conclusione, si può affermare che i risultati di questa sperimentazione sono di notevole interesse, perché oltre ad aver verificato la fattibilità e l'efficacia del processo di produzione di idrogeno e di idrogeno e metano in bifase con acqua di vegetazione diluita al 50 e al 25%, il processo di autofermentazione è risultato essere un pretrattamento efficace per la produzione di metano anche con acqua di vegetazione Tq. Questo processo si è protratto per 6 mesi, un tempo in prospettiva sufficiente per i frantoi per poter stoccare l'acqua di vegetazione, trasferirla ad impianti di biogas, dove può essere aggiunta senza problemi alle altre matrici in alimentazione, e poter quindi riutilizzare lo stesso contenitore ogni anno.

Ottimizzazione della produzione di metano con un processo bistadio

Con l'obiettivo di finalizzare le attività di ricerca svolte negli anni precedenti verso un "prodotto" di interesse delle imprese, nel caso specifico del settore lattiero-caseario, si è proceduto sia ad avviare una nuova sperimentazione in un impianto pilota bistadio (realizzato nel corso della precedente annualità della RdS) alimentato con scotta, sia ad effettuare uno scale up di tutte le configurazioni precedentemente sperimentate [rapporto RdS/PAR2014/145].

Al termine della sperimentazione, è stata effettuata un'analisi preliminare di redditività economica per valutare se i dati sperimentali prodotti consentissero di realizzare un impianto industriale efficiente ed economicamente vantaggioso per le industrie lattiero-casearie.

Sulla base dei risultati delle prove effettuate nel corso della precedente annualità (Tabella 21), in cui l'aumento del carico organico utilizzato aveva determinato una diminuzione dell'efficienza energetica sia del processo monostadio (M2) che del bistadio (B3), è stato impostato un piano sperimentale con la finalità di aumentare l'efficienza dell'impianto portando i tempi di ritenzione del II stadio a 15 giorni, utilizzando come substrato la scotta diluita 1:2, a prescindere dal differente contenuto di sostanza organica dei diversi stock di scotta utilizzati. Inoltre, per il primo stadio si è scelto di operare ad un HRT (tempo di ritenzione idraulica) di 2 giorni, per aumentare l'efficienza di produzione di idrogeno.

Tabella 21. Riassunto delle rese della produzione di idrogeno e di metano in tutte le configurazioni

	M1(5 g/L_{VS})	M2 (10 g/L_{VS})	B1 (5 g/L_{VS})	B2 (5 g/L_{VS})	B3 (10 g/L_{VS})
SGP ($NL_{H2}*g_{VS}^{-1}$)	-	-	-	0,12 ±0,02	0,62 ±0,01
SGP (Nn L_{CH4}/g_{VS}^{-1})	0,28± 0,016	0,23 ± 0,01	0,36 ±0,.02	0,34 ±0,13	0,22 ±0,01

L'intera procedura sperimentale ha previsto la messa in opera di due distinte serie di prove:

- M4 Reattore CSTR Monostadio alimentato con scotta diluita 1:2; volume di lavoro 50 L; HRT 15 giorni; temperatura 37 °C; pH impostato a 7 con controllo del pH in automatico (NaOH 6N);
- B4 Reattore CSTR Bistadio in cui il I stadio veniva alimentato con scotta diluita 1:2; volume di lavoro 6,7 L; HRT 2 giorni; pH impostato tra 5,8-6 con controllo del pH in automatico (NaOH 6N).

L'impianto utilizzato in precedenza è stato potenziato con l'allestimento di nuovo reattore di vetro per il I stadio (10 L) e con un sistema di controllo automatico del pH per entrambi gli stadi.

Il monitoraggio temporale, effettuato per diversi parametri di processo, era il seguente:

- misura dei flussi in uscita da entrambi i reattori in tempo reale tramite l'utilizzo di due flussimetri digitali, con rilevamento del dato ogni 10 minuti. Il sistema era anche dotato di un counter che misurava la quantità di biogas totale prodotta nel tempo;
- analisi della composizione volumetrica percentuale del biogas nei costituenti principali quali CH_4, H_2, CO_2, O_2, N_2. Le misurazioni avvenivano ogni ora tramite un gascromatografo collocato in linea ed equipaggiato con un sistema di aspirazione dei gas prodotti che consente l'analisi in continuo.

Analisi della concentrazione degli acidi organici volatili, dell'acido lattico, alcoli e zuccheri disciolti negli effluenti venivano effettuati giornalmente alla stessa ora, in entrambi i reattori.

Confronto fra processi monostadio e bistadio (scotta diluita 1:2)

In Figura 62, per la configurazione monostadio M4 sono riportate le medie calcolate ogni 4 ore della portata giornaliera di metano (NL_{CH4}/g) e la sua concentrazione (%) nel biogas prodotto. La produzione di biogas prodotto si attestava su un valore di 43,3 ± 6,58 NL/g con una percentuale di metano nel biogas del 52,4 % ± 2,20 (v/v). La produzione di metano risultava essere di 22,8 ± 2,93 NL/g.

Nella configurazione bistadio B4, l'andamento della produzione di idrogeno è molto instabile, nonostante il controllo in automatico del pH (Figura 63). Si ottengono produzioni di 5,27 ± 1,72 NL_{H2}/g con una % di idrogeno nel biogas di 35,1 ± 2,48. Con il II stadio si ottengono produzioni di 21 ± 1,55 NL_{CH4}/g, con una % di metano nel biogas pari a 69,4± 2,11.

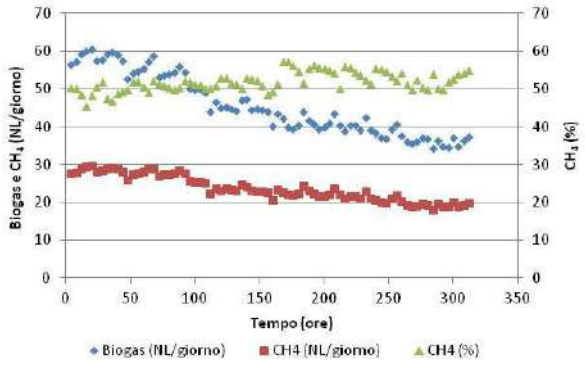


Figura 62. Configurazione M4. Portata di metano e di biogas (NL/d) e concentrazione (%) di metano nel biogas

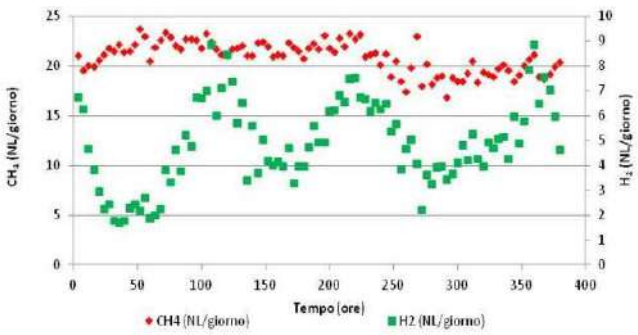


Figura 63. Configurazione B4. Flusso di metano nel II stadio e di idrogeno nel I stadio (NL/d)

Nella Figura 64 viene riportata la composizione della miscela alla confluenza dei flussi (H_2 = 11,4 ± 3,52%; CH_4 = 50,3 ± 6,00%; CO_2 = 33,3 ± 5,20%). Intorno alla 250[a] ora (freccia nel grafico) è stata introdotta una trappola per l'anidride carbonica all'uscita del primo stadio allo scopo di produrre una miscela sia a più alto contenuto di metano, sia con una concentrazione dell'idrogeno più stabile. In due giorni è stato ottenuto dal I stadio un biogas con l'H_2 all'88,7% e, nel periodo della sperimentazione, si è ottenuta una miscela composta da H_2 = 14,2 ± 1,95%; CH_4 = 58,8 ± 2,67%; CO_2 = 25,9 ± 1,91%).

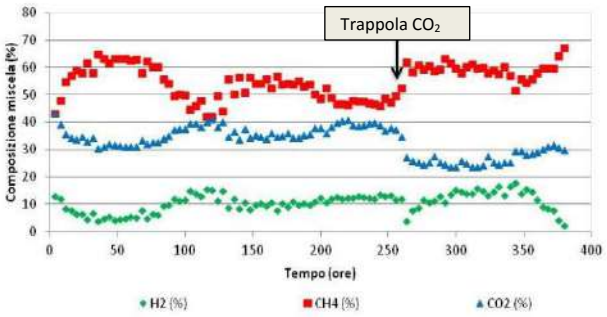


Figura 64. Configurazione B4. Composizione (%) del biogas alla confluenza dei flussi

Tabella 22. Portata di idrogeno e di metano in tutte le configurazioni

	M1	M2	M4	B1	B1_H2	B3	B4
GPR(NL_{H2}*$L_{reattore}^{-1}$*gg^{-1})	-	-	-	-	1,15 ± 0,15	1,23 + 0,03	0,79 + 0,13
GPR(NL_{CH4}*$L_{reattore}^{-1}$*gg^{-1})	0,19 ± 0,01	0,31 + 0,01	0,43+ 0,01	0,24 + 0,02	0,23 + 0,02	0,29 + 0,01	0,42+ 0,03

Si è utilizzata come alimentazione la scotta prodotta dal caseificio della "Formaggi Boccea", una piccola-media azienda che lavora 3500 m^3 di latte all'anno, cioè 10,5 t/g (considerando una densità di 1 t/m^3). Questo quantitativo di latte produce circa 10-9,5 t/g di siero che vengono utilizzate completamente per la produzione di ricotta. La scotta prodotta ammonta quindi a circa 9 t/g. Di seguito vengono riportati, come esempio, i calcoli eseguiti per lo scale up sia di un monostadio (M1) che di un bistadio (B1_H2).

M1 è stato alimentato con una scotta diluita 10 volte, quindi l'impianto scalato avrà, con una portata totale entrante di 90 t/g (9∗10), un consumo di scotta di 30000 t/a (considerando 333 giorni l'anno di produzione). Moltiplicando questa portata per l'HRT (7,5 giorni) e considerando una densità di 1 t/m^3, si ottiene un volume di lavoro di 675 m^3. La produzione di metano (42700 m^3/a) viene calcolata moltiplicando il valore ottenuto sperimentalmente per i m^3 dell'impianto e per i giorni di funzionamento (333 giorni). La produzione di energia totale viene calcolata moltiplicando quest'ultimo valore per il contenuto energetico di 1 m^3 di metano, pari a 35 MJ/m^3, ottenendo un totale di circa 1487 GJ/a, corrispondenti a 413 MWh/a. La produzione di energia elettrica viene calcolata tenendo conto del rendimento del cogeneratore. Se si assume per un cogeneratore di piccola taglia (dell'ordine dei 15-20 kWe di potenza) un rendimento del 30%, la produzione di energia elettrica ammonterebbe a circa 124 MWh/a.

Per quanto riguarda lo scale up della configurazione B1_H2, i calcoli relativi al secondo stadio sono identici a quelli effettuati per le configurazioni in monostadio M1. B2 è stato alimentato con una scotta diluita 5 volte, quindi l'impianto scalato avrà, con una portata totale entrante di 45 t/giorno (9x5), un consumo di scotta pari a 15000 t/a (sempre considerando 333 giorni l'anno di produzione). Il volume del primo stadio (in m^3) è calcolato moltiplicando l'alimentazione giornaliera (45 m^3) per l'HRT (1 giorno), e risulta quindi pari a 45 m^3. La portata di idrogeno (17200 m^3/a) viene calcolata moltiplicando il valore ottenuto sperimentalmente per i m^3 dell'impianto e per i giorni di funzionamento. La produzione di energia totale si ottiene moltiplicando quest'ultimo valore per il contenuto energetico di un m^3 di idrogeno (11 MJ/m^3). La produzione di energia totale, sommando il contributo del metano, è di 1984 GJ/anno, e quella di energia elettrica, considerando un rendimento del microcogeneratore del 31%, di 171MWh/anno. In Tabella 23 sono riassunti i volumi e le produzioni di energia elettrica stimati per gli scale up delle diverse configurazioni esaminate.

Tabella 23. Scale up delle diverse configurazioni: volumi ed energia elettrica prodotta

Configurazione	Volume I stadio (m^3)	Volume II stadio (m^3)	Energia elettrica prodotta (MWh/a)
M1	-	675	124
M2	-	338	103
M4	-	270	114
B1	45	675	163
B1_H2	45	675	171
B3	22,5	338	100
B4	36	270	118

A questo punto è stata effettuata una stima preliminare dei costi di investimento. L'azienda CINE S.r.l. (Compagnia Italiana Nuove Energie) ha fornito la stima del costo di un impianto monostadio tradizionale con un reattore di 432 m^3 e un microcogeneratore da 20 kW (Modello Tandem della ditta asjaGen). Il costo totale di investimento risultava essere di 210 k€ (160 k€ di reattore e pompe e 50 k€ di microcogeneratore). Successivamente è stata contattata l'azienda asjaGen, che ha fornito i prezzi dei propri microcogeneratori: il modello Tandem è prodotto anche per potenze di 25 kW, con un costo di 60 k€, 35 kW, con un costo di 75 k€ e 45 kW, con un costo di 90 k€. Per stabilire i costi dei reattori è stata utilizzata la formula:

$$Costo\ 2 = Costo\ 1 \left(\frac{Volume\ 2}{Volume\ 1}\right)^{0,6}$$

con la quale si è tenuto conto della cosiddetta economia di scala, per la quale il costo di costruzione di un nuovo impianto è funzione crescente della sua capacità, ma in misura meno che proporzionale. I costi dei reattori del primo stadio sono stati moltiplicati per un fattore 1,1 per tener conto della loro maggior complessità dal punto di vista dei sistemi di controllo.

Il tasso di interesse è stato fissato al 7,5%, con una vita utile degli impianti di 20 anni. Il costo di investimento è stato ammortizzato lungo tutti gli anni (metodo della retta) e scontato tramite l'Annuity factor. I costi annui di manutenzione sono stati stimati pari al 6% dei costi totali di investimento. A questo punto il valore di energia elettrica vendibile annualmente (per legge solo l'89% dell'energia elettrica effettivamente prodotta può essere venduta e quindi immessa in rete con il prezzo incentivato) è stato moltiplicato per la tariffa incentivante relativa a questa tipologia di impianti (0,271 €/MWh). A questo valore, definito "Gross income" (k€/anno), vengono sottratti i costi di ammortamento e i costi di manutenzione annuali e vengono addizionati i costi che l'azienda produttrice di formaggi sostiene annualmente per il trasferimento della scotta ad impianti di biogas esterni (4,57 €/t), ottenendo il "Net income", cioè i ricavi annuali. Infine sono stati valutati il Net Present Value (NPV), moltiplicando il Net income per l'Annuity factor, il PBP (Pay Back Period) e il ROI (Return on Investment). In Tabella 24 sono riportati i costi di investimento ed i criteri di redditività sopra citati per le diverse configurazioni.

Tabella 24. Costi di investimento e criteri di redditività delle diverse configurazioni

Configurazione	Costo di investimento (k€)	NPV (k€)	PBP (anni)	ROI (%)
M1	259	40	16	8,98
M2	188	103	10	13,3
M4	171	158	7	18,2
B1	314	46	16	8,98
B1_H2	314	67	14	10,0
B3	218	48	14	10,0
B4	210	105	10	13,3

Come si può osservare dai dati riportati in tabella, per tutte le configurazioni sperimentate i costi di investimento risultano redditivi, dimostrando che i caseifici di piccola taglia (9-10 t/g di scotta) potrebbero investire per la produzione di energia elettrica e di calore dai propri scarti di produzione. Dal confronto si può osservare che il costo dell'investimento è più redditivo per l'impianto monostadio (M4), con un tempo di abbattimento dei costi di 7 anni.

Sugli impianti bistadio incide molto il costo di investimento iniziale per la parte relativa al primo stadio. Infatti, nonostante i risultati delle sperimentazione indichino che in un impianto bistadio il biogas del II reattore sia di qualità più elevata (CH_4=70% nel bistadio contro il 53% del monostadio), la resa energetica totale del processo deve essere ulteriormente incrementata per poter abbattere il più elevato costo di investimento. Questo si può vedere se si mettono a confronto i risultati di portata di idrogeno e metano dei processi di digestione anaerobica monostadio M1 e quello del bistadio B1_H2 con quelli dell'analisi di redditività economica. In questo caso il

maggior costo di investimento per B1_H2 viene abbattuto dalla più elevata efficienza del processo di digestione anaerobica.

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

Nel corso dell'annualità (2014-2015) nell'ambito di questa subtask sono stati condotte le seguenti attività:

- continuazione delle prove di coltivazione di *Scenedesmus dimorphus* in vasche protette sotto serra da 1500 L;
- prove colturali di diversi ceppi microalgali su scala di laboratorio e relative prove di potenzialità di sviluppo di biogas mediante tecnica SOUR;
- nuove tecniche di separazione tra biomassa microalgale e mezzo di coltura con miglioramento dell'efficienza rispetto alla semplice decantazione utilizzata in precedenza;
- riepilogo delle esperienze effettuate nei tre anni con una prima stima di massima relativa a bilanci economico/produttivi.

Le attività che sono state svolte presso il C.R. Casaccia dell'ENEA sono descritte nel rapporto RdS/PAR2014/146.

Colture di microalghe in vasche aperte protette

Le attività sono state svolte utilizzando un'apposita infrastruttura, costituita da una serra a tunnel delle dimensioni di 15x8 m ospitante fotobioreattori a sacco e vasche da 3x2x0,6 m (volume utile di circa 1500 L) per coltivazioni microalgali, realizzata nel corso della precedente annualità della RdS. Il ceppo utilizzato nelle colture in vasca è stato lo stesso impiegato nelle prove del 2014, ovvero lo *Scenedesmus dimorphus*.

La campagna sperimentale è stata caratterizzata da un andamento climatico decisamente caldo, con non infrequenti piogge e temperature dell'aria nel complesso elevate, così come il flusso fotonico di interesse fotosintetico (PPF). I dati meteoclimatici sono stati acquisiti da una stazione meteorologica situata a circa 100 m in linea d'aria dalla serra sperimentale. All'interno della serra è stata installata una sonda per temperatura e umidità dell'aria in grado di registrare i dati ogni 15 minuti. Una sonda di temperatura per acqua, con registrazione automatica dei dati, è stata inoltre immessa in vasca negli ultimi 3 cicli produttivi.

In sede di programmazione delle attività, era stata prevista l'immissione nelle vasche di CO_2 per velocizzare la crescita delle microalghe, ma l'idea è stata successivamente abbandonata a seguito di ulteriori valutazioni tecnico-economiche. Infatti, oltre a rappresentare un rilevante costo aggiuntivo per le attività sperimentali, in quanto nella situazione specifica sarebbe stato possibile solo l'impiego di CO_2 pura in bombole e non di quella contenuta nei fumi di scarico di un cogeneratore a biogas come quelli installati presso gli impianti di digestione anaerobica, l'uso della CO_2 presenta comunque altri problemi di carattere più generale quali:

- un aggravio dei costi sotto forma di apparati di controllo e regolazione dell'immissione della CO_2 nelle vasche di coltura piuttosto sofisticati, per evitare che la stessa non venga assorbita dalle alghe e finisca direttamente in atmosfera senza produrre alcun risultato;
- le variazioni di pH nel mezzo di coltura e del metabolismo cellulare delle alghe conseguenti all'addizione di CO2 al mezzo di coltura, che possono ripercuotersi in modo imprevedibile sulla composizione biochimica della biomassa risultante.

Di conseguenza, non si è ritenuto opportuno aggiungere anche questa ulteriore variabile al set up sperimentale adottato.

Sono stati realizzati diversi cicli produttivi e su 5 di questi sono state effettuate le misure necessarie per calcolare la resa della biomassa microalgale raccolta. I risultati sono riportati nella Tabella 25 e in Figura 65.

Tabella 25. Dati produttivi delle colture microalgali. Anno 2015

ID	Data inoculo	Data raccolta	Durata g	Vol. iniz L	Vol. fin L	Fertiliz	Resa g/L	Resa tot g	Resa pro die g/L	Separabilità	Decantato L	Riciclo H_20
15-1	26/05/15	11/06/15	16	1500	1300	$1^0/_{00}$	0,16	207,21	0,010	75,67	80	no
15-2	19/06/15	26/06/15	7	1500	1400	$1^0/_{00}$	0,12	164,33	0,017	97,24	85	si
15-3	20/07/15	27/07/15	7	1500	1200	$1^0/_{00}$	0,22	260,61	0,031	98,27	120	no
15-4	30/07/15	08/08/15	9	1600	1400	$1^0/_{00}$	0,18	251,64	0,020	97,64	120	no
15-5	02/09/15	10/09/15	8	1500	1400	$1^0/_{00}$	0,15	209,00	0,019	100,00	110	no

Le procedure di gestione per la coltivazione microalgale in vasca sono state in generale molto simili a quelle già descritte nel rapporto dell'annualità precedente. Il digestato utilizzato come fertilizzante proveniva come nelle precedenti annate dall'impianto di digestione anaerobica della ditta Palombini di Nepi (VT), ovviamente con caratteristiche chimiche variabili nel tempo in conseguenza della variazione di composizione della miscela di alimentazione dei digestori, Anche durante le prove del 2015 sono state riscontrate criticità legate allo sviluppo di larve di insetto, con particolari effetti negativi esercitati da larve di chironomidi tubicole (vermetti rossi) che arrivano ad impiantarsi su tutte le pareti immerse e sono capaci di consumare per filtrazione l'intera biomassa microalgale di una vasca matura nel giro di 3-4 giorni. Occorre pertanto sorvegliare continuamente le vasche in modo da raccogliere la biomassa prima dello sviluppo massivo di tali larve.

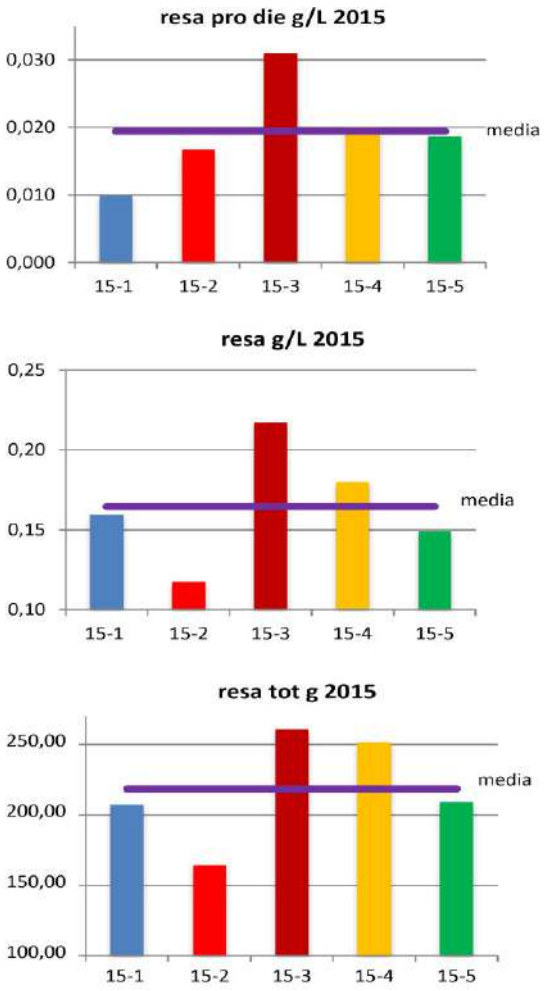


Figura 65. Produttività delle colture microalgali. Anno 2015

Determinazioni chimico-analitiche

Presso il Dipartimento di Chimica della Sapienza Università di Roma sono state effettuate determinazioni analitiche sulle acque di risulta provenienti dalle colture algali mature, sul digestato liquido proveniente da un impianto di biogas, impiegato come fertilizzante delle suddette colture, e sulla biomassa microalgale prodotta, potenzialmente utilizzabile per la produzione di biogas [rapporto RdS/PAR2014/147].

Le microalghe risultano adatte alla digestione anaerobica perché ricche in componenti fermentescibili (carboidrati, lipidi, proteine) a per l'assenza di lignina, che è un composto organico difficile da digerire molto spesso presente in matrici vegetali di origine terrestre. Vi sono, tuttavia, aspetti che risultano problematici nell'ambito di una coltivazione di microalghe su scala commerciale. In particolare, per quanto riguarda gli aspetti chimici, le condizioni ottimali di coltivazione per ottenere una maggiore produzione di biomassa algale.

I campioni di biomassa algale sono stati analizzati per determinarne:

- la biomassa totale: questo parametro permette di valutare la quantità totale di alghe sviluppatesi ed è un parametro importante per individuare le migliori condizioni di crescita per quanto riguarda la concentrazione dei nutrienti primari, che comunque vanno considerate insieme alle condizioni ambientali quali: temperatura ambiente, ore di esposizione alla luce solare, sua intensità, ecc.;
- la composizione del materiale e delle diverse frazioni che lo costituiscono (proteine, lipidi, carboidrati e componente inorganica), che può permettere di valutare l'utilizzo come materiale di partenza non solo per la produzione di biogas, ma anche per la produzione di biocombustibili liquidi o per altri impieghi non energetici in campo alimentare, mangimistico o della chimica verde.

Le acque di risulta, ottenute dopo la separazione della biomassa algale dal mezzo di coltura, sono state analizzate per determinare la quantità di nutrienti residui presenti (N, P, K). La determinazione dei nutrienti residui nelle acque di risulta permette di individuare eventuali nutrienti limitanti la crescita. Inoltre è possibile evidenziare quali elementi vengono consumati in modo maggiore dalle alghe durante il periodo vegetativo e valutare un eventuale uso di queste acque per pratiche di fertirrigazione. Le analisi della composizione in N, P, K del digestato liquido utilizzato come fertilizzante delle colture microalgali permettono di valutarne le potenzialità per questo utilizzo, e ottimizzarne quindi i dosaggi, anche in base alle differenti partite di provenienza.

L'insieme dei dati raccolti fornisce indicazioni sulle condizioni nutritive ottimali per lo sviluppo della biomassa algale e su come le variazioni in composizione del mezzo di coltura influiscono sulla composizione in proteine, lipidi e carboidrati, della stessa.

L'estensione di questo tipo di controlli analitici su un arco di tempo sufficientemente lungo consentirà in

prospettiva di valutare quali nutrienti fondamentali (N, P, K) risultano limitanti per una corretta crescita e sviluppo del materiale algale e se particolari condizioni di crescita possono favorire l'accumulo preferenziale di uno o più metaboliti primari (proteine, lipidi, carboidrati).

I risultati delle analisi effettuate su alcune serie di campioni forniti da ENEA sono riportati di seguito nelle Tabelle 26-29 .

Tabella 26. Determinazioni analitiche su campioni di biomassa algale

ID	Volume tot, L	Biomassa, g	Proteine tot., %	Lipidi tot., %	Ceneri, %	Carboidrati tot. %
11-06-15 Decantato	1,96	3,8702	29,8	3,3	12,1	54,8
26-06-15 Decantato	1,88	3,1244	30,3	2,9	21,3	45,5
27-07-15 Decantato	1,97	2,148	31,2	3,5	9,8	55,5
06-08-15 Decantato	1,89	2,0608	29,5	4,0	15,2	51,3
10-09-15 Decantato	1,90	2,6680	31,0	3,7	13,0	52,3

Tabella 27. Biomassa in campioni di acque di risulta

ID	Volume tot, L	Biomassa, g
11-06-15 Risulta	3,80	0,157
26-06-15 Risulta	4,06	0,037
27-07-15 Risulta	3,80	0,016
06-08-15 Risulta	3,85	0,018
10-09-15	3,79	0,00

Tabella 28. Determinazione di nutrienti in campioni di acque di risulta

ID	Residuo secco, g/L	Azoto tot mg/L	$NaNO_3$, mg/L	P_2O_5 , mg/L	PO_4^{-3} , mg/L	K^+ g/L	K_2O g/L
11-06-15 Risulta	0,502	27,50	83,5	24,3	32,5	0,1502	0,3621
26-06-15 Risulta	0,492	0	0	76,1	101,8	0,1017	0,2453
27-07-15 Risulta	0,170	49,51	150,3	0	0	0,1090	0,2628
06-08-15 Risulta	0,169	31,16	94,6	121,3	162,3	0,0606	0,1460
10-09-15 Risulta	0,152	0	0	36,5	48,85	0,0905	0,2180

Tabella 29. Determinazioni analitiche sul digestato

	Residuo secco, g/L	N, mg/g	P, g/L	K, g/L
Digestato Azienda Palombini	58,4	N totale = 12,5 $NaNO_3$ = 24,0 NH_3 = 0	P_2O_5 = 1,42 PO_4-PO_3 = 1,84	K+ = 4,41 K_2O = 10,85

Per quanto riguarda le quantità di biomassa recuperate, i vari campioni analizzati danno risultati abbastanza comparabili. Si va da un massimo di 3,87 g ad un minimo di circa 2,06 g.

La composizione in azoto proteico, lipidi, carboidrati e materiale inorganico (determinato come ceneri) è risultata invece piuttosto costante. In particolare, il contenuto in azoto proteico si attesta mediamente intorno al 30%, è in accordo con quanto precedentemente trovato e pubblicato da altri autori per questa specie.

Il contenuto in lipidi va dal 2,9 al 4,0% in peso. Questi valori sono sufficientemente in accordo con quanto riportato in letteratura per quanto riguarda il contenuto lipidico di *Scenedesmus sp*. In un recente lavoro di Xin et al.[6] viene riportato che in *Scenedesmus* si ha un aumento della percentuale di lipidi fino al 30%, in condizioni di carenza di azoto e fosforo. Nei campioni analizzati non si è però osservato questo fenomeno, probabilmente a causa della contemporanea assenza dei due elementi (N, P). Infatti, nei campioni analizzati il fosforo è risultato sempre presente, tranne che per il campione del 27 luglio, che però mostra un contenuto in lipidi del 3,5%.

[6] Xin Li, Hong-ying Hu,Ke Gan, Ying-xue Sun, Effects of different nitrogen and phosphorus concentration on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga Scenedesmus sp., Bioresource Technology 101 (2010), 5494-5500

Il contenuto in carboidrati, considerando i valori ottenuti nelle altre determinazioni, è risultato compreso tra il 45,5% del campione del 26 giugno e il 55,5% del campione del 27 luglio. Dall'analisi dei dati si nota una modesta variazione fra i diversi campioni, che però rientra nei valori percentuali riportati in letteratura per *Scenedesmus sp.*

Dalle analisi effettuate sul residuo secco ottenuto dalle acque di risulta per determinarne il contenuto in nutrienti N, P, K, è risultato che tutti i campioni non contengono azoto ammoniacale, ovviamente nei limiti di sensibilità del metodo. Due campioni risultano anche completamente esenti da azoto nitrico. In tutti i campioni, invece, è sempre stato possibile ritrovare sia fosforo che potassio, tranne il campione del 26 giugno, in cui il fosforo risulta assente. Questo risultato sembra confermare che è l'azoto il probabile elemento chiave per la crescita microalgale.

Per quanto riguarda le analisi effettuate sul nuovo digestato è da ricordare che le analisi sono state effettuate su un solo campione. Risulta comunque evidente che i valori trovati si attestano su valori che possiamo considerare medi per quanto riguarda il contenuto di azoto nitrico, fosforo e potassio, mentre risulta ancora una volta assente l'azoto ammoniacale.

Questo risultato, analogo a quello trovato per il digestato utilizzato per le prove sperimentali della precedente annualità, può essere dovuto al fatto che l'ammoniaca è un gas a condizioni normali e può liberarsi dal campione. Inoltre è da tenere presente che il pH del digestato è risultato essere alcalino (come nel precedente campione), condizione che favorisce l'eliminazione dell'ammoniaca. Il residuo secco ottenuto (58,5 g/L rispetto ai 74 g/L del precedente campione) è ancora abbastanza in linea con quanto riportato mediamente per frazioni chiarificate di digestato.

Un altro fattore sicuramente importante, ma non indagato nell'ambito del presente lavoro, è rappresentato infine dalla colorazione del digestato, che oltre una certa concentrazione contribuisce ad "opacizzare" il medium di coltura impedendo un'ottimale penetrazione della luce e quindi una corretta illuminazione per il normale sviluppo delle microalghe. A tale proposito sarebbe auspicabile controllare in futuro, con misure colorimetriche, come l'opacità del mezzo di coltura può influire sulla crescita delle microalghe andando a valutare l'intensità luminosa all'interno della soluzione di crescita a diverse concentrazioni di digestato aggiunto.

Colture di laboratorio per la realizzazione di inoculi e prove di produttività di biogas

I fotobioreattori in sacco della serra sono stati inoculati mediante colture effettuate in laboratorio con sistemi impieganti bottiglie di acqua minerale riciclate, acqua minerale e fertilizzante commerciale liquido per piante con rapporto NPK 7:5:6. Le colture venivano agitate tramite aria compressa, immessa con una pipetta collegata ad un tubicino in plastica. L'illuminazione era fornita da tubi al neon in continuo.

In laboratorio sono state effettuate prove di sviluppo su altre specie di acqua dolce, ovvero *Botryococchus braunii* e *Arthrospira platensis*, su cui sono state effettuate valutazioni sperimentali di produzione di biogas con la procedura "SOUR". La stessa procedura è stata adottata anche per determinare la produzione di biogas da campioni di *Scenedesmus dimorphus* provenienti dal sistema di coltivazione in vasche aperte [rapporto RdS/PAR2014/146].

La procedura "SOUR" (Specific Oxygen Uptake Rate) è stata messa a punto da Lasaridi e Stentiford[7] per la determinazione della stabilità dei compost. Più recentemente è stata dimostrata l'esistenza di una correlazione altamente significativa fra la domanda specifica di ossigeno di una matrice per 20 ore, a 37 °C, in condizioni aerobiche dinamiche in cui l'unico fattore limitante è il C della matrice, e la sua produzione potenziale di biogas in condizioni anaerobiche in 60 giorni. Per la sua rapidità il test è uno strumento estremamente potente ed utile per la valutazione e l'approvvigionamento di matrici organiche da destinare alla digestione anaerobica.

A differenza del BOD5 questa tecnica consiste nel rilevare il consumo di ossigeno in condizioni non limitanti, aerando periodicamente il campione: tutto questo viene realizzato mediante un'interfaccia seriale, collegata con un computer, che realizza cicli alternati di 15 minuti di aerazione e 15 minuti di rilevamento dati (O_2 disciolto e temperatura). In ogni ciclo di misura i dati di ossigeno disciolto, espressi in mgO_2/L, avranno un andamento lineare decrescente nel tempo: la pendenza della retta rappresenta il tasso di consumo di ossigeno ($mg_{O2}\ L^{-1}\ h^{-1}$). Il grafico delle pendenze in funzione del tempo presenta una fase lag iniziale, un picco (in genere intorno alla quinta-sesta ora del test), una fase discendente: il valore del picco riferito all'unità di peso di sostanza secca contenuta nel campione rappresenta il SOUR ($mg_{O2}\ g^{-1}_{SS}\ h^{-1}$).

L'integrale da 0 a 20 ore della curva delle pendenze consente di ricavare la domanda specifica di ossigeno OD_{20} ($mg_{\ 2}/g_{\ S}$) che, insieme al contenuto di solidi volatili, permette di stimare la produzione potenziale di biogas,

[7] Lasaridi K. E., Stentiford E. I. (1998) A simple respirometric technique for assessing compost stability. WaterResearch (Oxford) n°32 (12); pag 3717-3723

mediante la seguente equazione di correlazione (Schievano et al., 2008):

$$ABP = 13{,}782 \times VS + 26{,}161 \times OD_{20}^{0,5} - 997{,}89$$

dove VS rappresenta il contenuto di solidi volatili del campione (% SS), OD_{20} è la domanda specifica di ossigeno del campione in 20 ore (mg O_2/g SS) e ABP è il potenziale di biogassificazione anaerobica (mL biogas/g SS).

Per le misure di produttività di biogas sono stati utilizzati per ciascuna prova circa 2 L di coltura della specie interessata. Quest'ultima, giunta a maturità e decantata per almeno una notte, è stata versata in un contenitore di alluminio rivestito con carta da forno e posta in una stufa termostatata a 105 °C.

Se si considerano, ad esempio, i campioni di *Scenedesmus dimorphus* SC-A, SC-B, SC-C utilizzati nelle prove sperimentali, queste specie microalgali sono state coltivate con il sistema in vasche all'aperto utilizzando come fertilizzante il digestato liquido all'$1^0/_{00}$. Le tre colture microalgali, come si può osservare dai dati riportati in Tabella 30, differivano per modalità di essiccazione o centrifugazione e per sistema di confinamento della biomassa all'interno della beuta in cui si esegue la misura del SOUR (in soluzione libera, con uso di garza, di falcon con buchi o di cestello metallico di contenimento).

La necessità di confinare la biomassa nella soluzione di misura del SOUR è dettata dal fatto che le particelle di biomassa possono essere portate in alto dalle bolle di aria e possono rimanere adese sul collo della beuta e quindi sottratte all'ambiente di misura.

In particolare, le colture SC-A e SC-B, una volta raccolte dalla vasca, sono state decantate per una notte, e successivamente i campioni sono stati essiccati a 105 °C, mentre per quanto riguarda la coltura SC-C, dopo la raccolta, i campioni sono stati dapprima centrifugati a 3000 rpm per 20 minuti e poi essiccati in stufa a 105 °C. Dopo circa due giorni, il campione essiccato è stato raccolto, pesato e posto in una falcon in attesa che venisse effettuata la misura.

Tabella 30. Trattamento di colture di *Scenedesmus* prima di sottoporle alla procedura SOUR

ID	grammi utilizzati	essiccazione	centrifugazione	separazione biomassa
SC A1	0,350	105°C	No	in soluzione
SC A2	0,330	105°C	no	garza
SC A3	0,352	105°C	no	falcon con buchi
SC B1	0,351	45°C	no	cestello metallico
SC B2	0,382	105°C	no	cestello metallico
SC B3	0,350	105°C	no	cestello metallico
SC C1	0,362	105°C	si	cestello metallico
SC C2	0,366	105°C	si	cestello metallico
SC C3	0,349	105°C	si	cestello metallico

Per la prova respirometrica, sono stati posti circa 0,3-0,5 g di biomassa essiccata delle diverse microalghe in una beuta da 500 mL, nella quale sono stati aggiunti 12 mL di una soluzione tampone composta da: K_2HPO_4 125 mM, KH_2PO_4 62,5 mM, Na_2HPO_4 125 mM, $FeCl_3$ 0,314 mM, $CaCl_2$ 82,4 mM, $MgSO_4$ 30,4 mM, più 10 mL di una soluzione di NH_4Cl (33,7 mM) e portata a volume con acqua distillata. La beuta veniva posta in un bagno termostatico a 37 °C collocato su una piastra con agitatore magnetico. Nella beuta, inoltre, erano state inserita una pietra porosa, alimentata da una piccola pompa ad aria da acquario, ed una sonda per la misura dell'ossigeno disciolto. Quest'ultima, prima della misurazione, veniva tarata al valore di zero con una soluzione di metabisolfito di sodio o potassio.

Per ognuna delle colture analizzate sono state effettuate rispettivamente 3 prove SOUR. Nelle prime prove effettuate in soluzione libera si è osservato che, per effetto della forte agitazione, parte del campione microalgale rimaneva addensato sul collo della beuta al di sopra dell'interfaccia aria/acqua, quindi minore biomassa contribuiva alla determinazione dell'O_2 disciolto rilevato dal sistema SOUR. Per ovviare a questa problematica, nei successivi esperimenti è stato utilizzato un cestello in rete metallica a maglia fine, realizzato in laboratorio, che permetteva di contenere il campione e di tenerlo costantemente in soluzione nella beuta.

L'aeratore permette il flussaggio di aria all'interno della beuta. Si parte con un periodo (15 minuti) di flussaggio. In questo periodo nella beuta l'ossigeno raggiunge rapidamente il valore di saturazione. Successivamente si valuta il rateo di assorbimento di ossigeno in 15 minuti di arresto dell'aerazione. Nella soluzione infatti si sviluppa una comunità microbica che degrada aerobicamente la matrice microalgale. Grazie ad una interfaccia seriale collegata ad un computer, si registra l'evoluzione del contenuto di ossigeno disciolto durante 20 ore. Quindi,

successivamente, integrando i ratei specifici durante tutto l'esperimento si ottiene il valore dell'OD_{20} (Domanda specifica di ossigeno a 20 ore in mg $_2/g_{SS}$) e, attraverso l'equazione empirica descritta in precedenza si determina il potenziale biochimico di biogas (ABP).

In Figura 66 è riportato un grafico tipico di un campione di *Scenedesmus* ottenuto dal programma di rilevazioni dati del SOUR. Sull'asse delle ascisse si ha il tempo in ore, mentre sulle ordinate si ha la DO in mg_{O2}/L.

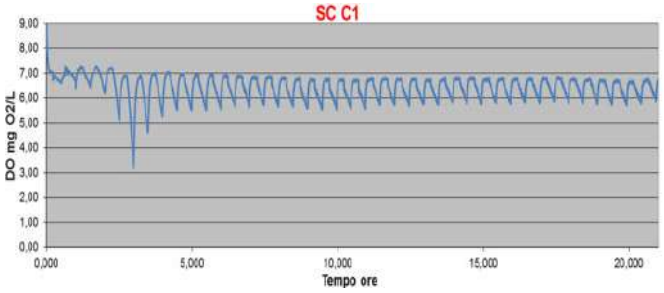


Figura 66. Grafico tipico ottenuto dal sistema di rilevazione SOUR di una coltura di *Scenedesmus* (SC-C)

Produzione potenziale di biogas da diverse specie microalgali

Sono state effettuate diverse prove per mettere a punto un metodo standard in grado di fornire risultati attendibili e in linea con quanto ottenuto con altre metodiche. La Tabella 31 riassume i risultati delle misure effettuate per le diverse specie microalgali con la tecnica SOUR. Sono riportati i differenti valori di ABP (mL/g^{SV}) ottenuti e le rispettive medie e eventuali deviazioni standard.

Tabella 31. ABP di diverse biomasse microalgali (SC: Scenedesmus dimorphus, BOTRY: Botryococcus braunii, SPI21: Arthrospira platensis)

ID	Peso campione (g)	ABP mL/gSV	Media ABP	Deviazione standard ABP mL/g_{SV}
SC	0,403	499,868		
SC Z1	0,35	402		
SC Z2	0,35	438,05		
BOTRY	0,353	330,47		
SC A1	0,35	637,74	563,04	64,85
SC A2	0,33	530,33		
SC A3	0,352	521,06		
SC B1	0,351	292,64	319,38	23,73
SC B2	0,382	327,58		
SC B3	0,35	337,92		
SC C1	0,362	535,73	558,93	24,94
SC C2	0,366	555,77		
SC C3	0,349	585,30		
SPI21 A1	0,357	468,06	567,61	94,01
SPI21 A2	0,366	654,88		
SPI21 A3	0,33	579,89		

In Figura 67 sono rappresentati i diversi valori di ABP espressi in mL/g di solidi volatili (SV) ottenuti per le specie microalgali testate durante gli esperimenti effettuati.

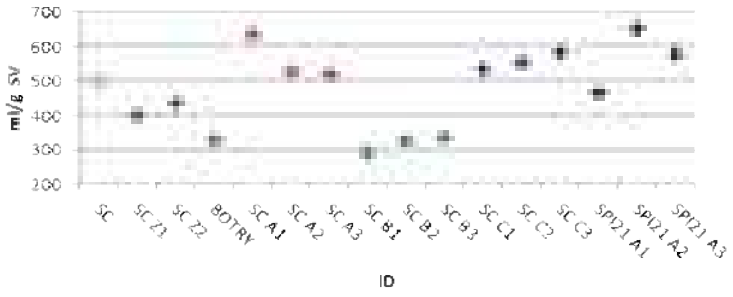


Figura 67. Valori di ABP (mL/gSV) delle diverse specie testate (SC: *Scenedesmus dimorphus*, BOTRY: *Botryococcus braunii*, SPI21: *Arthrospira platensis*)

Dai risultati relativi ai diversi ceppi oggetto della sperimentazione si osserva una diversa capacità di produzione di biogas nelle varie colture: il valore di ABP oscilla tra 292,64 e 637,74 mL/g_{SV}, a seconda della specie utilizzata.

Nella Figura 68 sono riportate le medie degli ABP ottenuti per alcune delle colture microalgali e le corrispondenti deviazioni standard con n = 3.

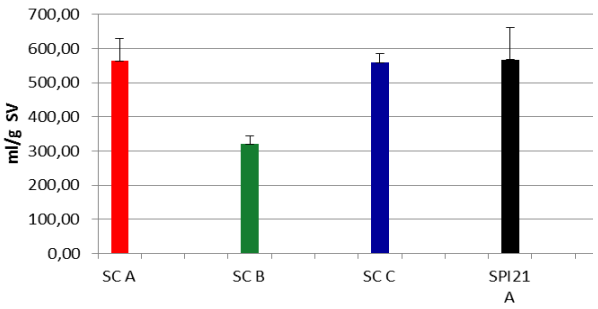


Figura 68. Media di ABP e rispettive deviazioni standard di diverse colture microalgali

Bilanci economico / produttivi

Tenuto conto di una produzione media di biomassa microalgale secca per ciclo di circa 0,24 g/L determinata come media fra i risultati delle annate 2014 e 2015, si ottengono produzioni per vasca per ciclo di circa 0,33 kg. Secondo le stime ottenute con la tecnica SOUR, da 1 kg di biomassa secca di *Scenedesmus* è possibile ricavare circa 600 L di biogas. Quindi da un ciclo produttivo su 1500 L si possono ricavare 0,2 m^3 di biogas.

Da 1 m^3 di biogas si ricavano 1,8÷2 kWh elettrici più 2-3 kWh di energia termica, per un totale di circa 5 kWh. Pertanto da un ciclo produttivo in vasca da 1500 L si potrà ricavare circa 1 kWh di energia (elettrica e termica). Al costo stimato di 0,2 €/kWh, il ricavo per ciclo produttivo è di 0,2 €.

In termini di mancata spesa c'è da considerare quella relativa al digestato (circa 1,5 kg per ciclo) che usualmente viene sparso sul terreno agricolo al costo di 3,5 €/t. Prendendo in considerazione invece il dato produttivo migliore ottenuto nelle tre annate di sperimentazioni effettuate, pari a 1,29 g/L si ottiene un ricavo teorico di 1,18 € per ciclo produttivo da 1500 L.

Costi di impianto e costi di gestione

L'argomento costi può essere affrontato distinguendo tra costi di impianto e costi di gestione. I costi di impianto associati alle attività sperimentali in oggetto sono stati molto modesti, in quanto si è usufruito dell'intelaiatura metallica di una serra a tunnel dismessa, che è stata riadattata e provvista di un telo plastico trasparente coprente, oltre che di telo ombreggiante rimovibile. Per le vasche, sono state utilizzate piscine plastiche fuori terra con intelaiatura metallica, munite di un divisore centrale in policarbonato lamellare trasparente con staffe metalliche di supporto, che consentiva la creazione di una corrente circolare all'interno delle vasche.

La movimentazione del mezzo di coltura è stata effettuata tramite due sistemi diversi:

- il primo basato sull'uso di un airlift a piano inclinato, realizzato con un foglio di policarbonato trasparente sostenuto in posizione inclinata da supporti metallici e munito di un tubo forato alla base per la fuoriuscita delle bolle d'aria. L'aria compressa era fornita da una soffiante da 360 W che alimentava anche altre utenze;
- Il secondo costituito da una ruota a pale con motorino elettrico annesso da 40 W a 12 Volt.

Entrambi i sistemi sono stati ideati e realizzati in ENEA. I costi di impianto, riferiti a tre anni di attività in una serra da 120 m^2, sono riportati in Tabella 32.

Tabella 32. Costi di impianto

Elemento	Costo unitario (€)	N. di elementi	Costo totale (€) IVA compresa
Telo copertura serra	200	2	400
Telo ombreggiante	100	2	200
Vasca da 3 x 3 x 0,66 m	90	3	270
Divisore centrale	40	3	120
Air lift	40	2	80
Agitatore a pale con motore elettrico	380	1	380
Soffiante x aria compressa	400	1	400
Serbatoio x trasporto alla filtrazione	200	1	200
Totale IVA compresa			2050

I costi di gestione comprendono elettricità, acqua, reagenti (ipoclorito di sodio, sodio tiosolfato), polietilene per i fotobioreattori a sacco utilizzati per gli inoculi, materiale di ferramenta, costi di personale. In Tabella 33 vengono

riportati i costi gestionali, con esclusione di quelli di personale, per singolo ciclo colturale e per mese di attività, considerando in quest'ultimo caso un utilizzo teorico su 100 m^2 (25 m^3 di volume) di vasche a pieno regime.

La Tabella 33 comprende la prima colonna da sinistra con l'identificazione dei singoli elementi di costo, la seconda con i costi per ciclo di coltura in termini di unità di misura e relativa quantità, la terza il costo per singolo ciclo in euro. Il costo dell'acqua non è stato conteggiato in quanto di approvvigionamento interno ENEA. Come metodo di separazione si è preso a riferimento la decantazione, in quanto degli altri due metodi potenzialmente utilizzabili (filtrazione a membrana e flottazione) non si conoscono ancora con precisione i consumi. I totali sono al netto delle spese di personale, nel presente caso già incluse nel normale stipendio ENEA.

Tabella 33. Costi gestionali

Elemento	Costo per singolo ciclo da 1,5 m^3 (quantità)	Costo per singolo ciclo (€)	Costo mensile (ipotesi produttiva su 100 m^2)
Elettricità per agitazione	0,04 kWh x 24 h/d x 10 d = 9,6 kWh	1,92 € (0,2 €/kWh)	96 €
Acqua (coltura e pulizia)	1600 L	ND	ND
Reagenti x sterilizzazione chimica acqua	0,6€ ipo + 75 g tio ≈ 0,9 €	0,9 €	45 €
Polietilene x PBR inoculo	100 g; 0,3 €	0,3 € (3 €/kg)	15 €
Filtrazione (membrana)		ND	
Decantazione	2000 kW x 0,5 h	0,2 €	10 €
Personale	5 ore/uomo ogni 10 giorni	ND	100 ore/uomo
Totali		3,32 €	166 €
Ricavo teorico massimo		1,18 €	59 €

ND: Non determinato

Oltre a queste colonne, se ne riporta una quarta, con una visione ipotetica ma realistica, basata sull'esperienza operativa realizzata ma maggiormente orientata verso una dimensione produttiva. Tale visione prevede un utilizzo ottimale degli spazi di una serra da 120 m^2 di 15 x 8 m per ospitare vasche per una superficie totale di 100 m^2, pari ad un volume utile di 25 metri cubi. Quindi il rapporto è di 1:16,66 (m^3) x 3 (cicli mensili), ovvero 1 : 50. Infine, come si vede, c'è un rapporto di circa 2,8 : 1 fra costi di gestione e ricavo teorico massimo.

In conclusione, si può affermare che, a fronte dei dati raccolti e analizzati per elaborare dei bilanci economico/produttivi anche se ovviamente a carattere indicativo, è emersa una sostanziale inadeguatezza all'utilizzo proposto delle metodiche di coltivazione e di successivo recupero della biomassa tramite decantazione e filtraggio, nonché della specie microalgale utilizzata, lo *Scenedesmus dimorphus* (che pure risulta fra le migliori specie di acqua dolce in termini di produttività e rusticità), in quanto le spese necessarie per la sua produzione sono risultate decisamente superiori ai ricavi energetici in termini di biogas potenzialmente ottenibile. Nel migliore dei casi si è giunti a rapporti di 2,8:1 tra spese di gestione e ricavi. In particolare, gli elementi da rivedere con maggiore attenzione dal punto di vista economico sono:

1. la disinfezione iniziale dell'acqua nelle vasche ad opera di ipoclorito e tiosolfato. Probabilmente un trattamento a base di raggi UV risulterebbe più economico;
2. le spese energetiche per l'agitazione dell'acqua. Necessitano altri sistemi più efficienti rispetto a quelli impiegati, probabilmente in grado di assicurare il rimescolamento delle colture anche tramite accensioni intermittenti temporizzate;
3. la filtrazione. Occorre verificare operativamente i costi energetici della flottazione, che dovrebbero essere ben inferiori rispetto alla tecnologia a membrana. La decantazione, sebbene sia la tecnica meno costosa, comporta efficienze di separazione non ottimali e anche poco prevedibili.

a.3 Gassificazione con acqua in condizioni supercritiche (SCW)

Scopo del lavoro in oggetto era quello di fornire indicazioni di natura energetica e di processo per la valorizzazione di matrici organiche ad elevato contenuto in acqua attraverso processi di gassificazione non convenzionali. In particolare, si è valutata la producibilità energetica in termini di energia elettrica e biometano (o biometano equivalente, nel caso del gas del syngas prodotto via gassificazione con acqua in condizioni supercritiche) fissando quale matrice in ingresso un tipico refluo zootecnico bovino [rapporto RdS/PAR2014/148].

Il confronto è stato condotto utilizzando modelli matematici risolti mediante l'ausilio di Aspen Hysis® v.7.0.1., anche attraverso l'introduzione di parametri sperimentali, mettendo a confronto 3 diverse configurazioni di

impianto: la digestione anaerobica (DA), la gassificazione in acqua supercritica (SCWG) integrata in un ciclo a vapore supercritico (SC) ed infine, una tecnologia che combina queste ultime due tecnologie (AD/SCWG/SC).

I reflui zootecnici possono avere contenuti di sostanze organiche fino al 10% in peso e vengono solitamente trattati in DA al fine di conseguire il recupero energetico con la produzione di biogas a basso impatto ambientale. Tuttavia, il processo, tecnologicamente semplice e consolidato, non consente il recupero totale del contenuto energetico della frazione organica e richiede tempi decisamente lunghi (30 giorni o più) che si traducono in un elevato volume dei digestori.

Dalle simulazioni condotte, si è potuto osservare come l'introduzione di un ciclo a vapore supercritico (processo DA + SCWG) consentirebbe di incrementare la producibilità in energia elettrica ed al tempo stesso di ottenere biometano a pressione nettamente superiore a quella atmosferica. Il layout finale della configurazione completa, che prevede la gassificazione supercritica di matrici organiche ad elevato contenuto in umidità, unito con il ciclo a vapore e la produzione di bio-SNG è mostrata di seguito nella Figura 69.

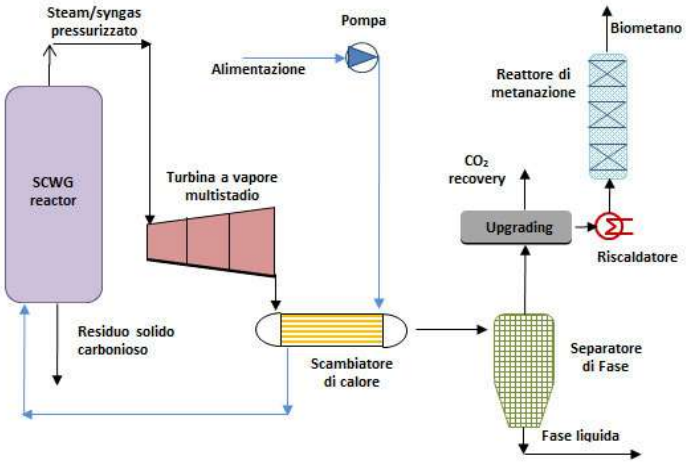


Figura 69. Schema della gassificazione in acqua supercritica integrato in un ciclo a vapore supercritico (SCWG+SC)

Indicativamente, si è scelto come feed del processo un quantitativo di 10 tonnellate al giorno di reflui zootecnici, con un contenuto di solidi pari al 10% in peso. Di seguito si riportano, attraverso l'uso di un diagramma a blocchi (Figure 70-72), la conversione equivalente in biometano ed energia elettrica per le tre configurazioni considerate.

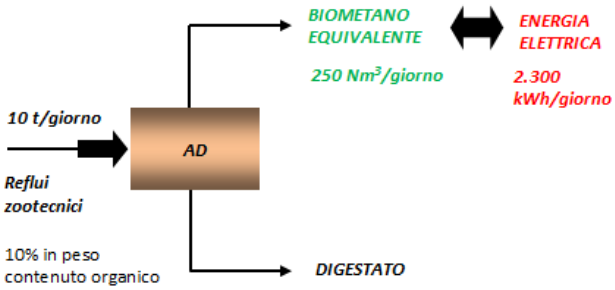


Figura 70. Conversione in biometano equivalente ed energia elettrica. Configurazione DA

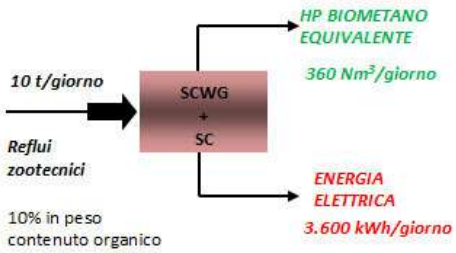


Figura 71. Conversione in biometano (ad alta pressione) equivalente ed energia elettrica. Configurazione SCWG + SC

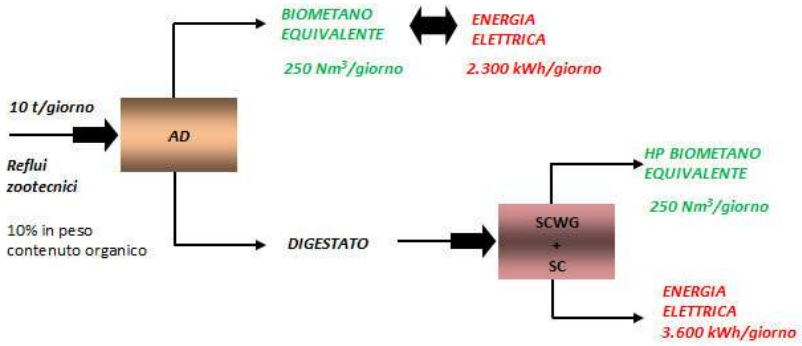


Figura 72. Conversione in biometano equivalente ed energia elettrica. Configurazione AD + SCWG + SC

Il processo DA+SCWG rappresenta la configurazione che permette la massima valorizzazione dell'energia della biomassa in ingresso. Questo si ottiene grazie alla combinazione dell'alta selettività della digestione anaerobica, per la produzione di metano, con l'eccellente conversione della SCWG in gas. Il contributo energetico, relativo al ciclo a vapore supercritico, è identico sia per il processo SCWG e sia per la DA + SCWG. La quantità di acqua presente nel circuito è la stessa.

Il processo termico (SCWG + SC) ha una produttività in termini di metano superiore alla digestione anaerobica e pertanto si presenta come un impianto valido per qualsiasi layout considerato. Utilizzando invece il processo DA accoppiato con SCWG con ciclo a vapore è possibile avere una produttività di metano superiore rispetto agli altri due, ed allo stesso tempo una produzione di energia comparabile con il solo SCWG più il processo col ciclo a vapore.

Infine, l'impianto di DA presenta il vantaggio di avere una semplice realizzazione rispetto agli altri sistemi, ma la gassificazione in acqua supercritica è di gran lunga preferibile, in termini di energia totale prodotta, rispetto alla digestione anaerobica, anche se presenta qualche difficoltà nella gestione di matrici ad alto contenuto organico a causa dei problemi connessi all'esercizio in pressione dell'intero sistema.

Accanto alla valutazione energetica preliminare sono stati condotti test sperimentali [rapporto RdS/PAR2014/149] utilizzando un reattore isotermo *bench scale*, di tipo *plug flow*, progettato per operare alle condizioni supercritiche per l'acqua (Figura 73), valutando gli effetti relativi alla conversione del substrato organico, digestato di reflui zootecnici e microalghe, al variare di parametri legati alle matrici, come il contenuto di sostanze organiche, e di parametri di processo, quale il tempo di residenza.



Figura 73. Impianto pilota bench scale utilizzato per la sperimentazione con matrici organiche in condizioni di acqua supercritica

I risultati delle prove effettuate sul digestato di reflui zootecnici hanno mostrato che per un'alimentazione nel range di 6-14 mL/min è possibile produrre un gas di sintesi con un potere calorifico superiore (HHV) di circa 22 MJ/Nm^3 e con una resa di gas di circa il 13%.

Sono state valutate l'efficienza di gassificazione di carbonio e l'efficienza globale di gassificazione, ottenendo rispettivamente il 35 ed il 45%. Per questi parametri di processo SCWG, non si è vista nessuna influenza del tempo di permanenza nel campo di indagine (Figura 74). Il syngas ottenuto presentava una concentrazione di idrogeno nel range di 40-45% in volume, mentre il valore misurato per il metano era intorno al 15% in volume. La fase liquida è stata analizzata in termini di glucosio e di altre specie come aldeidi, furani, alcoli ed acidi carbossilici in concentrazione compresa 350-650 ppm. Il volume ridotto di questa frazione potrebbe suggerire un processo adatto non soltanto per la produzione di energia, ma anche per il trattamento dei rifiuti.

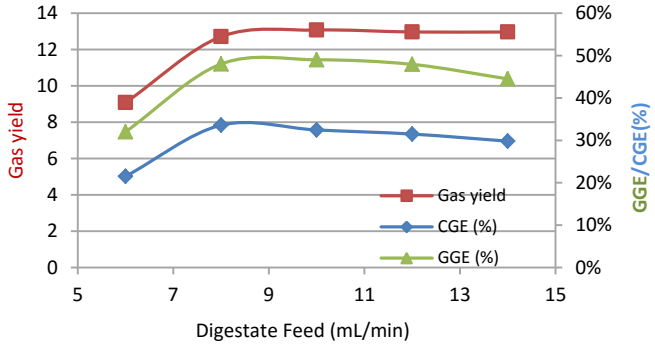


Figura 74 .Resa totale di gas, Efficienza di Gassificazione in Carbonio, Efficienza Globale di Gassificazione rispetto all'alimentazione con digestato, su base secca [T = 550 °C; P = 250 bar]

Nel caso delle microalghe *Scenedesmus dimorphus* (provenienti dalla colture realizzate presso il C.R. Casaccia nell'ambito della Subtask a.2) il syngas prodotto presenta un potere calorifico superiore di circa 22 MJ/Nm^3 con una resa in gas fortemente dipendente dal contenuto di solidi totali e variabile nel range dal 10 al 30%, quest'ultimo per microalghe con un contenuto di solidi totali di circa lo 0,07%, nettamente superiore a quello ottenuto dalle prove effettuate sul digestato.

Analogamente, la SCWG della microalga ha mostrato più elevate efficienze globali di gassificazione rispetto al digestato, a parità di condizioni operative, raggiungendo valori pari a circa l'80% per l'alimentazione con il più basso contenuto di solidi totali, come mostrato nel grafico della Figura 75.

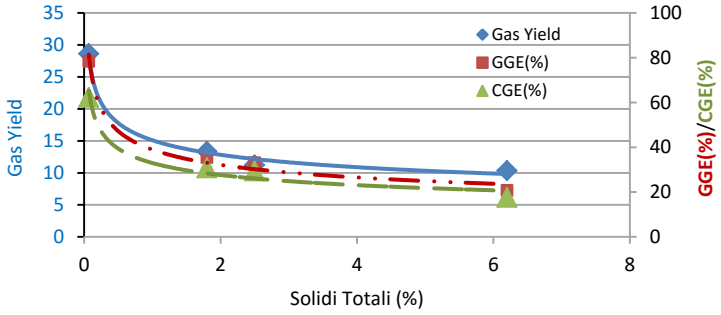


Figura 75. Resa totale di gas, Efficienza di Gassificazione in Carbonio, Efficienza Globale di Gassificazione rispetto all'alimentazione con microalghe [Q = 10 mL/min; T = 550 °C; P = 250 bar]

Per quanto attiene la fase liquida prodotta, il contenuto in termini di composti organici è risultato nettamente superiore a quello ottenuto in analoghe condizioni dal digestato tal quale. L'80% di questo materiale è rappresentato da acido acetico ed acido formico, e queste componenti potrebbero essere valorizzate per la produzione di syngas, regolando opportunamente i tempi di residenza, oppure potrebbero essere recuperate e utilizzate come prodotti biobased per l'industria chimica.

In conclusione, si può ritenere che, grazie alla grande versatilità nell'uso delle materie prime gassificabili, il processo SCWG presenta delle interessanti prospettive per un futuro sviluppo tecnologico, anche nella prospettiva della produzione di un bioliquido contenente intermedi organici ad elevato valore per l'industria chimica. E' necessario, al fine di valutare le possibilità di utilizzo della tecnologia, effettuare ulteriori ricerche e prove sperimentali in modo da poter associare delle cinetiche apparenti di produzione delle diverse fasi al variare del contenuto di sostanza organica e dei tempi di residenza.

Sintesi e caratterizzazione chimico-fisica di catalizzatori zeolitici bifunzionali Ni/H$^+$ a struttura MFI e BEA

Presso l'Università della Calabria sono proseguite le attività relative allo sviluppo di nuovi catalizzatori a base di nichel supportato su zeolite per la gassificazione delle biomasse con acqua in condizioni supercritiche. Sono stati sintetizzati catalizzatori zeolitici a diverso tenore di alluminio (Si/Al = 25 e 50) aventi struttura MFI e BEA, in forma acida e impregnati con $NiCl_2$ allo scopo di rendere il catalizzatore bifunzionale (redox/acido) [rapporto

RdS/PAR2014/150]. La sintesi ha riguardato principalmente tre step:

- Sintesi della fase cristallina desiderata;
- Attivazione della fase zeolitica in forma acida;
- Impregnazione con sale di Ni, in particolare $NiCl_2$.

La composizione molare dei gel di sintesi viene riportata in Tabella 34.

Tabella 34. Composizione molare gel di sintesi

Campione	Na_2O/SiO_2	Al_2O_3/SiO_2	SDA[a]/SiO_2	H_2O/SiO_2
MFI(25)	0,10	0,02	0,08	20
MFI(50)	0,10	0,01	0,08	20
BEA(25)	0,10	0,02	0,20	10
BEA(50)	0,10	0,01	0,20	10

[a] SDA: agente direzionale di struttura (TPABr per MFI e TEAOH per BEA)

I catalizzatori sintetizzati sono stati sottoposti ad analisi sia strutturali (diffrattometria a raggi X, porosimetria) che relative all'acidità superficiale (desorbimento dell'ammoniaca a temperatura programmata).

Tutti i campioni sono stati caratterizzati mediante diffrattometria a raggi X (APD 2000) allo scopo di verificare la cristallinità della fase cristallina presente nel catalizzatore. I difrattogrammi ottenuti mostrano che i campioni risultano avere la fase cristallina desiderata con un'elevata cristallinità (basso background dello spettro e picchi ben definiti).

In Tabella 35 sono riportate le principali caratteristiche porosimetriche delle strutture analizzate.

Tabella 35. Proprietà superficiali dei catalizzatori

Campione	H-Ni-MFI(25)	H-Ni-MFI(50)	H-Ni-BEA(25)	H-Ni-BEA(50)
Area Specifica Superficiale BET [m^2/g]	287	290	437	487
Volume dei micropori [cm^3/g]	0,096	0,095	0,15	0,17

Si può notare una certa influenza della presenza del nichel sia sull'area specifica superficiale che sul volume dei micropori. I risultati sperimentali dimostrano che i campioni presentano una diminuzione della superfice BET tipica della MFI e della BEA. In entrambi i casi la superficie BET diminuisce di circa il 20%, e ciò è indice della presenza del nichel sul catalizzatore.

L'acidità superficiale dei campioni è stata misurata mediante NH_3-TPD (TPDRO1100, ThermoFisher). L'analisi dei picchi ottenuti e le relative deconvoluzioni (R^2>0,99) sono state effettuate mediante un software commerciale (PeakFit 4.12, Seasolve-USA). I risultati relativi alla distribuzione dei siti acidi presenti sui campioni analizzati sono riportati in Figura76 e in Tabella 36, e mostrano la presenza di due picchi principali di desorbimento (i cui massimi corrispondono a temperature di circa 300 °C e 500 °C) dovuti probabilmente alla presenza di siti acidi deboli e forti.

Tabella 36. Risultati delle analisi NH_3-TPD

Campione	NH_3-uptake [$\mu mol/g_{cat}$]	T_{d1} [a] [°C]	x_1 [b]	T_{d2} [c] [°C]	x_2 [d]	Weak sites [$\mu mol/g_{cat}$]	Strong sites [$\mu mol/g_{cat}$]
Ni-MFI(25)	854	278	0,38	500	0,62	323	531
Ni-MFI(50)	695	282	0,46	546	0,54	322	373
Ni-BEA(25)	1382	292	0,48	490	0,52	668	714
Ni-BEA(50)	1247	301	0,54	537	0,44	669	548

[a] Temperatura di massimo desorbimento di NH_3 tra 100 e 400 °C
[b] Frazione siti acidi tra 100 e 400 °C (weak sites)
[c] Temperatura di massimo desorbimento di NH_3 tra 400 e 850 °C
[d] Fractional population of sites between 300 and 500 °C (strong sites)

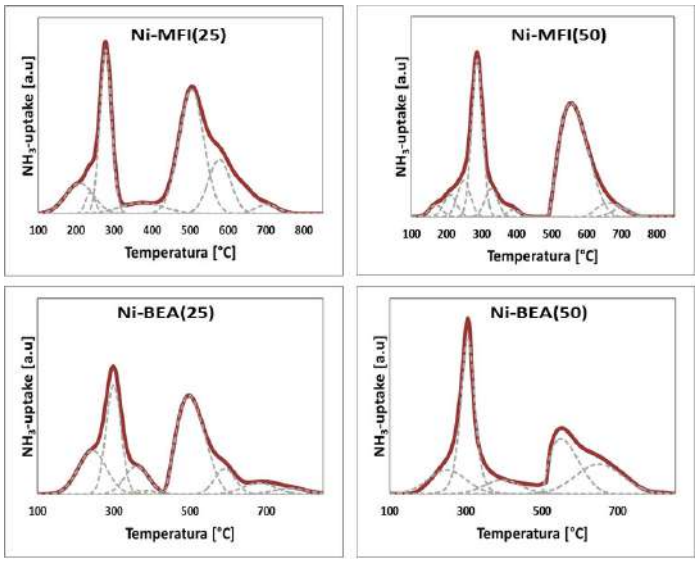


Figura 76. Analisi TPD con relative deconvoluzioni

I campioni con struttura BEA possiedono una maggiore acidità rispetto ai campioni con struttura MFI, indipendentemente dal contenuto di alluminio. Le due strutture esibiscono, però, alcune caratteristiche comuni. Risulta infatti evidente che all'aumentare del contenuto di alluminio aumenta la quantità dei siti acidi totali. Questo aumento è dovuto principalmente, però, all'aumento dei siti acidi forti, mentre il contenuto dei siti acidi deboli risulta praticamente costante al variare del rapporto Si/Al.

E' possibile fare ulteriori considerazioni circa la forza dei siti acidi. Al diminuire del contenuto di alluminio le temperature di massimo desorbimento aumentano, con maggiore evidenza per i siti acidi forti. In base a questo risultato si può concludere che al diminuire del contenuto di alluminio diminuisce la quantità dei siti acidi forti ma ne aumenta la forza.

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

Le attività svolte da ENEA nell'ambito del PAR 2014 della RSE con specifico riferimento a questo obiettivo hanno riguardato in particolare:

1. lo sviluppo e sperimentazione su dispositivi di laboratorio di processi chimico-fisici o biologici innovativi per l'abbattimento dell'acido solfidrico presente nel biogas;
2. lo sviluppo e verifica su apparati sperimentali di piccola taglia di nuovi sistemi per la rimozione selettiva della CO_2 dal biogas basati sull'impiego di ammine in fase organica e sulla formazione/dissociazione selettiva di gas idrati;
3. l'ottimizzazione del processo di produzione di biometano a partire da syngas sull'impianto pilota di metanazione BIOSNG.

b.1 Processi chimico-fisici o biologici per l'abbattimento dell'acido solfidrico presente nel biogas

Catalizzatori a base di V_2O_5/CeO_2 per l'ossidazione parziale selettiva dell'H_2S presente nel biogas

Nel corso della precedente annualità si è verificato che il catalizzatore a base di V_2O_5/CeO_2 con un carico di V_2O_5 pari al 20% è molto selettivo verso l'ossidazione dell'H_2S a zolfo elementare anche a basse temperature, operando in modo da ottenere tempi di contatto sufficientemente lunghi, con un'efficienza di conversione superiore al 98% (T = 80 °C , τ = 240 ms) e una buona stabilità fino a 20 ore di prova. Per tempi più lunghi, invece, è stata osservata la tendenza alla graduale disattivazione, probabilmente legata alla condensazione dello zolfo nelle porosità del catalizzatore, dovuta alla bassa temperatura di reazione.

Sulla base dei risultati ottenuti, nella presente annualità, presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno, è stata oggetto di indagine la possibilità di lavorare a bassa temperatura (T < 150 °C) e con correnti più diluite in H_2S, con concentrazioni inferiori a 500 ppm, continuando l'attività di sviluppo e di validazione dei processi a secco sull'abbattimento catalitico dell'H_2S, nell'ipotesi di trattare gli off-gas

ricchi in CO_2 [rapporto RdS/PAR2014/152]. In tal senso, la ricerca è stata approfondita in modo da verificare l'efficacia di questa tecnologia come possibile soluzione al problema della richiesta di una maggiore selettività verso l'ossidazione dell'H_2S a S e non a SO_2, estendendo l'intervallo di operatività del catalizzatore con gas simulati ed elevato contenuto di CO_2 ed un rapporto CO_2/H_2S intorno a 1000, rappresentativo della composizione di una corrente gassosa uscente da una sezione di upgrading del biogas. La corrente di off-gas è stata simulata con un gas contenente CO_2, CH_4, H_2S e saturata in acqua a temperatura ambiente.

Per la conduzione di tali prove è stato modificato il preesistente apparato di laboratorio, aggiungendo 3 linee distinte, rispettivamente per l'alimentazione del metano, dell'anidride carbonica e dell'acqua.

Le prime prove sperimentali sono state condotte in presenza di CO_2, al fine di valutarne il possibile effetto ossidante, variando la concentrazione in ingresso tra il 10 e il 50% in volume. Successivamente, è stato valutato l'effetto dei principali componenti del biogas (CH_4 e CO_2) alla temperatura di 150 °C. Nell'ottica di voler studiare le prestazioni del catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2 a temperature inferiori a 150 °C e con una concentrazione di H_2S in ingresso più diluita (< 500 ppm), sono state successivamente condotte prove alla temperatura di 100 °C. Infine, si è proceduto al dimensionamento del reattore per trattare una portata di biogas pari a 1 m^3/h, e alla valutazione del fabbisogno energetico richiesto per riscaldare la corrente di biogas fino alla temperatura di reazione di 100-150 °C.

Per la preparazione dei catalizzatori a base di vanadio/ceria è stato impiegato come precursore della fase attiva il metavanadato di ammonio (NH_4VO_3) e come supporto l'ossido di cerio (CeO_2). Sono stati preparati catalizzatori aventi due carichi di fase attiva pari al 20 e al 50% in peso di V_2O_5.

I catalizzatori sono stati preparati mediante l'impregnazione ad umido del supporto, dopo questa fase, sono stati essiccati in stufa alla temperatura di 120 °C per una notte e calcinati alla temperatura di 400 °C per 3 ore. Dopo la fase di calcinazione, i catalizzatori sono stati macinati al fine di ottenere la granulometria desiderata di 38-180 µm. I campioni sono stati successivamente caratterizzati mediante diffrazione con i raggi X e determinazione dellarea superficiale specifica.

Le prove sono state condotte utilizzando un impianto da laboratorio, descritto nel rapporto RdS/PAR2014/152.

Formulazione ottimale del catalizzatore V_2O_5/CeO_2

L'attenzione è stata rivolta alla preparazione di catalizzatori con differenti carichi di fase attiva (variabili tra il 2,55 e il 50% di V_2O_5) al fine di individuarne il carico ottimale, che garantisse buone prestazioni in termini di attività catalitica, selettività ad SO_2 e durata.

Nelle Figure 77 e 78 è riportato l'effetto del differente carico di fase attiva rispetto alla conversione di H_2S e alla selettività ad SO_2.

L'effetto del carico di V_2O_5 è stato studiato alla più bassa temperatura di reazione per la quale non sono stati osservati fenomeni di disattivazione da parte dello zolfo nei pori del supporto. I risultati mostrano chiaramente che, all'aumentare del carico di vanadio dal 2,55 al 50%, è stato ottenuto un leggero incremento della conversione di H_2S, a differenza della selettività ad SO_2 che ha evidenziato un andamento decrescente con il carico.

In particolare, si può notare che la conversione di H_2S è superiore al 95% per tutti i campioni, ad eccezione del catalizzatore avente il più basso carico di V_2O_5 (2,55%), per il quale la conversione ha raggiunto un valore pari al 90%.

E' importante sottolineare che il catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2 ha mostrato la più bassa tendenza verso la formazione di SO_2 rispetto agli altri campioni a più basso carico di vanadio, per i quali la selettività è stata circa pari al 2%. Un'inversione di tendenza, invece, è stata riscontrata con il catalizzatore avente il carico più alto di specie attiva, che ha esibito una modesta selettività ad SO_2 (~10%) sempre a T = 150°C.

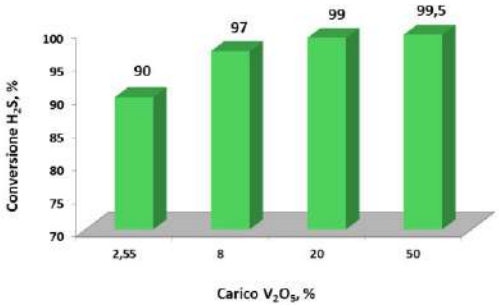


Figura 77. Conversione di H_2S al variare del carico di V_2O_5 a T = 150 °C

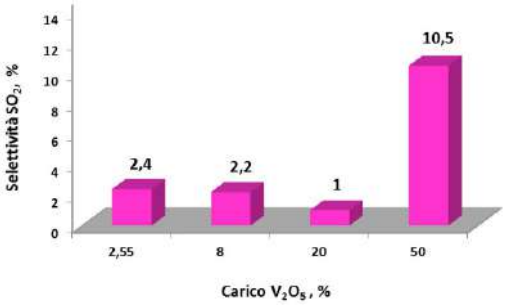


Figura 78. Selettività ad SO_2 al variare del carico di V_2O_5 a T = 150 °C

L'elevata attività e la bassissima selettività ad SO_2 ottenuta con il catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2 possono essere dovute alla presenza di forme cristalline di V_2O_5, particolarmente attive e selettive verso la reazione di ossidazione parziale di H_2S. L'aumento di selettività ad SO_2 osservata per il campione avente un carico nominale di vanadio pari al 50% è invece dovuto probabilmente ad una maggiore segregazione di V_2O_5 cristallino, come confermato anche dagli spettri di diffrazione XRD (Figura 79)

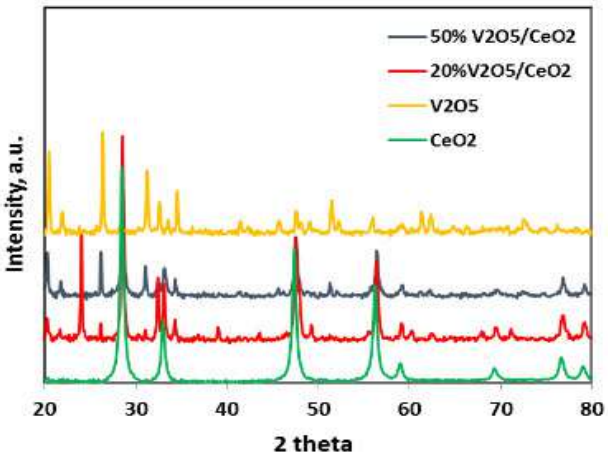


Figura 79. Spettri di diffrazione del supporto, della fase attiva e dei catalizzatori V/Ce

Gli spettri relativi all'ossido di cerio evidenziano la struttura cubica fluoritica tipica di questo ossido. I picchi caratteristici della ceria sono osservati a $2\theta \approx 28{,}3°$, $32{,}8°$, $47{,}3°$, $56{,}1°$. I picchi caratteristici del V_2O_5 sono sempre più visibili con l'aumento del carico di vanadio. Come riportato anche in letteratura, quando il carico di vanadio è basso e fino al 10% in peso, non si osserva nessun picco riconducibile a V_2O_5 cristallino, indicando così un'elevata dispersione delle specie di vanadio sul supporto. Nel campione con carico di vanadio nominale al 20% appaiono i picchi caratteristici della specie $CeVO_4$ (vanadato di cerio), visibili a $2\theta \approx 24°$, $32{,}4°$, $33{,}1°$.

Il vanadato di cerio si forma, per interazione tra il supporto e le specie VO_x, sulla superficie del catalizzatore secondo la reazione:

$$CeO_{2(s)} + 0{,}5\ V_2O_{5(g)} \rightarrow CeVO_{4(s)} + 0{,}5\ O_{2(g)}$$

Come riportato nella letteratura corrente, la formazione del $CeVO_4$ è dovuta a vari fattori, tra cui la temperatura di calcinazione e il carico di vanadio. Nonostante ciò, per il campione al 50% in peso, non si osserva nessun picco riconducibile al vanadato di cerio, mostrando che la reazione sopra riportata non è avvenuta sulla superficie del catalizzatore.

Prove di attività catalitica: Influenza dei principali componenti del biogas

L'andamento della prova di attività catalitica del catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2 alla temperatura di 150 °C è riportato in Figura b.1.5.

La corrente di alimentazione costituita da H_2S e O_2, inizialmente nella posizione di by-pass, è inviata al reattore dopo circa 10 minuti: da questo momento è immediatamente possibile osservare un calo significativo della concentrazione dell'H_2S e formazione dell'SO_2.

La concentrazione dell'H_2S raggiunge valori stazionari (≈7ppm) dopo pochi minuti dall'inizio della prova, e lo stesso vale per l'SO_2, che raggiunge una concentrazione finale di circa 2 ppm. Il catalizzatore ha mostrato una buona attività e stabilità per tutta la durata della prova.

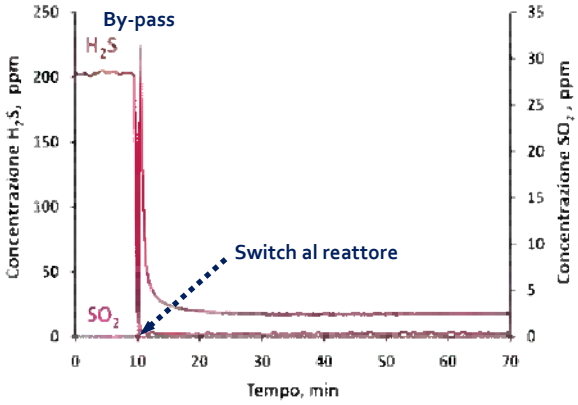


Figura 80. Prova di attività catalitica del catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2 a T = 150 °C

In Figura 81 sono riportati i valori di conversione dell'H_2S e la concentrazione di SO_2 al variare della concentrazione di CO_2. Dal grafico si può notare che, per qualsiasi valore di concentrazione di CO_2, sia la conversione dell'H_2S che la concentrazione di SO_2 hanno esibito gli stessi valori della prova in cui non è alimentata CO_2 nel sistema.

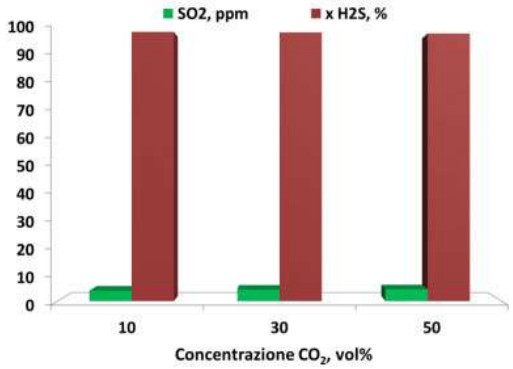


Figura 81. Effetto della concentrazione di CO_2 sulle prestazioni catalitiche (SO_2, x H_2S) a T = 150 °C

Successivamente, è stato studiato l'effetto dell'H_2O, alimentando una corrente a temperatura ambiente (31 °C) pari all'1,33% in volume. I profili di concentrazione di H_2S, SO_2 e H_2O sono mostrati nella Figura 82. Dalla figura si osserva che la concentrazione dell'acqua rimane stabile al valore iniziale. La conversione dell'H_2S resta invariata rispetto a quella ottenuta in assenza di acqua (≈99%), mentre la selettività aumenta leggermente assumendo un valore pari a 0,8%. Questo risultato, corrispondente ad una concentrazione di SO_2 di 4 ppm, può essere dovuto probabilmente all'effetto ossidante dell'H_2O.

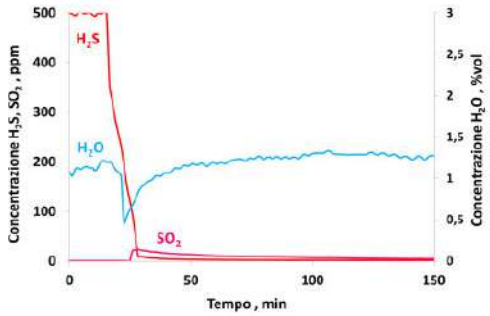


Figura 82. Prova di attività catalitica con H_2O a T = 150 °C

L'effetto della concentrazione di H_2S in ingresso, variabile tra 80 e 500 ppm, è stato studiato alla temperatura di 100 e 150 °C. Le prove sono state effettuate lavorando con un rapporto di alimentazione (O_2/H_2S) stechiometrico. I risultati sono riportati in termini di conversione di H_2S e selettività ad SO_2 in funzione della concentrazione iniziale di H_2S per entrambe le temperature.

Alla temperatura di 100 °C (Figura 83) la conversione è totale solo per le condizioni più diluite, corrispondenti a 80 e 100 ppm di H_2S in ingresso, mentre diminuisce per concentrazioni superiori a 200 ppm. In particolare, la conversione risulta inferiore all'80% alimentando 500 ppm di H_2S. Quest'ultimo risultato è dovuto al fatto che, lavorando con concentrazioni più elevate (200-500 ppm), la quantità di zolfo prodotto è maggiore e, alla temperatura di 100 °C, la sua pressione parziale è tale per cui resta intrappolato nei pori del supporto determinandone la disattivazione nel tempo e il peggioramento dell'attività catalitica.

Al contrario, alla temperatura di 150 °C, la conversione di H_2S è sempre superiore al 99% e non si osservano fenomeni di disattivazione (Figura 83) perché lo zolfo riesce ad abbandonare la superficie del catalizzatore.

Per quanto riguarda la selettività ad SO_2, il sistema risulta meno selettivo a zolfo a temperatura più alta (T = 150 °C), soprattutto nelle condizioni più diluite (80-100 ppm) per le quali il valore è compreso tra il 3 e 4%. Il valore di selettività risulta pari all'1% con 500 ppm di H_2S in ingresso. A temperatura più bassa (T = 100 °C), la concentrazione di SO_2, indipendentemente dalla concentrazione di H_2S in ingresso, è circa pari a 2 ppm. La selettività ad SO_2 assume un valore piuttosto costante e pari all'1%, tranne nella condizione in cui la concentrazione di H_2S alimentata è pari ad 80 ppm, per la quale il valore è pari a 2,5%.

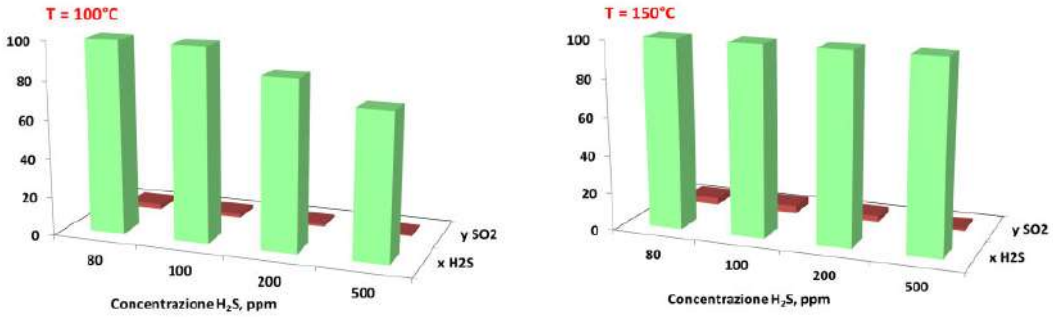


Figura 83. Effetto della concentrazione di H_2S su conversione (x H_2S) e selettività ad SO_2 (y SO_2) a T = 100 e 150 °C

Di seguito sono riportati i valori di concentrazione di SO_2 e la rispettiva selettività in funzione dell'H_2S alimentata e della temperatura impiegata (Tabelle 37 e 38).

Tabella 37. Concentrazione e selettività ad SO_2 a T = 100 °C

H_2S in ingresso ,ppm	SO_2 ,ppm	Selettività ad SO_2, %
80	2	2,5
100	1,8	1,8
200	2	1,1
500	2,3	0,5

Tabella 38. - Concentrazione e selettività ad SO_2 a T = 150 °C

H_2S in ingresso, ppm	SO_2, ppm	Selettività ad SO_2, %
80	3	3,7
100	4	4,0
200	6,5	3,2
500	6,5	1,3

Come si può osservare, alla temperatura di 150 °C, condizione per la quale è termodinamicamente più favorita la formazione di SO_2 che non a 100 °C, la concentrazione varia tra 3 ppm e 6,5 ppm, mentre a temperatura più bassa il valore è ridotto di circa un terzo.

In base ai risultati conseguiti, può essere conveniente lavorare alla temperatura di 100 °C, impiegando correnti più diluite in H_2S. Nel caso di correnti contenenti almeno 200 ppm di H_2S, è necessario lavorare alla temperatura di 150 °C per evitare fenomeni di disattivazione da parte dello zolfo. In ogni caso è importante tener presente che, a parità di conversione di H_2S, la selettività ad SO_2 a 100 °C è circa del 4%, mentre a 150 °C è pari solo all'1%.

Dimensionamento del reattore catalitico

Il dimensionamento del reattore è stato effettuato per trattare una portata di biogas pari a 1 m^3/h. Prima del dimensionamento del reattore, si è proceduto all'individuazione delle dimensioni del catalizzatore strutturato a forma di monolite a nido d'ape. Le specifiche del *carrier* a base di cordierite ($2MgO\text{-}5SiO_2\text{-}2Al_2O_3$) sul quale sono state eseguiti i calcoli sono riportate in Tabella 39.

Tabella 39. Specifiche del *carrier* strutturato

Larghezza canale, cm	0,15
Spessore canale, mm	1,10
Spessore parete, mm	0,23
Densità di celle, cpsi	226

La sezione trasversale è stata calcolata fissando la lunghezza del monolite e tenendo conto che la velocità del gas dev'essere circa pari a 28 cm/s al fine di evitare problemi di diffusione esterna.

Le dimensioni del monolite a base cilindrica da alloggiare nel reattore sono riportate in Tabella 40.

Tabella 40. Dimensioni del catalizzatore strutturato

Diametro, cm	3,6
Lunghezza, cm	10
Volume monolite, cm^3	102
Numero di canali	444

Il tempo di contatto, ottenuto come rapporto tra il volume di monolite e la portata volumetrica totale (1 m^3/h), è risultato essere pari a circa 370 ms. Il volume di catalizzatore strutturato in forma di monolite in grado di trattare una portata di biogas pari a 1 m^3/h è quindi di circa 100 cm^3.

Valutazione della richiesta energetica per il preriscaldamento della corrente da 25 °C a 150 °C

L'energia richiesta per riscaldare la corrente di 1m^3/h di biogas proveniente da un digestore anaerobico fino alla temperatura di reazione pari a 150 °C è circa pari a 50 W.

La potenza termica è stata valutata mediante la seguente formula seguente:

$$Q = F \cdot \int_{298}^{423} cp\ medio \cdot dT$$

dove:

- *Q* è la potenza termica richiesta [*W*]
- *F* è la portata molare della corrente di biogas [moli/s]
- *Cp medio* è il calore specifico medio della miscela reagente (H_2S, O_2) [J $moli^{-1}$ K^{-1}]

Sviluppo di un processo per l'abbattimento dell'H_2S nel biogas mediante fotobioreattore a LED

Presso i laboratori dell'ENEA sono proseguite le attività, avviate nel corso delle precedenti annualità, finalizzate allo sviluppo e alla verifica sperimentale del funzionamento di un fotobioreattore (FBR) per l'abbattimento dell'idrogeno solforato (H_2S) presente nel biogas proveniente da un impianto pilota di digestione anaerobica [rapporto RdS/PAR2014/151].

Il fotobioreattore si basa sul processo di fotosintesi anossigenica, operata dal batterio *Chlorobium limicola*, mediante il quale l'H_2S viene convertito in zolfo elementare con la reazione:

$$2nH_2S + nCO_2 + h\nu \rightarrow 2nS + n(CH_2O) + nH_2O$$

Sulla base dello spettro di assorbimento di *C. limicola*, è stato condotto un esperimento per testare l'effetto delle singole lunghezze d'onda, o di combinazioni di esse, sulla capacità di rimozione dell'H_2S da parte delle colture del batterio in differenti condizioni di crescita.

Oltre alla determinazione dei composti dello zolfo, si è voluto monitorare anche l'incremento della batterioclorofilla *c* (BChl *c*) in risposta alla diversa esposizione alla luce. La BChl *c* è infatti il pigmento responsabile della cattura della luce la cui energia consente il processo fotosintetico ed ha un picco di assorbimento maggiore intorno ai 760 nm ed uno inferiore intorno ai 400 nm. *C. limicola* è dotato anche di carotenoidi, pigmenti accessori, che in particolari condizioni di illuminazione possono contribuire all'assorbimento della radiazione luminosa intorno a 400-450 nm.

L'esperimento è stato condotto utilizzando provette tipo Hungate (15 mL) che consentono di mantenere il sistema in condizioni anaerobiche. Tutte le condizioni sperimentali sono state testate in triplicato. L'efficienza del processo viene indicata dal rapporto tra il tasso di abbattimento dell'H_2S e l'irraggiamento. La Figura 83 mostra i valori di efficienza ottenuti e l'incremento in BChl *c* registrato.

Con questo esperimento è stato provato che illuminando le colture batteriche con una specifica lunghezza d'onda si possono ottenere i migliori risultati di rimozione del solfuro. Infatti, come mostrato in Figura 84, illuminando con LED aventi picco di emissione a 770 nm si ottiene un abbattimento di circa 6,58 mg h^{-1} L^{-1} W m^{-2}, maggiore che nelle altre condizioni sperimentali in cui vengono testate singolarmente altre lunghezze d'onda e loro combinazioni con l'intento di riprodurre l'intero spettro di assorbimento di *C. limicola*.

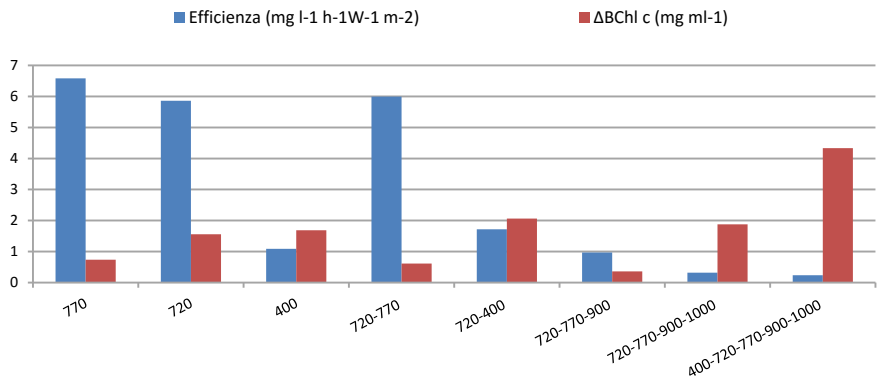


Figura 84. Efficienza di processo e contenuto di BChl c nelle diverse condizioni sperimentali di illuminazione (nm)

Inoltre, l'incremento della BChl *c* non produce un incremento di efficienza del sistema. I risultati ottenuti mostrano come il contenuto di BChl *c* aumenti nelle condizioni di illuminazione dove vengono associate lunghezze d'onda distanti dal principale picco di assorbimento della BChl *c*. Le luci del violetto (400 nm) hanno effetto nella rimozione del solfuro, ma sono poco efficienti, mentre quelle del vicino infrarosso (900-1000 nm) non hanno alcun effetto sul processo di rimozione.

E' stata testata anche l'illuminazione a 810 nm, mediante LED installati successivamente nell'illuminatore, per verificare l'efficacia di una stimolazione diretta della BChl *a* che assorbe maggiormente proprio a questa lunghezza d'onda. Tali prove non hanno mostrato un contributo significativo di questa lunghezza d'onda al processo fotosintetico e, pertanto, la lunghezza d'onda 770 nm è stata scelta per l'esperimento in continuo con il FBR.

Prove di funzionamento in continuo di un fotobioreattore

Al fine di ottenere la rimozione completa dell'H_2S, è stata studiata una nuova geometria di FBR con l'intento di massimizzare il rapporto tra la superficie e il volume della coltura esposta alla luce, provvedendo inoltre all'inserimento di un sistema di decantazione e rimozione dello zolfo elementare.

Il FBR è costituito da una spirale tubolare di Teflon®-PFA (Perfluoroalkoxy) (volume 700 mL, diametro 0,8 cm, lunghezza 14 m) avvolta su un supporto cilindrico trasparente e posta nell'illuminatore con i soli LED 770 nm accesi, che forniscono un'irradianza pari a 0,5 W m^{-2}. Il sistema di decantazione dello zolfo elementare è costituito da un corpo cilindrico in pyrex con fondo a imbuto con alla base una valvola di scarico del precipitato (volume 750 mL). La coltura batterica viene ricircolata nel FBR mediante pompa peristaltica con un HRT di 10-15 minuti e rientra nella spirale dopo aver attraversato la sezione di decantazione. L'intero apparato sperimentale è mostrato di seguito in Figura 85.

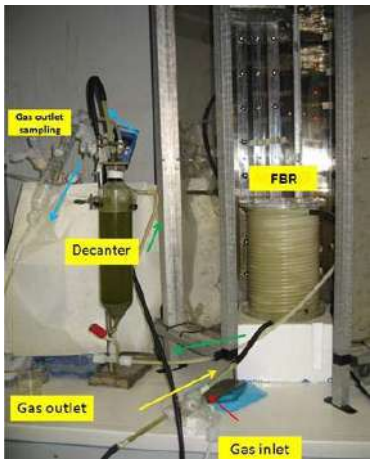


Figura 85. Fotobioreattore

E' stato eseguito un test preliminare della durata di 30 giorni, in condizioni di non sterilità, con biogas sintetico contenente 2000 ppm di H_2S (40 mL min^{-1}) ed utilizzando una coltura pura di *C. limicola*. Il test ha mostrato una elevata stabilità producendo come unico prodotto di reazione zolfo elementare. Alla fine del test un'aliquota della coltura è stata utilizzata come inoculo del FBR per un esperimento volto a verificare la capacità di abbattimento dell'H_2S presente in un biogas reale. Il biogas fornito al sistema proviene dall'impianto pilota di DMM6000 del Centro ENEA della Casaccia ed è costituito da: CH_4 65-67%, CO_2 32-35%, O_2 0,1% e H_2S circa 400 ppm.

E' stata quindi effettuata una prima prova con alimentazione di biogas reale della durata di 15 giorni, in cui sono state testate delle variazioni di flusso del biogas e di irradianza fornita (Figura 86). Per tutta la durata dell'esperimento non è stato modificato il terreno di coltura.

Alimentando il FBR con flusso di biogas a 50 mL min^{-1} e portando l'irradianza a 0,38 Wm^{-2} (LED al 75%) si ottiene un abbattimento medio del 98% (2,3 ppm di H_2S in uscita dal FBR), con un'efficienza pari a 6,36 (mg L^{-1} h^{-1})(W m^{-2}). Il sistema risponde alle variazioni di flusso di biogas in entrata e di irradianza con un aumento della concentrazione di H_2S in uscita (70-98 e 289-358 h).

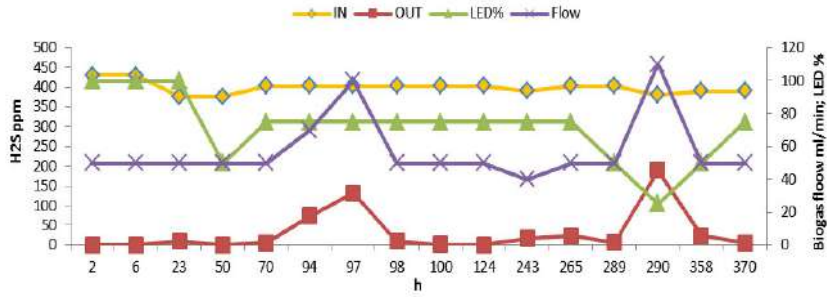


Figura 86. Dati relativi al FBR nel primo esperimento. Concentrazione dell'H_2S (ppm) del biogas in entrata nel FBR (IN), concentrazione dell'H_2S (ppm) del biogas in uscita nel FBR (OUT), % di utilizzo dei LED e flusso (mL min-1) di biogas trattato (Flow)

Nel secondo giorno di funzionamento, è stata effettuata una "prova di buio" a LED spenti per 24 h, al termine della quale sono stati rilevati 100 ppm di H_2S in uscita dal FBR e 0,03 mM di solfuri disciolti nel terreno, confermando che in assenza di luce l'abbattimento dell'H_2S non avviene.

La sperimentazione si è fermata alle 370 h in conseguenza di un guasto alla rete elettrica del CR Casaccia che ha portato alla morte della coltura batterica. Pertanto non si può evincere se la funzionalità osservata alle 370 h, dove il flusso era stato ripristinato a 50 mL min^{-1}, con un corrispondente abbattimento del 99%, sarebbe stata mantenuta dal sistema.

Comunque, la prova ha fornito importanti risposte circa alcuni parametri fondamentali di funzionamento utili a migliorare la configurazione operativa del processo. Nel corso dell'esperimento, oltre alla formazione di zolfo, si è notato un rilevante incremento dei solfati da 330 a circa 950 mg L^{-1}. Tale dato potrebbe essere dovuto sia ad una condizione di stress di *C. limicola* che, in carenza di H_2S ed eccesso di luce, tende ad ossidare lo zolfo elementare prodotto, sia all'azione di qualche altro batterio presente nel terreno di coltura anch'esso coinvolto nel metabolismo dello zolfo.

Le analisi molecolari per il monitoraggio della coltura batterica durante il periodo sperimentale sono state eseguite per valutarne la stabilità in condizioni di non sterilità. Il biogas in entrata nel sistema può infatti contenere cellule o spore che possono contaminare la coltura nonostante il terreno utilizzato sia "minimo" per quel che riguarda il contenuto in nutrienti, considerata l'autotrofia di *C. limicola*.

E' stata eseguita la DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) della porzione ipervariabile V1-V3 del gene 16SrDNA, amplificato mediante PCR (Polymerase Chain Reaction). La Figura 87 mostra come la coltura utilizzata per questo esperimento non sia già in partenza una coltura pura. Infatti oltre alla presenza di C. limicola si osserva una ulteriore banda, identificata come Epsilonproteobacteria. In questa classe filogenetica sono presenti batteri chemiolitoautotrofi con un metabolismo caratterizzato dall'ossidazione dell'H_2S a solfato, e tale presenza potrebbe giustificare l'aumento dei solfati riscontrati durante il periodo sperimentale. La terza banda che si evidenzia alla fine dell'esperimento è stata identificata ed è risultata appartenente alla famiglia delle *Xanthomonadaceae*. In tale famiglia sono raggruppati batteri aerobi solfato riduttori. La presenza di questa popolazione microbica è probabilmente riconducibile al biogas derivante dall'impianto di DA e la sua sopravvivenza è resa possibile dalla minima percentuale di O_2 in esso contenuta. Il ruolo di questi due batteri dovrà essere ulteriormente indagato attraverso l'isolamento che permetterà la loro identificazione a livello di specie.

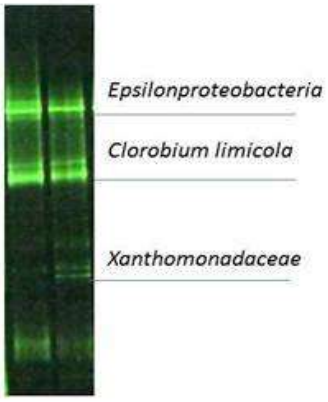


Figura 87. DGGE del frammento ipervariabile V1-V3 del 16Sr DNA amplificato mediante PCR

Utilizzando lo stesso inoculo della prova precedente, è stato effettuato un secondo esperimento per verificare la replicabilità del processo. Vengono riportati i dati raccolti nei primi 20 giorni (Figura 88) perché anche in questo caso, per un'interruzione improvvisa della fornitura di energia elettrica, l'esperimento è stato interrotto.

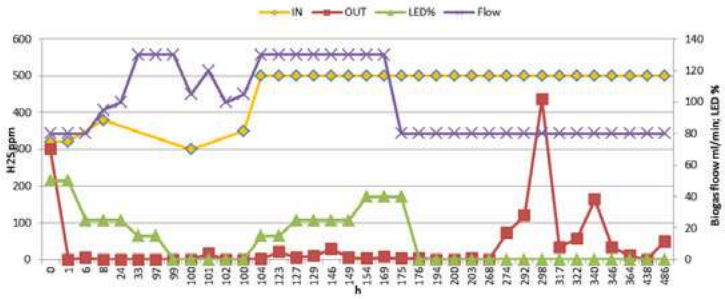


Figura 88. Dati relativi al FBR nel secondo esperimento. Concentrazione dell'H_2S (ppm) nel biogas in entrata nel FBR (IN), concentrazione dell'H_2S (ppm) nel biogas in uscita nel FBR (OUT), % di utilizzo dei LED e flusso (mL min^{-1}) di biogas trattato (Flow)

In questa seconda prova si è voluto testare il sistema diminuendo l'irradianza fornita, iniziando con i LED accesi al 50% (0,25 Wm^{-2}) e aumentando il flusso di biogas trattato partendo da 80 mL min^{-1}. Dopo aver osservato un abbattimento totale nelle prime ore (0-6 ore), si è portato il flusso del biogas a 130 mL min^{-1} e gradualmente ridotta l'illuminazione portandola da 0 alle 99 ore per 5 ore. In queste ore di buio il sistema continua a mostrare abbattimento dell'H_2S, registrando valori tra 0 e 17 ppm nel biogas in uscita.

Fino alle 104 ore il sistema ha lavorato con il biogas proveniente dall'impianto di DA, poi per motivi tecnici si è dovuto proseguire con biogas sintetico contenente 500 ppm di H_2S attaccando il sistema ad una bombola. Dalle 104 ore alle 175 ore è stata progressivamente aumentata l'irradianza fornita portando i LED prima al 15%, poi al 25% ed infine al 40% (rispettivamente 0,075; 0,125; 0,2 Wm^{-2}) e si è innalzato il flusso a 130 mL min^{-1}.

In questa fase sperimentale si è osservato un abbattimento incompleto, trovando ancora dell'H_2S in uscita dal sistema (2-29 ppm), cosa che sembra indicare uno scarso effetto delle luci sul processo e come se in questa fase sperimentale la presenza del microrganismo appartenente agli *Epsilonproteobacteria* fosse determinante. Pertanto, si è nuovamente testato il sistema in condizioni di buio fino alla fine dell'esperimento. In una prima fase si è osservato un abbattimento totale (176-268 ore) che è andato poi a diminuire progressivamente. La concentrazione dei solfati nel brodo di coltura è aumentata partendo da 215 fino ad arrivare a 1257 ppm alle 298 ore, momento in cui si è osservata assenza di abbattimento (436 ppm di H_2S in uscita). Questo momento indica la fine dell'esperimento fed batch, in cui il biogas è stato fornito al sistema senza rinnovare il terreno di coltura, pertanto si è deciso di fare un refeed di terreno fresco (400 mL) eliminando una parte di coltura esausta. Dopo tale refeed il sistema ha ricominciato ad operare ed il processo di abbattimento è ripreso, seppure in maniera non costante, presentando delle oscillazioni nella concentrazione di H_2S in uscita.

In conclusione si può affermare che le modifiche attuate al FBR, il cambio di geometria e l'inserimento del sistema di decantazione, hanno consentito di aumentare l'efficienza di processo. Infatti, rispetto a quanto riportato nella precedente annualità, dove si è testato un FBR di tipo CSTR (Continuous Stirred Reactor), è stato possibile aumentare il flusso di biogas da trattare e ridurre considerevolmente l'irradianza fornita con i LED.

Confrontando questi dati con quelli ottenuti in precedenza si è incrementato il flusso di biogas trattato da 20 a 50 mL min^{-1} e si è diminuita la quantità di luce fornita passando da 1 a 0,38 W m^{-2}, si è incrementato il tempo sperimentale da 5 a 15 giorni mantenendo il terreno di coltura iniziale, testando il FBR per un periodo più lungo senza perdere l'efficienza di abbattimento del solfuro.

Il secondo esperimento, per la verifica della replicabilità del processo, ha dato risultati che ancora sono oggetto di interpretazione in quanto nella coltura microbica, oltre a *C. limicola*, sono state individuate altre popolazioni batteriche il cui ruolo nel processo di trasformazione dei composti solforati dovrà essere ulteriormente indagato.

In conclusione si può affermare che le modifiche attuate al FBR, il cambio di geometria e l'inserimento del sistema di decantazione, hanno consentito di aumentare l'efficienza di processo. Infatti, rispetto a quanto riportato nella precedente annualità, dove si è testato un FBR di tipo CSTR (Continuous Stirred Reactor), è stato possibile aumentare il flusso di biogas da trattare e ridurre considerevolmente l'irradianza fornita con i LED.

Confrontando questi dati con quelli ottenuti in precedenza si è incrementato il flusso di biogas trattato da 20 a 50 mL min^{-1} e si è diminuita la quantità di luce fornita passando da 1 a 0,38 W m^{-2}, si è incrementato il tempo sperimentale da 5 a 15 giorni mantenendo il terreno di coltura iniziale, testando il FBR per un periodo più lungo senza perdere l'efficienza di abbattimento del solfuro.

Il secondo esperimento, per la verifica della replicabilità del processo, ha dato risultati che ancora sono oggetto di

interpretazione in quanto nella coltura microbica, oltre a *C. limicola*, sono state individuate altre popolazioni batteriche il cui ruolo nel processo di trasformazione dei composti solforati dovrà essere ulteriormente indagato.

b.2 Nuovi sistemi per la rimozione selettiva della CO_2 dal biogas basati sull'impiego di ammine in fase organica e sulla formazione/dissociazione selettiva di gas idrati

Simulazione dinamica di un prototipo e analisi tecnico-economica di impianto *full-scale* per l'upgrading del biogas mediante assorbimento della CO_2 con soluzioni di AMP in solvente organico

Un'alternativa interessante al processo tradizionale di upgrading del biogas mediante assorbimento della CO_2 con soluzioni acquose di ammine è costituito da un processo di assorbimento con ammine in solvente organico perché, in questo modo, si può condurre la rigenerazione della soluzione amminica a temperatura più bassa, riducendo i consumi energetici e i problemi di corrosione.

Le attività svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente della Sapienza Università di Roma hanno portato ad individuare come particolarmente interessante il sistema ammina/solvente costituito dal 2-ammino-2-metil-1-propanolo (AMP) in miscele di glicol etilenico (EG)/n-propanolo (nP). Prove di laboratorio, effettuate nella precedente annualità, hanno evidenziato che con questo sistema si possono ottenere loading (moli di CO_2 assorbite/mole di AMP caricata) variabili tra il 50 e l'80%, mentre la rigenerazione della soluzione può essere condotta operando nel range 70-90 °C.

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato sviluppato nel corso del 2015 un modello di simulazione dinamica di un processo semi-batch comprendente due unità, funzionanti alternativamente in fase di assorbimento e di rigenerazione [rapporto RdS/PAR2014/155]. La modellazione è stata effettuata con riferimento al prototipo realizzato presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA della Casaccia, per trattare circa 90 NL/h di biogas con un contenuto di CO_2 di circa il 35%.

Il modello permette, fissate le condizioni operative, di prevedere l'andamento nel tempo della concentrazione di CO_2 nel gas uscente, della concentrazione di AMP nella fase liquida, della temperatura nel reattore sia in fase di assorbimento che in fase di rigenerazione e consente di definire le modalità di conduzione del processo per ottenere un gas (biometano) con un contenuto di CO_2 inferiore al 3%, idoneo per l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale. Lo schema del processo simulato è riportato nella Figura 89.

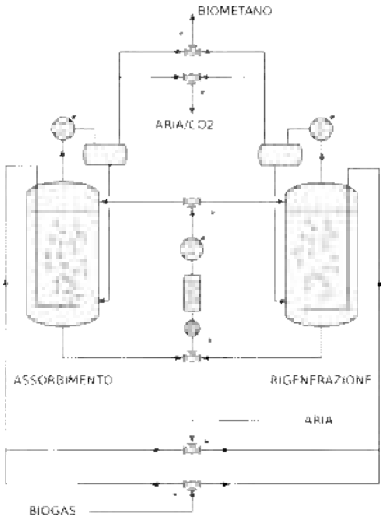


Figura 89. Schema del processo di upgrading

Nel sistema sono presenti due unità inizialmente caricate con la soluzione di AMP in EG/nP. Nell'unità funzionante in fase di assorbimento viene fatto gorgogliare il biogas da trattare ottenendo in uscita un gas con basso contenuto di CO_2; la fase di assorbimento viene interrotta quando la frazione molare media della CO_2 nel gas uscente raggiunge il valore massimo ammissibile per l'utilizzazione del gas come biometano. A questo punto, il biogas da trattare viene inviato alla seconda unità e la prima unità passa in fase di rigenerazione.

Nella fase di rigenerazione si provvede prima al riscaldamento della soluzione amminica mediante ricircolazione in un'unità di riscaldamento esterna; raggiunta la temperatura di progetto per la rigenerazione (nel range 70-90 °C) si interrompe il riscaldamento esterno e si invia nell'unità una corrente di gas inerte (aria) in modo da rimuovere la CO_2 prodotta dalla rigenerazione. Quando si è raggiunto il grado di rigenerazione fissato, si interrompe l'immissione di gas di stripping e si provvede al raffreddamento della soluzione amminica che dovrà nuovamente essere utilizzata in fase di assorbimento. Come per il riscaldamento, il raffreddamento viene realizzato mediante ricircolazione della soluzione in un'unità di scambio termico esterno.

Poiché il gas uscente dall'unità in assorbimento e, soprattutto, dall'unità in rigenerazione ad alta temperatura ha un contenuto significativo di nP, sulle linee del gas uscente devono essere posti due condensatori per condensare il solvente, che viene rinviato all'interno delle stessa unità di assorbimento o rigenerazione.

Impostazione del modello

L'assorbimento di anidride carbonica in soluzioni di 2-ammino-2-metil-1-propanolo (AMP) in solventi alcolici è stato generalmente descritto considerando il trasferimento della CO_2 dal gas al liquido, seguito dalla reazione della CO_2 con l'ammina e la formazione di carbammati (con un loading massimo di 0,5 moli di CO_2 per mole di ammina)

o di carbonati con l'alcool utilizzato come solvente (con un loading massimo pari a 1). In letteratura sono riportate diverse evidenze sperimentali che suggeriscono come la reazione di formazione del carbonato sia favorita in soluzioni di glicol: in particolare, Barzagli et al., dall'analisi di spettri NMR, hanno evidenziato che l'assorbimento della CO_2 è riconducibile prevalentemente alla formazione di carbonato del glicol etilenico (AC).

Alla luce dello studio effettuato e dei risultati della sperimentazione preliminare condotta, si ritiene opportuno descrivere l'assorbimento della CO_2 mediante la reazione reversibile:

$$CO_2 + AMP + EG \rightleftharpoons AC$$

con il consumo di una mole di ammina per mole di CO_2.

Per la reazione considerata, le condizioni di equilibrio sono quindi descritte mediante una costante di equilibrio data da:

$$K = \frac{c_{AC}}{p_{CO2} c_{AMP} x_{EG}}$$

dove p_{CO2} è la pressione parziale della CO_2 in fase gassosa, c_{AMP} la concentrazione di ammina libera, c_{AC} la concentrazione del prodotto di reazione (carbonato del glicool etilenico) e x_{EG} la frazione molare di glicool etilenico.

Simulazione del funzionamento del prototipo

Fase di assorbimento

In Figura 90 sono riportati i risultati della simulazione per il trattamento di una corrente di biogas di 1,37 NL/min con un contenuto di CO_2 del 35%, alimentato alla temperatura di 25 °C. Nel reattore si caricano 3 L di soluzione EG : nP = 1:1 v/v, con una AMP 3 M, inizialmente alla temperatura di 25 °C. I grafici evidenziano, per i singoli compartimenti, gli andamenti della composizione del gas uscente, della temperatura e della concentrazione di AMP disponibile per l'assorbimento, fino a completo esaurimento della soluzione amminica.

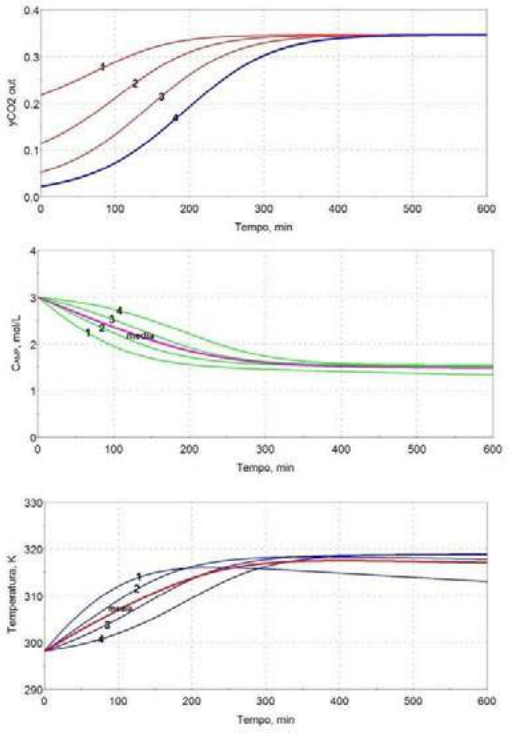


Figura 90. Simulazione della fase di assorbimento fino a esaurimento della soluzione amminica

Fase di rigenerazione

La fase di rigenerazione comprende una fase di riscaldamento della soluzione, nel corso della quale in alcune condizioni si può anche determinare uno sviluppo di gas, e una fase di stripping, in cui si immette nel reattore una corrente di aria per rimuovere la CO_2 formata dalla decomposizione del complesso ammina-CO_2.

In Figura 91 sono riportati i risultati della simulazione della fase di rigenerazione della soluzione ottenuta dopo 50 minuti di assorbimento (quando il gas prodotto ha un contenuto medio di CO_2 del 3%) operando, in fase di riscaldamento, con una portata di ricircolazione di 5,8 L/min e una potenza riscaldante di 0,4 kW, e in fase di stripping con una portata di aria di 8,4 NL/min

Ciclo completo

Per rendere continua la produzione di biometano, sono installate due unità operanti una in assorbimento e una in rigenerazione; è necessario pertanto individuare delle condizioni di funzionamento il cui la fase di assorbimento abbia la stessa durata dell'intera fase di rigenerazione (riscaldamento del liquido, stripping con aria, raffreddamento). In queste condizioni la fase di assorbimento lavora con una concentrazione di AMP libera variabile tra 2,98 e 2,65 M e una temperatura compresa tra 297 e 301,3 K. Nella fase di rigenerazione, che dura 10 minuti, il liquido viene riscaldato fino alla temperatura di 90 °C; la rigenerazione ha luogo prevalentemente nella fase di stripping della durata di 30 minuti e in questa fase si osserva un significativo raffreddamento della soluzione (fino a circa 60 °C). Il raffreddamento viene completato nei successivi 10 minuti, utilizzando acqua di raffreddamento a 18 °C.

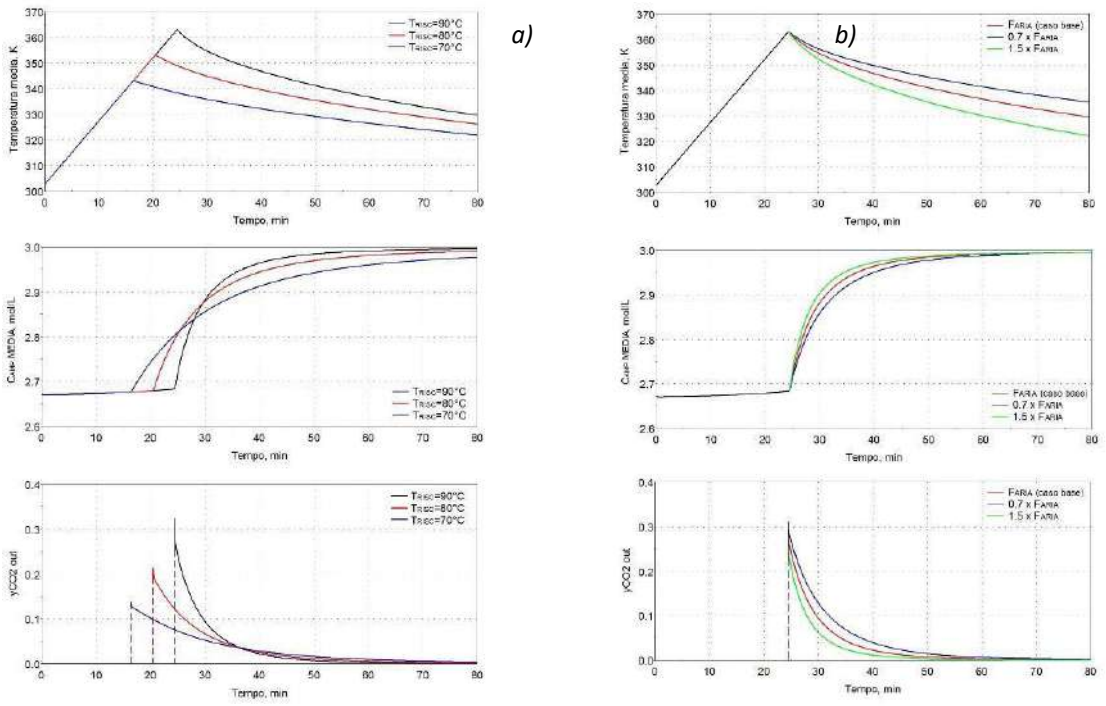


Figura 91. Simulazione della fase di riscaldamento e stripping per diversi valori della temperatura massima del liquido (a) e della portata di aria utilizzata (b)

Il sistema consente di ottenere in un ciclo 44 NL di gas a specifica per l'utilizzo come biometano, con carichi termici in fase di rigenerazione di 420 kJ per il riscaldamento della soluzione, di 289 kJ per il raffreddamento della soluzione e di 145 kJ per la condensazione del propanolo.

Sulla base dei risultati ottenuti per la simulazione dell'unità pilota è stata effettuata una progettazione di massima di due impianti per la potenzialità rispettivamente di 100 e 250 Nm^3/h (per la potenzialità di 500 Nm^3/h si può pensare di installare due unità da 250 Nm^3/h ciascuna). Nella progettazione sono stati cautelativamente assunti gli stessi valori del coefficiente di trasporto utilizzati per la simulazione del pilota. Inoltre, si è ritenuto opportuno scegliere condizioni operative per cui la rigenerazione venisse condotta nello stesso intervallo di temperatura testato nella sperimentazione della precedente annualità.

In queste condizioni si determina un consumo di energia elettrica per la compressione del biogas e dell'aria di stripping di circa 0,7 MJ/Nm^3 di biometano, a cui va aggiunto il consumo di energia elettrica del gruppo frigorifero per il raffreddamento e il recupero dei solventi del gas prodotto nella rigenerazione. Il consumo di energia termica per il riscaldamento della soluzione da rigenerare è di circa 9,5 MJ/Nm^3.

Si noti che i consumi energetici sono più elevati di quelli di un impianto basato sullo stesso processo, ma funzionante con una colonna di assorbimento e una di stripping operanti in continuo (ma simili a quelli di un impianto in cui la rigenerazione viene operata per distillazione). Nell'impianto semi-batch, infatti, non è possibile operare un recupero termico tra la soluzione calda alla fine della rigenerazione e la soluzione da riscaldare da inviare alla rigenerazione. Tuttavia, si ritiene che il sistema semi-batch possa essere più conveniente per impianti di piccola potenzialità per la maggiore semplicità di gestione. Inoltre, si può pensare che esistano notevoli margini di riduzione dei consumi energetici se si effettua una sperimentazione per individuare, in modo affidabile, le condizioni ottimali in cui condurre la rigenerazione e valutando la possibilità, come suggerito dalla simulazione, di ridurre la temperatura di rigenerazione e la portata di aria di stripping.

Test di un prototipo per la purificazione e upgrading del biogas prodotto da un impianto di digestione anaerobica

La fattibilità di alcuni sistemi di desolforazione e upgrading del biogas oggetto di studio e sperimentazione nel corso delle due precedenti annualità su sistemi in scala laboratorio, è stata testata su un sistema prototipo di condizionamento, costituito da dispositivi dimensionati per trattare un flusso di 2-4 NL/min di biogas reale,

prodotto da un digestore pilota (DMM6000) in attività presso i laboratori del Centro ENEA della Casaccia [rapporto RdS/PAR2014/153].

Il digestore anaerobico DM6000, del volume di 6 m^3, già operativo dall'estate 2013, è stato alimentato con gli scarti della mensa ENEA. Nella Tabella 41 sono riportate le condizioni operative del DMM6000 durante l'esercizio nel periodo settembre 2014 - settembre 2015 e le concentrazioni dei diversi gas nel biogas prodotto.

Tabella 41. Condizioni operative e biogas prodotto dal digestore anaerobico DMM6000

CONDIZIONI DI OPERATIVITA'	
Alimentazione	Scarti organici da mensa aziendale
Diluizione	Residuo secco 9%
Frequenza di alimentazione	2 ore
Quantità di biomassa	50-100 kg/sett
Temperatura biodigestore	36 C°
COMPOSIZIONE BIOGAS	
CH_4	60+/-2%
CO_2	40+/-2%
O_2	0,1+/-0,05%
H_2S	350-450 ppm
H_2	<2000 ppm

Il sistema prototipale utilizzato per il condizionamento del biogas è mostrato in Figura 92.

Il flusso di biogas proveniente dal digestore, saturo di vapore acqueo, viene fatto passare attraverso un refrigeratore allo scopo di ridurre drasticamente il contenuto di acqua. Il biogas passa quindi nello stadio di desolforazione, consistente in un reattore cilindrico al centro del quale è deposto un letto di carboni attivi.

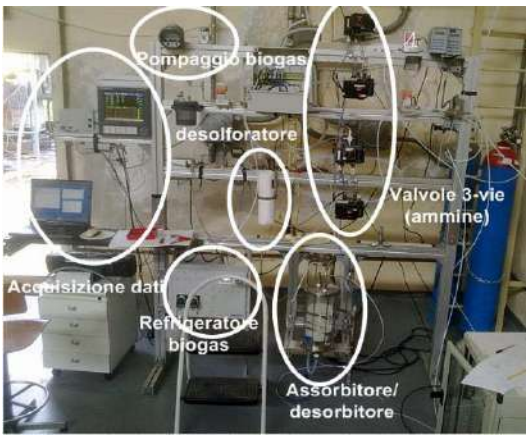


Figura 92. Sistema prototipale di purificazione e upgrading del biogas

Il biogas purificato dai composti dello zolfo viene quindi mandato al sistema di upgrading, consistente in due serbatoi identici. I due serbatoi lavorano in parallelo: alternativamente il primo (riempito con una soluzione di AMP, 2-ammino-2-metil 1-propanolo in soluzione con una miscela di glicol etilenico e propanolo a temperatura ambiente) assorbe la CO_2 dal biogas purificato mediante una reazione chimica con le ammine in soluzione, mentre il secondo rilascia la CO_2 dalla soluzione satura con un processo termico assistito da stripping con flusso di aria. Al raggiungimento della soglia del 97% del rapporto CO_2 assorbita/CO_2 entrante, la soluzione rigenerata passa in assorbimento e i serbatoi invertono il loro ruolo.

I due sotto-sistemi del sistema di condizionamento, il reattore di desolforazione e l'impianto di upgrading con ammine, sono stati testati separatamente prima di essere accoppiati: il primo è stato testato direttamente con il biogas proveniente dal DMM6000. Il sistema di upgrading è stato invece testato inizialmente con una miscela CH_4(65%)/CO_2(35%) di gas da bombola e successivamente accoppiato all'uscita del desolforatore per le prove con biogas reale.

Test sul reattore pilota per la rimozione di H_2S e altri composti contenenti zolfo

Il carbone attivo RGM3 della NORIT era stato selezionato come il più promettente tra quelli precedentemente testati sul reattore in scala laboratorio nella rimozione di H_2S da biogas simulato, raggiungendo prestazioni di 700 mg H_2S rimosso per grammo di carbone. Questo carbone si è anche dimostrato efficace nella rimozione di due composti dello zolfo,diversi da H_2S, potenzialmente presenti in flussi di biogas da digestione anaerobica, il COS e il DMS. La capacità di rimozione di H_2S di tale carbone è stata pertanto testata sul flusso di biogas proveniente dal DMM6000.

Il valore di capacità misurato sperimentalmente, pari al 10%, è risultato inferiore a quanto osservato per un biogas

simulato in un reattore da laboratorio. Poiché nella precedente campagna di misure era stata evidenziata una netta dipendenza della capacità del carbone dalla presenza di ossigeno, che doveva essere presente almeno in rapporto molare 1:20 rispetto all'H_2S, ed essendo il biogas prodotto dal DMM6000 povero in ossigeno, si è provveduto a modificare l'ingresso al reattore di desolforazione in modo che il biogas fosse miscelato con una corrente di aria di 50 mL/min. In tali condizioni la capacità misurata è aumentata fino al 15%, valore comunque ancora inferiore alle prestazioni attese.

I test eseguiti, pur mostrando capacità inferiori a quelli effettuati con biogas simulato e in reattori di poche centinaia di mg di carbone, dimostrano che il sistema di desolforazione selezionato si comporta come un perfetto abbattitore di H_2S, portandone la concentrazione a livelli inferiori al ppm. Le capacità esibite permetterebbero di lavorare in totale assenza di H_2S per circa un mese nelle seguenti realistiche condizioni operative:

- quantità di carbone: 1500 g
- flusso di biogas: 8 L/min
- concentrazione H_2S: 450 ppm.

Sono state eseguite alcune prove con biogas reale anche con un secondo carbone, AIRPEL Ultra DS, che dai test su biogas simulato aveva mostrato capacità di adsorbimento minori, ma che, essendo ottimizzato per lavorare a temperatura ambiente e in presenza di un'umidità relativa del 70%, avrebbe permesso di ridurre il contributo energetico del refrigeratore e di eliminare del tutto quello del riscaldatore. Anche in questo caso, pur con prestazioni inferiori a quanto misurato con biogas simulato, il carbone attivo ha dato risultati soddisfacenti per un possibile impiego su un reattore prototipale, esibendo capacità dell'ordine del 9% .

Misure di area superficiale specifica eseguite su campioni esausti hanno mostrato che rispetto ai carboni che avevano lavorato con biogas simulato lo zolfo penetra meno all'interno dei micropori, ma tende a ricoprire più velocemente la superficie esterna ai pori. Questa potrebbe essere una delle cause della diminuzione della capacità nelle prove con il biogas del DMM6000. Si possono ipotizzare diversi motivi sulle cause di questa differente deposizione dello zolfo sulla superficie del carbone attivo:

- la co-presenza di altri composti dello zolfo concorrenziali nell'occupazione dei siti, anche se l'analisi allo spettrometro di massa non ha evidenziato composti in concentrazioni misurabili eccetto H_2S;
- la velocità di passaggio delle molecole di inquinante attraverso il carbone attivo, maggiore di più di un ordine di grandezza nel biogas da DMM6000 rispetto alle prove con biogas simulato;
- la presenza dell'umidità nel gas, ridotta dal refrigeratore, ma ugualmente superiore a quella del biogas sintetico.

Lo zolfo depositato sulla superficie appare dalla mappatura EDX eseguita sull'immagine SEM.

Test sul prototipo di sistema di upgrading

Test di assorbimento sono stati eseguiti, preliminarmente ai test con biogas reale, con biogas simulato nelle seguenti condizioni:

- soluzione: 3L di AMP in miscela glicol etilenico-propanolo (1:1 in volume)
- gas in ingresso: 35% CO_2 purezza N48, 65% CH_4 purezza N35, da bombola (Air Liquide)
- flusso di gas: 1,28 L/min (0,45 L/min CO_2, 0, 83 L/min CH_4)
- temperatura del reattore: ambiente (26-30 °C)
- concentrazione AMP: 3moli AMP/L soluzione

Allo scopo di controllare il comportamento della miscela durante il riscaldamento e di poter determinare il contenuto di CO_2 alla fine del ciclo di assorbimento, la soluzione appena preparata e dopo l'assorbimento di CO_2 è stata analizzata in salita di temperatura con misure SDT e termogravimetriche.

Nella Figura 93 sono state messe a confronto le curve della perdita di peso (TGA) della soluzione fresca (verde) e di quella che ha assorbito circa il 3,4% di CO_2. Nella curva TGA della soluzione che contiene CO_2 fino a circa 85-90 °C si osserva che il campione perde più peso rispetto alla soluzione fresca. A parità di temperatura, la differenza tra le due curve arriva fino a circa il 4,0%, in accordo con il previsto contenuto di CO_2 calcolato dalla

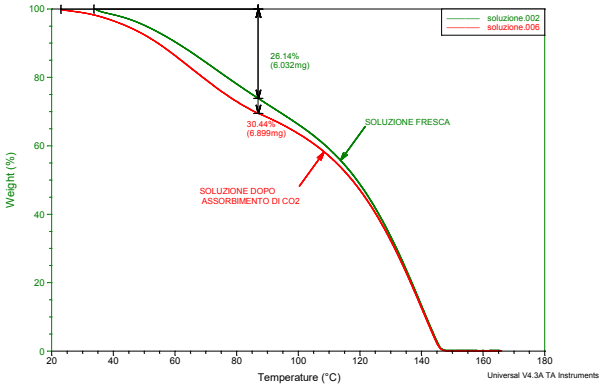


Figura 93. - Curve della perdita di peso della soluzione fresca (verde) e di quella contenente CO_2

curva di assorbimento.

Il test con il biogas reale proveniente dal DMM6000 è stato effettuato con un flusso di CO_2 analogo a quello dei test con biogas simulato, nelle seguenti condizioni:

- 3 L di soluzione (3 moli ammina/L)
- flusso biogas : da 1,2 L/min a 1,0 L/min (decrescita lineare nel tempo)
- biogas condizionato con refrigeratore a 4 °C e desolforatore (0 ppm H_2S)
- flusso CO_2: da 0,48L/min a 0,4 L/min (decrescita lineare nel tempo)
- temperatura iniziale del reattore 26 °C.

Il grafico nel tempo della concentrazione di CO_2 durante la prova con il biogas da DMM6000 è mostrato in Figura 94, insieme alla curva della prova con biogas simulato. La curva con biogas reale mostra un andamento molto vicino a quelle relative alle prove con biogas sintetico.

La rigenerazione della soluzione è stata effettuata ad una temperatura di 75 °C, più bassa di quella nominale di 90 °C, per verificare se lo stripping con aria della CO_2 assorbita (1 L/min) fosse sufficiente, anche a tali temperature, a mantenere il tempo di rigenerazione < 1 h, tempo a cui in fase di assorbimento si raggiunge il 97% di concentrazione di CO_2 assorbita. La quantità totale di CO_2 desorbita in un'ora è stata pari a 33,4 L. Alla temperatura di desorbimento testata è stata rilevata un'evaporazione di propanolo di qualche decina di mL.

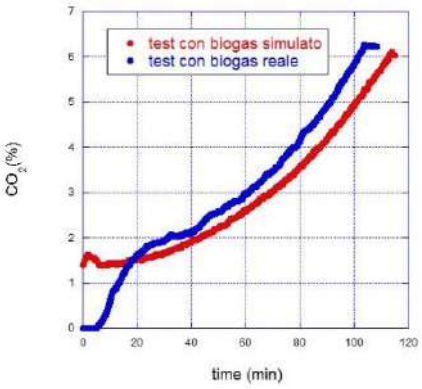


Figura 94. Confronto tra le curve di assorbimento della CO_2, prove con biogas reale e simulato

La soluzione rigenerata è stata sottoposta ad analisi TGA e DTG. I risultati, in accordo con le curve di assorbimento e desorbimento (Figura 95), indicano che la soluzione è stata rigenerata quasi totalmente. Si nota inoltre un spostamento del massimo di DTG della soluzione rigenerata verso le temperature più alte, indice di un impoverimento della soluzione di frazione basso bollente (propanolo).

La prova di rigenerazione è stata ripetuta, sempre alla temperatura di 75 °C, con un flusso di aria di stripping di 4,6 L/min In queste condizioni la CO_2 viene rilasciata al 90% ed è necessario aumentare la temperatura a 90 °C per avere una rigenerazione completa nei tempi di progetto.

In conclusione, si può affermare che i risultati ottenuti indicano che il sistema di condizionamento realizzato e testato presso il C.R. ENEA Casaccia può soddisfare i requisiti richiesti. Il sistema di desolforazione, per la sua estrema semplicità ed efficienza, è stato immediatamente scalabile alla taglia necessaria per il DMM6000, e ha permesso di operare con un abbattimento completo di H_2S per circa 10 ore, con soli 6 g di carbone attivo. Il sistema è scalabile a taglie maggiori semplicemente aumentando la quantità di carbone in funzione del flusso di gas da purificare.

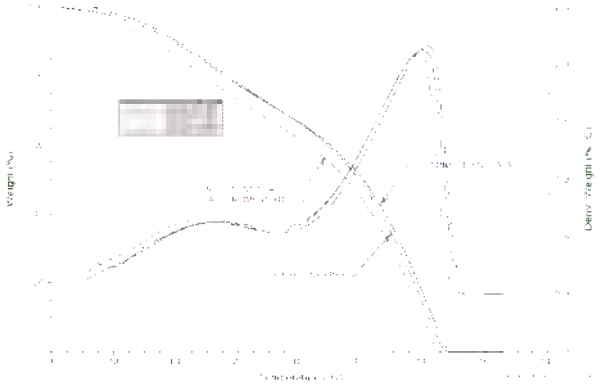


Figura 95. Curve TGA e DSC della soluzione fresca (curva verde), dopo assorbimento di CO_2 (curva rossa) e dopo il processo di rigenerazione a 75 °C

Il sistema di upgrading con AMP in soluzione organica ha richiesto un'attività più lunga e complessa di ottimizzazione. Il prototipo è stato progettato e realizzato, e test delle fasi di assorbimento e desorbimento separate hanno permesso di confermare la possibilità di operare come da specifiche, in particolare validando la possibilità di rigenerare la soluzione amminica a temperatura di 90 °C. Ulteriori campagne sperimentali, con il funzionamento in continuo dell'intero sistema su un arco di tempo sufficientemente lungo, sono previste per il

prossimo futuro.

Sviluppo del processo di produzione di biometano da biogas mediante formazione di gas idrati

Le attività sono state eseguite nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Farmacia dell'Università degli Studi di Chieti, riguardante lo sviluppo di un processo per l'upgrading del biogas basato sulla formazione selettiva di idrati dell'anidride carbonica e/o metano. In particolare, questa ricerca intende verificare le potenzialità offerte dalla formazione dei gas idrati per purificare il biogas, con l'obiettivo di sviluppare una tecnologia innovativa basata sui processi di formazione di fasi solide diverse dal ghiaccio, chiamate Clatrati Idrati o più semplicemente gas idrati, che hanno la peculiarità di avere una particolare struttura cristallina che presenta delle cavità abbastanza ampie da poter includere una molecola di gas.

Le attività sperimentali, descritte in dettaglio nel Rapporto RdS/PAR2014/154, hanno avuto lo scopo di validare, ampliare ed approfondire i risultati parziali ottenuti nella precedente annualità a seguito della collaborazione tra la società RDPower S.r.l., ENEA e il Dipartimento di Farmacia dell'Università degli Studi di Chieti.

Inizialmente presso i laboratori della RDPower S.r.l sono stati effettuati vari test al fine di replicare e validare i dati ottenuti nella precedente attività di ricerca (rapporto RdS/PAR2013/133). I risultati ottenuti, confrontati con i dati raccolti in precedenza, sono essenziali per la validazione del metodo, ma soprattutto per verificare la loro riproducibilità in diverse condizioni, andando a valutare parametri cinetici, termodinamici, di selettività e reologici del sistema in quanto indispensabili per la progettazione di un impianto.

Utilizzando la miscela di gas con percentuali 60% CH_4 e 40% CO_2, sono stati eseguiti test a pressioni variabili tra 40 e 80 bar e con volumi di soluzioni crescenti da 40 a 100 mL. I risultati ottenuti, mostrati nel grafico riportato in Figura 96, confermano i dati delle precedenti attività di ricerca, sia in termini di cinetica che di termodinamica del sistema.

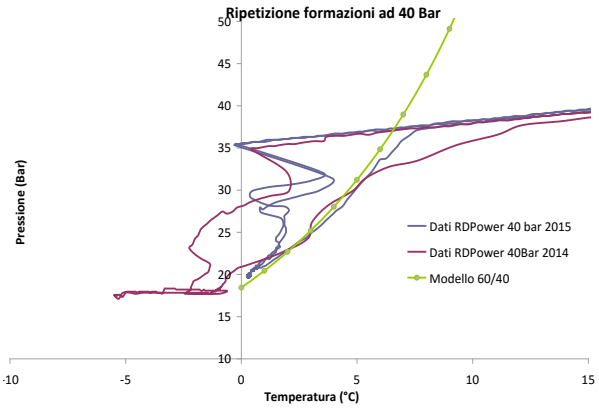


Figura 96. Confronto tra i profili P/T ricavati dalla prove sperimentali messi a confronto con il modello teorico per la miscela 60/40

Miglioramento del rapporto acqua/gas

Un parametro chiave per una valutazione preliminare delle possibilità di applicazione industriale del processo di formazione degli Idrati è il rapporto acqua/gas. A livello industriale è infatti conveniente lavorare minimizzando la quantità di acqua utilizzata e massimizzando la conversione in fase idrato necessaria al processo, che è un aspetto molto rilevante perché direttamente legato al fabbisogno energetico del processo stesso, ai costi di processo e ai costi impiantistici dovuti a volumi di reazione elevati.

RDPower ha effettuato studi sperimentali per individuare il miglior rapporto acqua/gas, prendendo come parametri di accettabilità del processo la capacità di separazione, misurando la composizione finale del gas residuo con il metodo IR, e la quantità di gas trattato, misurando la pressione finale residua e quindi risalendo alla quantità di gas catturata in fase idrato.

I suddetti esperimenti sono stati eseguiti in tre step:

- a pressione costante di 40 bar e con quantità di acqua crescenti da 10 a 90 mL, ossia esplorando un rapporto volumetrico V_{gas}/V_{sol} che va da 22,0 a 1,6 (teorico stechiometrico 3,35) ed un rapporto massico g_{sol}/g_{gas} che va da 1,0 a 13,6 (teorico stechiometrico 3,8);
- mantenendo costante la quantità di acqua a 40 mL e variando invece le pressioni eseguendo test a 40 bar, 60 bar e 80 bar;

- effettuando una serie di test per investigare la migliore temperatura di fine formazione, con valori variabili tra -2,0 °C a +4,5 °C.

In tutti questi casi la miscela di partenza era quella 60/40. I risultati ottenuti (Figura 97) mostrano come le condizioni ottimali per raggiungere la migliore capacità di separazione siano quelli a pressione 40 bar, volume 100 mL e temperatura finale 1 °C. Non si sono scelte temperature più basse per non incorrere nella formazione di ghiaccio e rendere quindi il processo più facilmente industrializzabile.

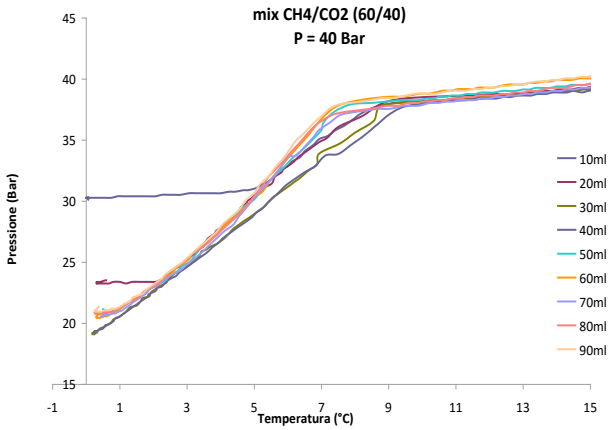


Figura 97. Profili P/T della serie di test eseguiti a P iniziale di 40 bar e volume variabile di acqua da 10 a 90 mL

Miglioramento della reologia della fase clatrato

Continuando con la linea di ricerca in oggetto, si è data importanza anche ad un altro aspetto fondamentale per l'industrializzazione del processo, come il miglioramento della reologia della fase idrato. La RDPower è riuscita ad ottenere una crescita di idrato "slurry like", che ha permesso una migliore agitazione con un incremento dei fenomeni di trasferimento di massa correlati alla formazione di idrato, traducendosi in minori tempi di induzione del fenomeno. Contemporaneamente al miglioramento della reologia, questo ha permesso anche di risolvere il problema della formazione di schiuma durante la fase di dissociazione.

Al fine di migliorare il trasferimento di massa correlato alla formazione di idrato si è presa in esame la reologia del sistema idrato testando sistemi con emulsioni e "pseudoemulsioni" costituite da SDS (sodio dodecil solfato) ad una concentrazione di 300 ppm e olio vegetale, in particolare olio di semi di girasole. Di seguito i test eseguiti:

- in una fase iniziale sono state determinate le quantità di olio necessarie per ottenere un'emulsione sufficientemente stabile ed una crescita di idrato "slurry like", che permette un'agitazione ottimale ed un miglioramento dei fenomeni di trasferimento di massa correlati alla formazione di idrato,
- una volta individuata la combinazione migliore di soluzione/olio si è passati ad effettuare una serie di test che simulassero il più possibile le ipotetiche condizioni di processo in un impianto in scala industriale, eseguendo cicli a temperatura costante nella zona di stabilità della fase idrato. Sono state utilizzate temperature comprese tra 0 e 3 °C per individuare la temperatura ottimale;
- dopo aver individuato le condizioni ottimali per simulare il processo industriale, si è passati ad implementare sulla apparecchiatura a disposizione di RDPower un algoritmo di controllo delle temperatura interna al reattore durante le fasi di formazione e dissociazione. Si sono quindi eseguiti ripetuti cicli di formazione e dissociazione alla temperatura costante di 1 °C e pressione di 40 bar, partendo da una miscela realizzata in bombola con composizione 65% CH_4 e 35% CO_2. Lo scopo della ripetizione dei cicli era quello di valutare se il sistema conservava la capacità di separazione anche dopo diversi cicli successivi sia in dissociazione completa che incompleta.

test eseguiti con diverse quantità di olio di semi mostrano come la presenza dello stesso non alteri le caratteristiche cinetiche e termodinamiche del sistema (Figura 98). Ai fini dell'ottenimento di uno slurry di micro cristalli di idrati e di una miscela iniziale di pseudo emulsione relativamente stabile alle condizioni di formazione si è scelta la combinazione 100 mL soluzione SDS 300 ppm + 5 mL olio di semi.

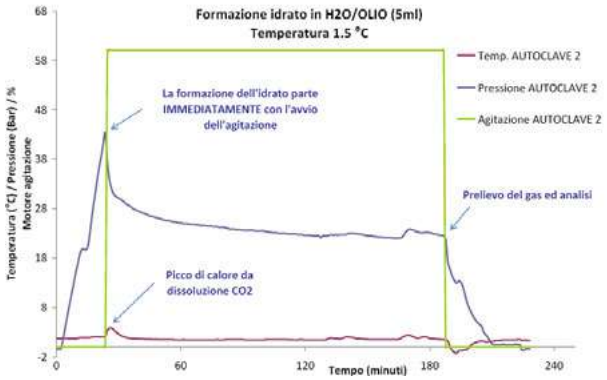


Figura 98. Esempio di formazione di idrato a P di 40 bar e T costante di 1,5 °C

Test su promotori naturali

Al fine di sperimentare promotori per la formazione di idrati si sono valutati prodotti naturali contenenti proteine, polifenoli, saponine ecc., che siano economici ed ecosostenibili. La promozione dell'idrato in fase di formazione è un parametro essenziale in quanto può diminuire i tempi di induzione e quindi ridurre il tempi dei vari cicli di separazione dei gas a livello industriale. Le prove in oggetto sono state effettuate presso l'Università di Chieti, utilizzando un reattore identificato dalla sigla HM1 (Figura 99).

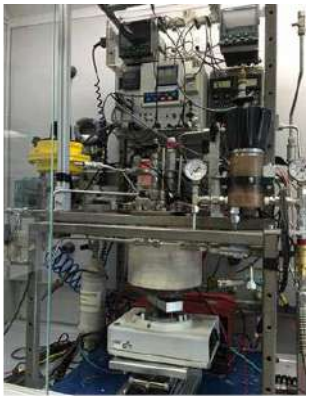


Figura 99. Reattore HM1

Si è quindi proceduto alla individuazione di matrici vegetali da sottoporre a processi di estrazione e recupero di molecole potenzialmente utilizzabili come promotori per la formazione di idrati. Nella prima fase ci si è concentrati su sale di ammonio dell'acido glicirrizico ed estratto di semi di pompelmo (*Citrus paradisi Macfad*), e si è poi proseguito con i test dei seguenti prodotti: L-serina; L-4-thiazolidinecarboxylic acid; acido L-aspartico, composto N1 (acido organico di semisintesi), L-istidina, L-4-idrossi-prolina; L-lisina. Un buon risultato si è ottenuto con gli estratti di pompelmo. I restanti additivi non hanno apportato grossi miglioramenti tranne per un leggero incremento da parte dell'acido aspartico.

Test di promotori/inibitori selettivi

La selettività nella formazione di idrati più ricchi in un componente da una miscela di gas sembrerebbe dovuta ad un forte controllo cinetico e quindi la RDPower, in collaborazione con il Dipartimento di Farmacia dell'Università di Chieti-Pescara, ha testato una serie di additivi in grado di influenzare le cinetiche del sistema.

Sono state valutate le percentuali di CH_4 e CO_2 della fase gas dopo formazione e della fase gas idrata dopo dissociazione in modo da valutare la quantità e la composizione percentuale di gas trattenuta. Solo alcuni tensioattivi testati presso l'Università di Chieti-Pescara hanno mostrato un piccolo incremento di selettività.

In riferimento ai promotori, oltre al classico SDS sono stati provati il LABSH (Linear Alkyl Benzene Sulfonic Acid) e il sodio oleato, tutti a concentrazione di 300 ppm per confronto con l'SDS. I risultati ottenuti comunque non hanno mostrato significative differenze sulla composizione del gas dopo formazione alle condizioni di formazione della RDPower. Con i prodotti a disposizione e con le condizioni sperimentali utilizzate dall'Università di Chieti-Pescara si è potuto invece apprezzare un leggero incremento nella separazione dei gas.

In una successiva serie di prove RDPower ha testato alcuni inibitori cinetici. In principio gli inibitori cinetici sono noti per avere effetto sulla formazione di idrati di CH_4, e poco si sa sul loro effetto sugli idrati di CO_2. Essendo il meccanismo cinetico di formazione dell'idrato di CO_2 diverso da quello del CH_4, in quanto è presente un forte fenomeno di solubilizzazione della CO_2 in acqua, si è ipotizzato che gli inibitori cinetici potessero svolgere il loro effetto maggiormente a carico del CH_4 che della CO_2. Sono stati testati alcuni tra i più classici inibitori quali CTABr (Cetyl Trimethylammonium Bromide), SB3-14 (3-(N,N-Dimethyltetradecylammonio)propanesulfonate), DTABr (Dodecyl Trimethylammonium Bromide). Questi additivi sono stati valutati alla concentrazione di 1.000 ppm, più alta di quella tipicamente usata di 300 ppm, per meglio evidenziare eventuali effetti. I test sono stati eseguiti a diverse temperature finali di formazione, comprese tra 0 e -5 °C, e alla pressione iniziale di 40 bar. I risultati ottenuti tuttavia non evidenziano significative differenze sulla composizione della miscela dopo la formazione di idrato (Figura 100).

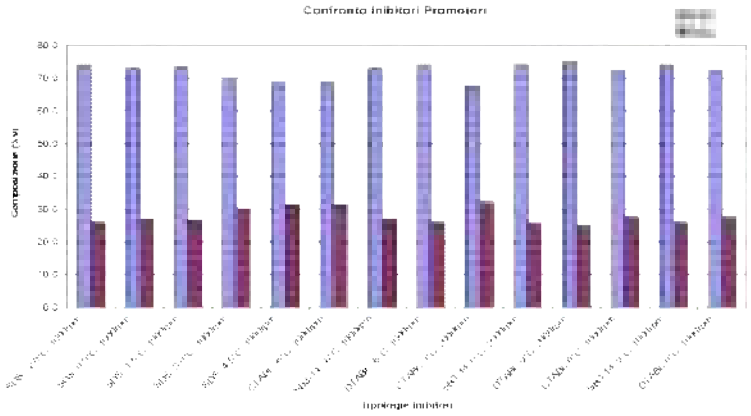


Figura 100. Confronto tra le composizioni della fase gas ottenuta da RDPower testando diversi inibitori cinetici

Nell'ottica di migliorare la separazione con il sistema in oggetto il Dipartimento di Farmacia ha sperimentato una nuova serie di tensioattivi non ionici, appartenenti alla famiglia degli alchil-benzen-solfonati (T1-T8), ed emulsioni preparate ad hoc, in grado di favorire notevolmente la formazione di idrato, ottenendo dei risultati preliminari decisamente interessanti (Figura 101) e meritevoli di ulteriore approfondimento.

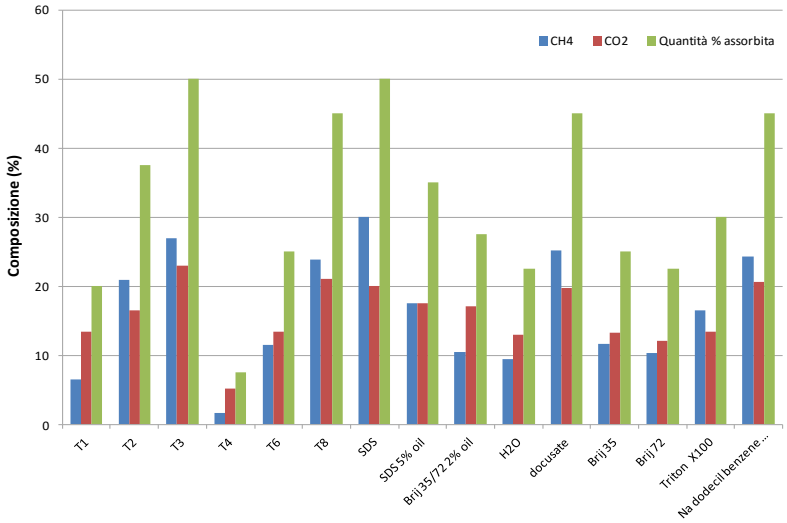


Figura 101. Confronto tra i tensioattivi e le emulsioni testati dall'Università di Chieti valutando la composizione % normalizzata alla quantità di gas assorbita dalla fase idrata

b.3 Ottimizzazione del processo di produzione di biometano a partire da syngas sull'impianto pilota di metanazione BIOSNG

Nei processi di gassificazione della biomassa, il gas prodotto presenta rapporti H_2/CO inferiori a quelli indicati dalla stechiometria della reazione di metanazione, 3:1 per il CO e 4:1 per la CO_2. A seconda della tecnologia di gassificazione e dalle condizioni di processo adottate, il gas prodotto raggiunge al più un rapporto H_2/CO di 2 e, se si vuole ottenere la conversione del syngas a biometano (o, meglio bio-SNG), si pone pertanto la necessità di adeguare la composizione del gas da convertire a contenuti finali di H_2 più favorevoli alla sintesi del CH_4.

Inoltre, la natura di questi gas porta ad avere, nella fase di conversione in metano, la formazione di depositi di carbonio sui catalizzatori, causandone una graduale disattivazione. Dunque sul fronte della conversione del gas si pone anche la necessità di disporre di catalizzatori più resistenti.

Nell'ambito delle attività previste dalla Ricerca di Sistema Elettrico sul tema della produzione di bio-SNG, sono state avviate attività finalizzate allo sviluppo di materiali per impiego in un processo "a secco" di simultanea promozione della reazione di *shift* d'acqua (WGS) e rimozione della CO_2 attraverso l'uso di sorbenti di SEWGS (*Sorption Enhanced Water Gas Shift*), nel quadro di un accordo di collaborazione fra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università dell'Aquila, mentre sul tema della conversione del syngas in metano è stata

avviata una collaborazione con il Dipartimento di Chimica Industriale dell'Università di Bologna, finalizzata allo sviluppo di catalizzatori meno suscettibili di disattivazione per formazione di deposizione di carbonio.

Aggiustamento della composizione del syngas mediante l'uso di sorbenti per la cattura della CO_2

Nel corso della precedente annualità sono stati preparati e testati sorbenti sperimentali per SEWGS. La sperimentazione condotta è stata finalizzata all'individuazione dei materiali con le prestazioni migliori. Dallo screening effettuato sono stati infine selezionati un sorbente per impiego a 400 °C (HT1K) e due per impiego a 600 °C (HT2 ed HT3).

Partendo dai risultati ottenuti, nel corso del PAR 2014 è stato condotto, presso l'Università dell'Aquila, uno studio finalizzato a migliorare le prestazioni di questi sorbenti in vista di un passaggio da scala di laboratorio ad impianto pilota [RdS/PAR2014/159]. A tal fine è stata ottimizzata la procedura di sintesi e stabilizzazione per calcinazione, e sui materiali di nuova produzione sono state condotte prove di caratterizzazione delle prestazioni di captazione di CO_2 da corrente umidificata (25% vol) a temperatura di 350 e di 600 °C e a pressione di 3 e 6 bar.

Per una corretta interpretazione dei risultati dei test di cattura della CO_2, i materiali sintetizzati sono stati sottoposti a caratterizzazione chimica e morfologica con tecniche XRD, FTIR, BET-BJH, XRF, SEM-EDX. Le analisi sono state condotte sui materiali prima e dopo il loro utilizzo.

Dai risultati sperimentali si ricava l'informazione che il materiale denominato HT1K, una idrotalcite avente un rapporto atomico Mg/Al pari a 3 e il 20% in peso di K_2CO_3, cattura circa il doppio della CO_2 rispetto al materiale non impregnato (HT1).

D'altro canto, il materiale HT2 testato a 600 °C ha mostrato un incremento nella capacità sorbente fino ad arrivare ad assorbire 5 mmol/g sorbente. Questo materiale, a base di Ca e Al, presenta però una perdita di capacità sorbente all'aumentare della pressione dovuta alla formazione del carbonato che va ad occludere i pori del materiale e non permette l'ulteriore carbonatazione dell'ossido di calcio. Inoltre, mentre HT1K può lavorare in maniera ciclica, mostrando un comportamento pressoché identico passando da un ciclo di adsorbimento - desorbimento al successivo, HT2 non può essere rigenerato in PSA (pressure swing adsorption), ma necessita di una rigenerazione con TSA (temperature swing adsorption). HT2 esibisce comunque un comportamento ottimale, anche dopo diversi cicli di rigenerazione in TSA, con una diminuzione della capacità sorbente minore del 2%.

HT3, sorbente misto a base di Mg, Ca e Al, ha dimostrato di poter catturare una quantità di CO_2 intermedia tra i risultati di HT1K e HT2, mediamente 2-3 mmol/g sorbente a 600 °C. Dato che la componente attiva rispetto alla CO_2 sembra essere l'ossido di calcio, HT3 difficilmente è rigenerato in PSA e la rigenerazione in TSA non è altrettanto efficace come per HT2. A 350 °C il comportamento resta simile a quello di HT2, la CO_2 catturata è nell'ordine delle 1,2-2 mmol/g sorbente.

Alla luce dei risultati ottenuti, si possono prospettare futuri sviluppi di questo lavoro attraverso la sperimentazione di questi sorbenti in un letto fluidizzato in pressione con del gas reale proveniente da un gassificatore, spingendo l'adsorbimento anche a valori più elevati di pressione parziale di CO_2. Ciò permetterebbe di capire se migliorando l'intimo mescolamento tra le fasi solida e gassosa si può avere un effettivo aumento della capacità sorbente.

Ulteriori sviluppi andrebbero indirizzati verso lo studio di questi sorbenti in un impianto pilota, anche in base ai risultati delle simulazioni in ChemCAD dalle quali si evince che, con un opportuno rapporto di splittaggio tra corrente di syngas tal quale e corrente sottoposta a cattura della CO_2, si potrebbe ottenere un gas all'86% di metano e 14% di H_2 (proveniente dal syngas) adatto, ad esempio, ad un impiego come biocarburante per autotrazione. Questo comunque necessiterebbe, da una parte, dello scale-up del processo di sintesi, in quanto le quantità al momento sintetizzate in scala di laboratorio sono dell'ordine dei 30 g di sorbente per tipologia di sintesi e, dalla altra, dello studio dei recuperi termici per la rigenerazione dei sorbenti.

A fronte dei risultati conseguiti nelle sperimentazioni presso i laboratori dell'Università dell'Aquila, dei sorbenti HT1K, HT2 ed HT3 sono stati preparati campioni granulari di dimensioni comprese nell'intervallo 1-2 mm, ed aliquote di circa 20 g di ciascun campione sono state fornite ai laboratori del C.R. Trisaia dell'ENEA per test di SEWGS da correnti multicomponente.

Le miscele utilizzate per i test sono state una di gas sintetico ed una di gas reale di gasificazione biomassa. Scopo dei test con le due correnti è stato quello di mettere in evidenza eventuali perdite di prestazioni per effetto della presenza di contaminanti residui, sia organici (tar) sia inorganici, che nel gas reale anche dopo purificazione restano in concentrazioni dell'ordine delle decine fino alle centinaia di ppmv. Ai sorbenti forniti dall'Università dell'Aquila ne è stato affiancato anche un quarto (PMG70/K) analogo all'HT1K, ottenuto per impregnazione con K_2CO_3 di una idrotalcite Mg/Al commerciale (Pural PMG70) [RdS/PAR2014/157].

Il gas reale da gassificazione di biomassa è stato prodotto da un impianto di gassificazione O_2/vapore basato su un gassificatore da 10 kWt funzionante sul principio del ricircolo interno del letto di sabbia (ICBFB, *internally circulating bubbling fluidized bed*). In Figura 102 sono riportati lo schema e una foto dell' impianto (potenza 10 kW).

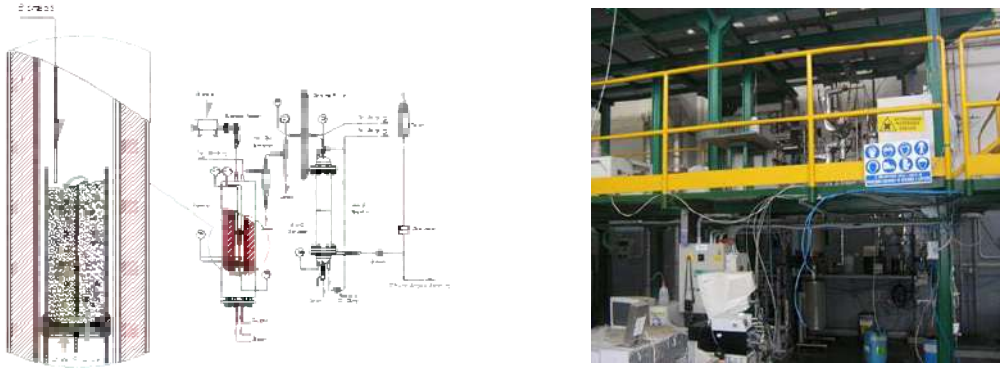


Figura 102. Schema impianto di gassificazione ICBFB a ricircolo interno (*Internally Circulating Bubbling Fluidized Bed*)

Dopo opportuna purificazione il gas prodotto è stato compresso e stoccato in bombole alla pressione di circa 50 bar e da qui inviato al reattore per le prove di *water gas shift* (WGS) con simultanea captazione di CO_2 (SEWGS). Prima di entrare nel reattore, entrambe le miscele sono state portate ad un contenuto di umidità di circa il 30% in volume. In Figura 103 è riportato uno schema del setup sperimentale adottato per condurre le prove di funzionalità dei sorbenti oggetto della ricerca.

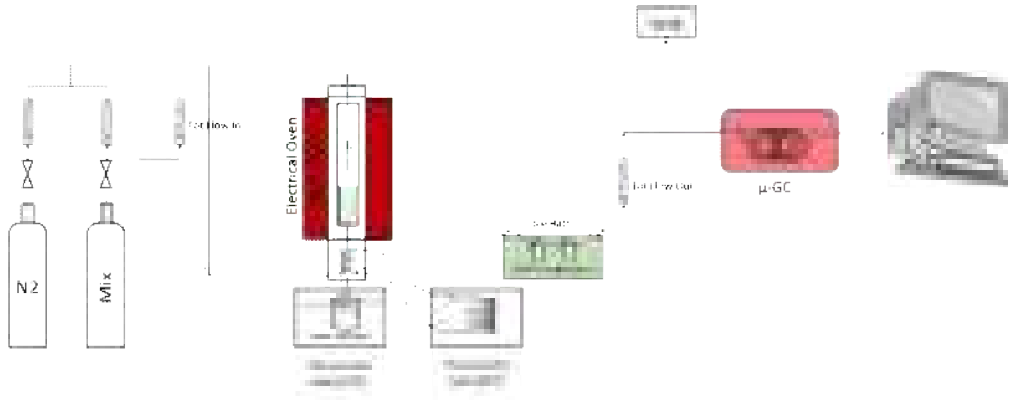


Figura 103. Set-up sperimentale per prove in temperatura di WGS e simultanea cattura CO_2

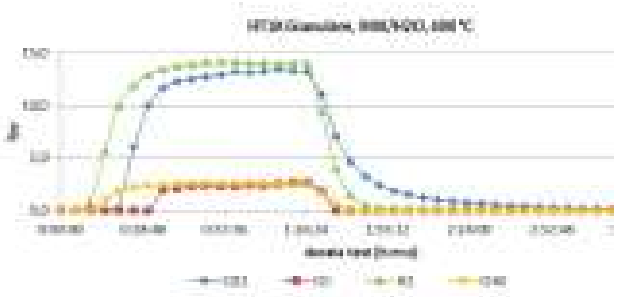
In Tabella 42 sono riportate le composizioni secche delle due miscele gassose utilizzate.

Tabella 42. Composizione delle miscele gassose

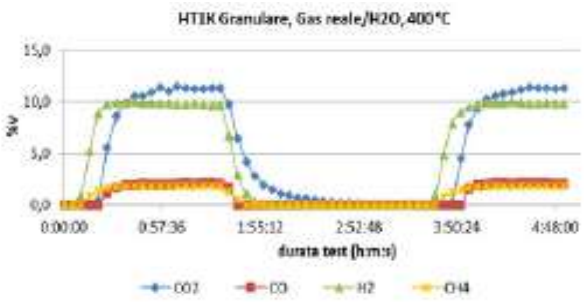
Componente	%v (secco)	
	Miscela sintetica	Gas reale
H_2	32,5	28,0
CO	26,7	20,5
CO_2	32,6	28,3
CH_4	8,8	6,1
N_2 et al.	-	15,4

In accordo con la finalità di testare le prestazioni dei sorbenti ed individuare i più promettenti per un possibile impiego in un processo di scala significativa, sono state condotte prove sia con i materiali in polvere sia con quelli granulari.

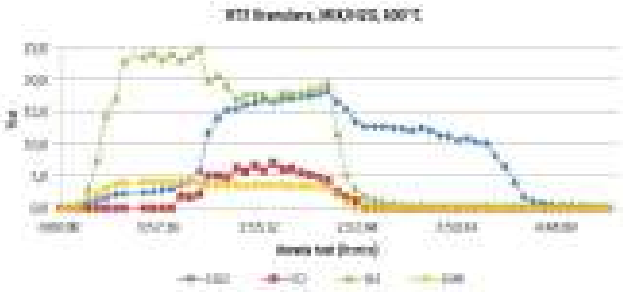
I risultati conseguiti in questi test indicano che nel passaggio del gas umido attraverso il letto di sorbente vengono di fatto trattenuti sia il CO, sia la CO_2. I comportamenti sono confrontabili, sebbene le capacità di captazione dei materiali granulari siano leggermente inferiori rispetto a quelli in polvere. Gli specifici andamenti delle composizioni dei gas trattati sono riportati in Figura 104.



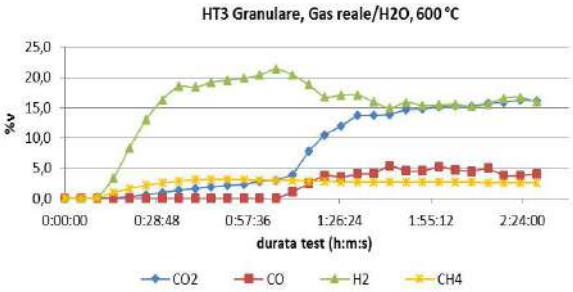
Andamento dei componenti gassosi della miscela sintetica umida trattata con sorbente granulare HT1K a 400 °C



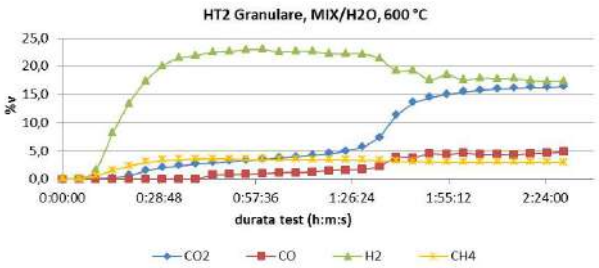
Andamento dei componenti gassosi del gas reale umido trattato con sorbente granulare HT1K a 400 °C



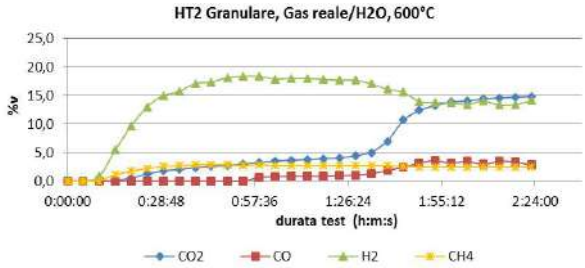
Andamento dei componenti gassosi della miscela sintetica umida trattata con sorbente granulare HT3 a 600 °C



Andamento dei componenti gassosi del gas reale umido trattato con sorbente granulare HT3 a 600 °C



Andamento dei componenti gassosi della miscela sintetica umida trattata con sorbente granulare HT2 a 600 °C



Andamento dei componenti gassosi del gas reale umido trattato con sorbente granulare HT2a 600 °C

Figura 104. Andamenti delle composizioni dei gas sintetico e reale trattati con diversi sorbenti

Con gas multicomponenti i dati acquisiti indicano che quando i sorbenti sono usati in polvere, CO e CO_2 restano assenti dalla miscela in uscita dal reattore fino in prossimità del limite di captazione, quindi aumentano simultaneamente convergendo verso le concentrazioni di plateau. Con i materiali in forma granulare, invece, per CO e CO_2 si osservano andamenti differenti.

Queste differenze sono particolarmente evidenti con i sorbenti contenenti calcio, HT2 e HT3 (Figura 104). In questi infatti la CO_2 viene rimossa dal gas completamente solo nei primi 15 minuti circa, dopo di che si osserva un aumento a valori analiticamente rilevabili, anche se senza superare mai il valore del 3% v/v, fin quando non si giunge in prossimità della piena saturazione del materiale. Da questo punto in poi la CO_2 aumenta molto più velocemente, convergendo poi verso il valore di plateau. Per il CO, invece, l'aumento a gradino è molto più contenuto, raggiunge e mantiene il valore dell'1% v/v fino quasi al livello di saturazione del sorbente, dopodiché anche per il CO si osserva un rapido aumento della concentrazione fino a giungere al valore di plateau.

Sebbene questa differenziazione tra CO e CO_2 potrebbe essere indicativa del fatto che i materiali selezionati possono avere un diverso ruolo rispetto a CO e CO_2, nella sostanza non cambia il risultato complessivo conseguito, ovvero il fatto che il trattamento di una miscele gassosa multicomponente con i sorbenti delle tipologie

considerate porta a produrre una corrente contenente essenzialmente H_2 e CH_4.

Pertanto, rispetto ad un loro utilizzo finalizzato alla produzione di bio-SNG a partire da gas di gassificazione di biomassa si può ipotizzare un processo in cui la corrente gassosa principale, dopo adeguata purificazione, possa essere divisa in due frazioni da destinare una alla metanazione ed una alla produzione dell'H_2 necessario all'aggiustamento della composizione della prima al fine di consentire la metanazione del CO e della CO_2.

Partendo da una corrente gassosa di composizione corrispondente alla corrente reale utilizzata per le prove sperimentali descritte nel presente rapporto, una valutazione preliminare indica che per adattarsi a tale schema di processo, la corrente principale deve essere ripartita in frazioni volumetriche di circa 3:1.

Dalle caratterizzazioni post test sui materiali inviati presso l'Università dell'Aquila, non si segnalano particolari differenze rispetto ai corrispettivi materiali prodotti nei test condotti "in loco". Un risultato di particolare rilievo emerso da queste caratterizzazioni è quello dall'analisi degli spettri FTIR, dai quali risulta l'assenza dei segnali caratteristici di assorbimento dei CH aromatici. Questo è indicativo del fatto che, alle condizioni di prova adottate per i quattro sorbenti granulari, non si è avuta formazione di depositi riconducibili alla contaminazione organica residua presente nel gas reale utilizzato per i test.

Conversione catalitica di syngas in biometano

In riferimento all'attività di conversione del syngas in CH_4, nelle precedenti annualità presso il Dipartimento di Chimica Industriale dell'Università di Bologna sono stati preparati e studiati catalizzatori di metanazione al nichel su precursore Mg/Al. Tra altri aspetti, l'indagine è stata finalizzata a determinare il contenuto di Ni rispetto alla matrice ed il rapporto M^{2+}/M^{3+}, al fine di individuare la formulazione del materiale con le prestazioni migliori rispetto ad attività catalitica e resistenza alla formazione di depositi di carbonio.

A valle di queste indagini, sono stati sintetizzati dall'Università di Bologna due nuovi campioni - $Ni_{20}Mg_{60}Al_{20}$ e $Ni_{30}Mg_{50}Al_{20}$ - caratterizzati dal rapporto ottimale M^{2+}/M^{3+} pari a 4, ma con un contenuto di Ni diverso rispetto al campione di riferimento ($Ni_{23,7}Mg_{56,3}Al_{20}$) precedentemente testato. I campioni sono stati calcinati a 650 °C per 12 ore seguendo una rampa di temperatura di 10 °C/min, pellettizzati e quindi testati nell'impianto di metanazione della stessa Università [RdS/PAR2014/156].

Tutti i campioni sono stati caratterizzati tramite analisi XRD prima e dopo calcinazione, mostrando rispettivamente la presenza della fase idrotalcitica pura e dell'ossido misto in prevalenza caratterizzato dalla presenza di MgO e NiO. Per quanto riguarda l'attività catalitica, è stata simulata una miscela gassosa derivante da gassificazione di biomasse e le quantità specifiche dei vari componenti la miscela sono state decise sulla base dei risultati conseguiti precedentemente. La composizione di questo gas è riportata in Tabella 43, unitamente ai parametri operativi in cui sono stati svolti i test di metanazione, ovvero temperatura, pressione e GHSV (velocità spaziale oraria del gas).

Tra le prove condotte è stata in particolare investigata l'influenza della pressione sull'attività catalitica, effettuando prove anche a 10 e 20 atm. Infine è stato variato il rapporto H_2/CO, portandolo dal valore standard di circa 4 ad un minimo di 2,4 passando attraverso una condizione intermedia con H_2/CO pari a 3.

In Figura 105 vengono confrontate le attività catalitiche in funzione della pressione dei campioni a diverso contenuto di Ni rispetto al campione di riferimento ($Ni_{23,7}Mg_{56,3}Al_{20}$), prendendo come parametro chiave la resa in CH_4. In particolare, a pressione atmosferica si riscontra una minore attività del catalizzatore caratterizzato dal quantitativo minore di Ni, mentre il campione $Ni_{30}Mg_{50}Al_{20}$ risulta essere anche leggermente più attivo di quello di riferimento.

Tabella 43. Condizioni operative delle prove di metanazione

	P1-4	P10-4	P20-4	P10-3	P10-4
$T_{forno\ (°C)}$	300			300	
GHSV [h^{-1}]	20000			20000	
P [atm]	1	10	20	10	
H_2/CO	4,1			3	2,4
Componente miscela	% v/v			% v/v	
H_2	33			30	28
CO	8			10	11,5
CH_4	4			5	6
CO_2	23			23	23
C_2H_4	1			1	1,5
$H_2O_{(g)}$	31			31	30

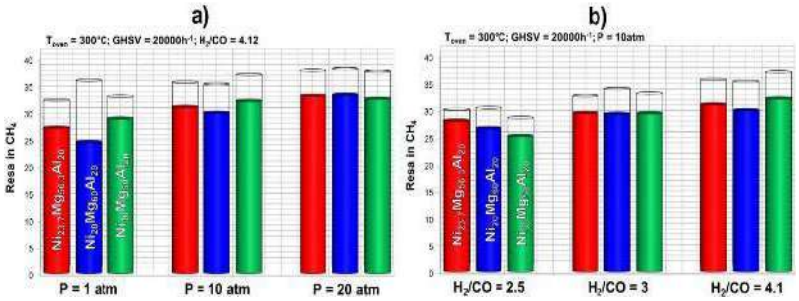


Figura 105. Confronto tra le attività catalitiche nella reazione di metanazione dei catalizzatori a diverso contenuto di Ni in funzione della pressione e del rapporto H_2/CO (b). Le barre trasparenti rappresentano le rese in CH_4 calcolate all'equilibrio termodinamico

Essendo la metanazione, una reazione che avviene con riduzione del numero di moli, essa è favorita ad alte pressioni. Infatti, aumentando la pressione fino a 10 atm, l'andamento appena descritto è ancora visibile anche se molto meno significativo, mentre a 20 atm non si osservano praticamente differenze tra le attività di questi tre catalizzatori. In ogni caso, è possibile osservare un'elevata attività catalitica a tutte le pressioni operative, in quanto le rese sperimentali sono di pochi punti percentuali inferiori rispetto a quelle calcolate all'equilibrio termodinamico.

A seguito di questi risultati, si è scelto di investigare l'influenza del rapporto H_2/CO ad una pressione intermedia di 10 atm, condizione che soddisfa il miglior compromesso tra attività e possibilità di discriminare anche piccole differenze dovute alla variazione di tale parametro. La sua influenza sull'attività catalitica dei tre campioni in esame (Figura 105b) è meno significativa rispetto all'effetto della pressione. Tuttavia anche in questo caso il campione con meno Ni risulta essere quello leggermente meno attivo degli altri due.

La stabilità di questi campioni è stata inoltre investigata ripetendo una prova di riferimento (prova di ritorno) dopo le prove condotte in pressione e dopo ogni prova in cui è stato variato il rapporto H_2/CO. Tutti i campioni sono risultati estremamente stabili, mostrando una resa in CH_4 praticamente invariata anche dopo 15 ore di reazione.

Dei campioni testati ne sono state quindi preparate aliquote significative da fornire al C.R. ENEA Trisaia per le prove con gas reale. Nello specifico sono stati sintetizzati: 80 g di campione $Ni_{23,7}Mg_{56,3}Al_{20}$ e 100 g di un campione con lo stesso contenuto di Ni e caratterizzato dal rapporto M^{2+}/M^{3+}pari a 3. Entrambi i campioni sono stati calcinati, pellettizzati con una granulometria compresa tra 1-2 mm e quindi inviati all'ENEA per effettuare prove sull'impianto pilota BioSNG.

In Tabella 44 è riportata la composizione del syngas reale utilizzata per le prove di metanazione sui due catalizzatori granulari $Ni_{23,7}Mg_{56,3}Al_{20}$ (M^{2+}/M^{3+}=4) e $Ni_{24}Mg_{51}Al_{25}$ (M^{2+}/M^{3+}=3). I test di metanazione sono stati condotti a pressione di 25 atm, T nell'intervallo 350-490 °C e GHSV di circa 2.000 h^{-1} [RdS/PAR2014/158]. Oltre ai due catalizzatori sperimentali, nelle stesse condizioni operative sono state condotte anche prove sulla conversione in metano del gas reale utilizzando un catalizzatore commerciale.

Tabella 44. Composizione del syngas reale per le prove di metanazione sull'impianto BioSNG

Componente	%v (secco)
H_2	26,9
CO	22,8
CO_2	28,0
CH_4	6,2
N_2	15,5
O_2	0,6

Tutte le prove sono state condotte dopo opportuna e prolungata pre-attivazione dei catalizzatori sotto corrente H_2/N_2 (2 bar, 360-390 °C, H_2/N_2 in rapporto 80:20 v/v). Per verificare lo stato di partenza dei materiali, le prove sono state avviate alimentando una miscela sintetica ad alto rapporto H_2/CO (4,7), mantenuta fino a raggiungimento delle condizioni di plateau. La stessa miscela è stata poi riutilizzata alla chiusura delle prove per valutare lo stato finale dei tre materiali.

Per verificare le prestazioni con il gas reale sono stati condotti quattro tipi di test, caratterizzati da un diverso contenuto di H_2. La prima prova è stata eseguita in accordo con l'ipotesi emersa a valle dei test sui sorbenti con mix multicomponente, ovvero in accordo con la possibilità di aggiustare internamente la composizione del gas reale producendo l'H_2 necessario attraverso la reazione di SEWGS (reazione di WGS e simultanea cattura di CO_2) su una frazione della stessa corrente principale. A tal fine, le prove di metanazione con gas reale sono state condotte alimentando al catalizzatore pre-attivato la miscela reale arricchita in H_2 con un rapporto molare finale tale da garantire la conversione stechiometrica di CO e CO_2 ($H_2/(3CO+4CO_2)$ circa 1,2, "gas reale I"), quindi si è passati ad una miscela con un contenuto di H_2 più basso, sufficiente alla sola conversione stechiometrica del CO (H_2/CO circa 5, "gas reale II") e lo stesso con aggiunta di H_2O ("gas reale III").

L'ultimo test è stato condotto utilizzando il gas reale con il suo rapporto H_2/CO (circa 1,2), umidificato ad un valore del 40 % v/v ("gas reale IV"). Tale valore è stato scelto sulla base di calcoli termodinamici sulla stabilità della miscela verso la formazione di carbonio e al fine di favorire un arricchimento *in situ* del contenuto di H_2 attraverso la reazione di WGS. Un raffronto tra gli andamenti della composizione del gas in uscita dal reattore acquisita nei tre cicli di prove è presentato in Figura 106.

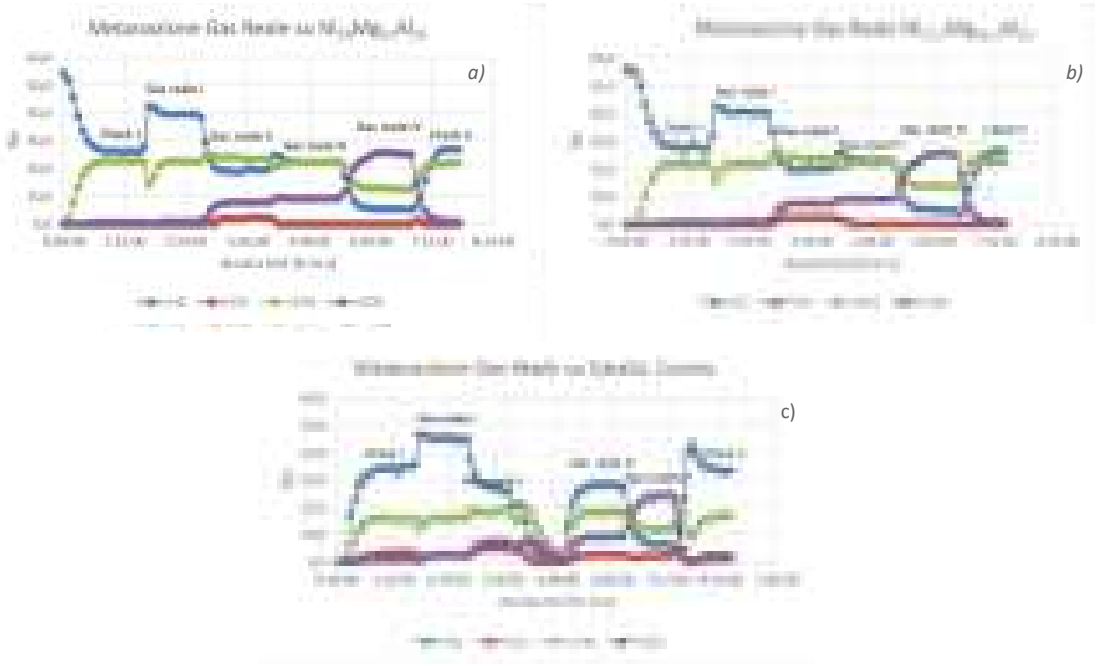


Figura 106. Curve di metanazione da gas reale su catalizzatori sperimentali e commerciale: (a) $Ni_{24}Mg_{51}Al_{25}$, (b) $Ni_{23.7}Mg_{56.3}Al_{20}$, (c) Catalizzatore commerciale

I trend dei gas mostrano che tra i due campioni sperimentali $Ni_{23.7}Mg_{56.3}Al_{20}$ e $Ni_{24}Mg_{51}Al_{25}$ le differenze di prestazioni non sono particolarmente significative. Il risultato è in accordo con quello riscontrato anche nei test condotti presso l'Università di Bologna al variare della pressione, dai quali in effetti non risultavano apprezzabili differenze tra i due catalizzatori sperimentali all'aumentare della pressione di processo.

Il confronto evidenzia infine che, a parità di condizioni di esercizio, i catalizzatori sperimentali hanno prestazioni leggermente superiori a quelle del catalizzatore commerciale. I test di verifica sullo stato finale di attività mostrano un'apparente conservazione della stabilità per ciascuno dei catalizzatori.

Per una caratterizzazione più puntuale dello stato di questi materiali post-test, i campioni recuperati alla fine della prova sono stati inviati all'Università di Bologna per le opportune caratterizzazioni [RdS/PAR2014/156].

Dalle analisi SEM-EDS, sul campione $Ni_{23.7}Mg_{56.3}Al_{20}$ non è stata riscontrata la presenza di carbone. Nel campione caratterizzato da un minor rapporto M^{2+}/M^{3+} = 3 ($Ni_{24}Mg_{51}Al_{25}$) sono state invece osservate zone con presenza di particelle di NiO ricoperte da depositi carboniosi. Per quanto riguarda il catalizzatore commerciale, dalle caratterizzazioni è risultato essere il più sensibile alla formazione di C, che si presenta disperso in maniera abbastanza omogenea su tutta la superficie.

c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi e riduzione dell'impatto ambientale

Le attività svolte da ENEA nell'ambito di questo obiettivo hanno riguardato in particolare:

- lo studio della stabilità delle due miscele ternarie di sali fusi contenenti rispettivamente nitrato di calcio e nitrato di litio e il completamento delle prove di corrosione di materiali in sali fusi, eseguite su provini di acciai ferritici ed austenitici in miscele di nitrati NaLiK;
- l'implementazione dello strumento di calcolo per l'analisi dei sistemi energetici alimentati a biomassa, realizzato nelle precedenti annualità, con la creazione di nuove librerie di fluidi termovettori ed alla creazione di nuove subroutines per l'analisi di assetti cogenerativi per il miglioramento delle prestazioni del sistema, e la realizzazione di un'interfaccia grafica user-friendly con il trasferimento dell'applicativo su piattaforma WEB, in modo tale da rendere lo strumento liberamente fruibile al pubblico;
- lo studio, sviluppo, realizzazione e verifica sperimentale di filtri catalitici strutturati per l'abbattimento del particolato fine presente nelle emissioni di caldaie a biomasse, e di un sistema per la rigenerazione dei filtri tramite riscaldamento a microonde.

c.1 Caratterizzazione termo-fluidodinamica di miscele di sali fusi in funzione del loro utilizzo come vettori termici in caldaie innovative a biomasse

I nitrati fusi (miscele di nitrati alcalini ed alcalino terrosi) possono essere vantaggiosamente utilizzati come fluido di trasporto termico intermedio fra una caldaia a biomasse e un fluido per un ciclo Rankine organico (ORC).

Fra le varie miscele basso fondenti una miscela ternaria contenente calcio nitrato [$Ca(NO_3)_2$/$NaNO_3$/KNO_3 42,2:15,3:42,5% in peso] si può ritenere di grande interesse per l'utilizzo sia come fluido di trasporto termico che di accumulo. Più costoso, ma potenzialmente interessante, è sicuramente un fluido termico contenente nitrato di litio ($LiNO_3$/$NaNO_3$/KNO_3 30:18:53% in peso), che può presentare altri vantaggi vista la viscosità molto più bassa rispetto all'Hitec XL ed una migliore stabilità termica, ma che comunque non è abbastanza economico per essere utilizzato come fluido di accumulo termico (HSM, heat storage material). Quest'ultima miscela ternaria potrebbe però essere convenientemente usata come fluido di traporto termico (HTF "heat transfer fluid"), anche accoppiato con il ternario con il calcio usato come HSM.

Proseguendo le attività degli anni precedenti, nel corso della presente annualità sono stati caratterizzati questi fluidi basso-fondenti rispetto alla compatibilità con acciai usati come materiale da costruzione per scambiatori, tubi e valvole [RdS/PAR2014/160]. Da dati ottenuti nell'ambito di altri progetti di ricerca si può stabilire che la miscela ternaria con il litio è stabile fino a circa 600 °C. Anche se un livello termico così alto non è strettamente necessario per lo scopo del presente lavoro, si è comunque ritenuto importante ottenere dati per condizioni operative il più possibile prossime a quelle limite, per cui è stata effettuata una campagna sperimentale a 550 e 590 °C e per 8.000 ore, studiando la compatibilità (in condizione statiche, per immersione) di due acciai inox, uno austenitico (AISI 316L) e uno ferritico (AISI 430), con tale miscela.

I risultati a 550 °C mostrano una buona resistenza per entrambi i materiali, a 590 °C l'austenitico si fa decisamente preferire, comunque, la necessità di usare leghe speciali sopra i 550 °C risulta confermata. Prove a temperature minori, sotto i 450 °C, saranno necessarie per verificare la possibilità di utilizzare leghe, meno costose e pregiate, a basso contenuto di cromo, in situazione di media e bassa entalpia.

I risultati di queste prove, effettuate presso i laboratori del Centro ENEA del Brasimone, mostrano una buona resistenza del primo ed una tendenza allo sfogliamento della superficie dell'AISI 430. L'utilizzo di acciai a più basso costo potrà essere verificato per impieghi a temperature inferiori.

Come evidenziato nel corso della scorsa annualità, la miscela ternaria con il calcio ha mostrato un limite superiore di stabilità termica di poco superiore ai 400 °C. Per questo motivo sono state effettuate prove di compatibilità a tale temperatura. In particolare, visto il livello termico utilizzato, non si è ritenuto necessario testare un acciaio inox, ma sono stati presi in esame due materiali meno costosi: una lega ferritica (SS 430) ed un acciaio a relativamente basso contenuto di cromo (SS T91). Si è operato per immersione in condizioni statiche per 1000 ore e, inizialmente, per simulare una condizione reale di partenza di un serbatoio di accumulo termico, si sono tenuti i provini a contatto con la miscela idrata a freddo per circa 24 ore.

L'analisi metallografica eseguita ha evidenziato una buona resistenza dello strato superficiale dei provini metallici e l'assenza di fenomeni di spalling e pitting e di attacchi intergranulari, incoraggiando a proseguire nella ricerca di materiali da costruzione poco costosi per sistemi operanti a temperature massime di circa 400 °C, da testare comunque per periodi maggiori di tempo.

Considerando che i nitrati fusi vengono usati come mezzo termico intermedio per il trasporto di calore ad un fluido di lavoro per cicli ORC, è inoltre necessario studiare la compatibilità fra questi due vettori termici, in maniera da avere dei criteri previsionali per eventuali perdite che producono mescolamenti fra i due fluidi. L'analisi termodinamica preliminare eseguita mostra, come aspettato, una potenziale grande instabilità dei fluidi ORC a contatto con forti ossidanti come i nitrati, evidentemente, la cinetica di tali reazioni andrà quindi ulteriormente investigata per avere dei criteri predittivi e per una corretta valutazione della sicurezza in questo genere di impianti.

c.2 Sviluppo di un modello per la valutazione energetica ed economica dei sistemi cogenerativi

Nelle precedenti annualità è stato implementato e perfezionato un codice di calcolo per l'analisi di sistemi energetici di piccola taglia alimentati a biomassa legnosa (COGEGNO), sviluppando i modelli di alcuni componenti significativi del sistema, al fine di condurre simulazioni dettagliate di impianti di potenza a biomassa al variare delle condizioni operative. Nella presente annualità il codice è stato ulteriormente messo a punto e trasferito su una piattaforma WEB, in uno spazio denominato "laboratorio virtuale" del dominio ENEA nel sistema computazionale ENEAGRID. Inoltre, per rendere più versatile la gestione del numero di processi che possono utilizzare contemporaneamente il codice di calcolo e rendere indipendente l'utilizzo e lo sviluppo del codice da licenze proprietarie, si è provveduto a trasferire il codice dall'ambiente Matlab® all'ambiente Scilab, un software open source. Il modello è stato inoltre adattato per consentire simulazioni integrate Matlab - TRNSYS di un sistema di potenza ibrido solare termodinamico con generatore ausiliario alimentato a biomassa solida [rapporto RdS/PAR2014/161].

Il codice ha come principale obiettivo l'analisi energetica delle prestazioni del sottosistema di generazione termica alimentato a biomasse legnose, abbinato a impianti di potenza e di cogenerazione di piccola taglia, con particolare attenzione verso i sistemi ad alta temperatura con caldaie a sali fusi. Si tratta di sistemi energetici innovativi, in cui l'uso dei sali fusi come fluido termovettore consente il funzionamento del ciclo motore a temperature medie superiori ai comuni cicli ORC, con possibili vantaggi in termini di migliore rendimento termodinamico.

La struttura del codice è sostanzialmente quella presentata nella precedente annualità, con piccole variazioni apportate per permettere all'utente la scelta tra diversi tipi di:

- biomassa: abete, pioppo, robinia, betulla, faggio, oppure personalizzata per essenze diverse oppure per mix di biomassa;
- fluido termovettore: Hitex XL, Hitec HTS, solar salt, olio diatermico (Dowtherm RP).

Inoltre, in condizioni regolate, la variabile di riferimento è la potenza elettrica netta del gruppo motore, e non più la portata di biomassa in ingresso o la potenza utile nella caldaia a sali fusi. In tal modo, è possibile gestire direttamente la variabile di riferimento in impianti di potenza, ossia la potenza elettrica richiesta dall'utenza.

Il codice si basa su un modello a parametri concentrati e risolve le equazioni di bilancio di energia e di massa in condizioni stazionarie del sistema, il cui schema è riportato in Figura 107.

Le reazioni chimiche in camera di combustione sono trattate in modo semplificato, assumendo una combustione stechiometrica sulla griglia e una completa combustione nella sezione secondaria, grazie ad un adeguato eccesso di ossigeno nei fumi (dato di input) ed ipotizzando che la camera di combustione abbia una conformazione e dimensioni adeguate per consentire ai fumi un tempo di permanenza tale da poter trascurare il mancato contributo di eventuali incombusti. Tra i principali elementi modellati vi sono l'eccesso d'aria, il ricircolo fumi, il preriscaldamento dell'aria, l'aria di combustione primaria e secondaria, la composizione della biomassa, la temperatura ingresso e di uscita dei sali fusi in caldaia.

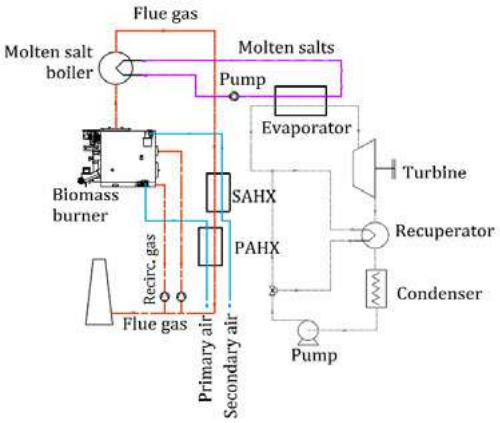


Figura 107. Schema dell'impianto alla base dello strumento di calcolo

L'esperienza pregressa ha portato a scegliere il cosiddetto "laboratorio virtuale" quale soluzione ottimale per l'implementazione di un prodotto WEB interattivo del codice COGEGNO. Con "laboratorio virtuale" si intende un'area di lavoro condivisa che fa riferimento ad una specifica disciplina. Nel laboratorio, al quale si può accedere da internet via browser, l'utente ha la possibilità di inserire e/o consultare dati inerenti la disciplina in oggetto.

Nell'ambito della presente attività, si è inteso dare un acceso al software necessario a gestire le simulazioni attraverso un'interfaccia grafica facilmente comprensibile ad un utente comune.

Le varie sottodirectory si articolano come segue:

- data - Contiene i risultati delle simulazioni condotte dai singoli utenti, ogni utente potrà decidere se e come dare accesso ai risultati prodotti gestendo gli accessi assegnando in maniera opportuna le ACL (Access Control List) di AFS. Di default ogni utente del laboratorio virtuale avrà accesso ai soli suoi dati ed il generico utente di griglia non potrà accedere ai dati degli utenti del laboratorio in questione. In particolare all'interno di data ci saranno tante directory quanti saranno gli utenti che faranno richiesta di accedere al portale web. Per semplicità ogni directory avrà come nome la username assegnata al generico utente. All'interno di queste directory ce ne saranno altre con i nomi delle date in cui l'utente svolge le simulazioni. Per ognuna delle directory denominate con la data di simulazione ci saranno directory denominate con numeri interi progressivi a partire da 1 che contengono in maniera separata i dati di ogni simulazione distinti per tipologia (condizioni nominali, condizioni regolate).
- html - Contiene il codice necessario alla gestione della parte web del laboratorio virtuale scritto in html/php. La pagina di accesso si presenta come mostrato in Figura 108, ed è accessibile tramite il seguente URL: http://www.afs.enea.it/project/adp/
  La pagina in alto a destra presenta il link "Software" che rimanda alla pagina dalla quale si può accedere all'applicazione Javascript che interfaccia l'utente con il codice di simulazione
- soft - Contiene il codice per la simulazione dell'impianto e la sezione di scripting di shell necessaria a controllare l'interazione dell'utente con l'applicazione Web. In questa area è stato installato Scilab™ (versione 5.5.2), ossia il software utilizzato per lo sviluppo del codice di simulazione.

Una volta registrato su ENEAGRID ed ottenuto l'accesso al laboratorio virtuale, l'utente può eseguire simulazioni del sistema energetico in condizione nominali e regolate. I risultati sono visualizzati in automatico su display e possono essere liberamente scaricati dall'area AFSbox di ENEA, a cui lo strumento indirizza tramite un link indicato nella pagina del software.

Il modello è stato inoltre adattato per consentire simulazioni integrate Matlab®-TRNSYS® di un sistema di potenza ibrido solare termodinamico con generatore ausiliario alimentato a biomassa solida.



Figura 108. Homepage di COGEGNO

c.3 Sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (<10 µm) nelle emissioni gassose

L'attività di ricerca concerne l'analisi sperimentale di filtri catalitici con matrice in carburo di silicio (SiC) e catalizzatore in ferrite di rame ($CuFe_2O_4$) per l'abbattimento del particolato carbonioso emesso dai generatori di calore a biomassa solida. I filtri sono forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno (Di.I.In.), che collabora con ENEA nell'ambito della presente attività di ricerca [rapporto RdS/PAR2014/162].

L'obiettivo principale della campagna di prove è stato quello di verificare sperimentalmente e analizzare il comportamento dei filtri durante le fasi di rigenerazione, che rappresenta un aspetto critico per garantire adeguate prestazioni e durata per questo tipo di prodotto [rapporto RdS/PAR2014/163].

Date le caratteristiche dei materiali che costituiscono i filtri (matrice e catalizzatore), ottimi assorbitori di microonde, particolare interesse riveste lo studio della rigenerazione tramite appunto un sistema a microonde. Nel contesto della presente annualità sono stati definiti i requisiti progettuali definitivi, che hanno costituito la base per la procedura di ordine del sistema customizzato di rigenerazione a microonde. E' stato inoltre individuato il rivestimento superficiale da applicare a filtri catalitici che saranno testati con il sistema di rigenerazione a microonde, quale barriera tra le pareti esterne dei) e l'ambiente.

Non è stato possibile provare il sistema di rigenerazione a microonde nel contesto della presente annualità. Questo inconveniente è stato superato effettuando una campagna di test sperimentali sui filtri catalitici, nei quali la rigenerazione è ottenuta tramite un riscaldamento con resistenza elettrica localizzato intorno al filtro catalitico, e il banco prova presente presso la Hall Tecnologica THEXAS del C.R. ENEA di Saluggia è stato modificato per ottenere migliori condizioni sperimentali, in termini di ripetibilità e stabilità delle variabili operative.

Dal punto di vista dell'analisi dei fumi emessi dalla caldaia, la misura del particolato fine ha consentito di analizzare in real-time la concentrazione del particolato a monte del filtro. La linea di campionamento è composta dal generatore di calore di 30 kW alimentato a pellet e da una linea di derivazione dal canale di fumo utilizzata per il campionamento delle emissioni gassose e del particolato. Nella linea di derivazione è inserito il prototipo di filtro da testare. I fumi, raffreddati a valle della linea, sono aspirati tramite una pompa volumetrica.



Figura 109. Particolare della linea di campionamento fumi

La rigenerazione dei filtri è ottenuta con un riscaldatore per alte temperature a fascia in materiale ceramico installato intorno al portafiltro (Figura 109). A differenza del forno elettrico utilizzato nelle precedenti annualità, questa soluzione presenta transitori più brevi, meglio confrontabili con il sistema di rigenerazione a microonde, in quanto il volume riscaldato è notevolmente inferiore e il riscaldamento è prevalentemente per conduzione. Inoltre, la zona di riscaldamento è limitata al tratto della linea di campionamento dove è alloggiato il filtro.

Lungo la linea sperimentale si trovano punti di prelievo per l'analisi in continuo dei fumi. In particolare, a monte del filtro (nella canna fumaria), sono monitorate le concentrazioni nei fumi di ossigeno, anidride carbonica, monossido di carbonio, composti organici volatili e del particolato fine (< 2,5 µm). A valle del filtro invece sono monitorate le concentrazioni di ossigeno e di anidride carbonica. La scelta delle specie chimiche da analizzare a monte e valle è legata a vincoli di tipo strumentale. Sono inoltre monitorate in continuo la caduta di pressione attraverso il filtro e il tiraggio nella canna fumaria. Le temperature significative dei fumi sono misurate con l'utilizzo di termocoppie di tipo K: in uscita dalla caldaia, in ingresso e in uscita dal filtro e all'uscita del tratto verticale della linea di aspirazione.

Queste misure sono acquisite in continuo e analizzate attraverso un programma software realizzato appositamente per la presente campagna di test. Per aver un migliore controllo sulla dinamica del processo, le temperature superficiali in vari tratti della linea sono monitorate tramite una termocamera a raggi infrarossi (Figura 110).

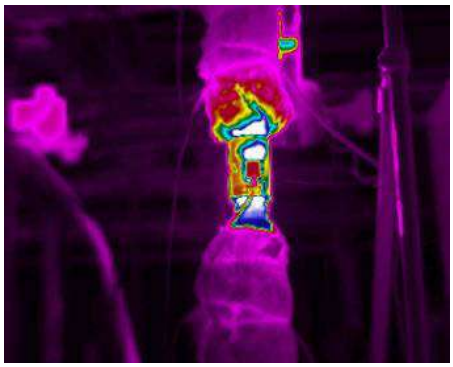


Figura 110. Immagine con termocamera IR del riscaldatore elettrico attivo

Durante la campagna sperimentale sono stati analizzati filtri con una carica di catalizzatore pari al 20% in peso (tale valore è stato individuato nel corso delle precedenti annualità quale giusto compromesso tra l'efficienza di rimozione del particolato e le proprietà meccaniche dei filtri), e con differenti caratteristiche in termini di lunghezza e porosità.

I principali filtri testati (Figura 111) e per i quali sono stati ottenuti risultati significativi, sono riportati in Tabella 45. Laddove non diversamente specificato, le prove sono condotte con una portata volumetrica dei fumi aspirati pari a 7,6 NL/min, in modo da ottenere un campionamento pressoché isocinetico dei fumi in corrispondenza dell'ugello di aspirazione.



Figura 111. Filtro utilizzato nelle prove sperimentali

Tabella 45. Filtri analizzati

Filtro	Lettera di riconoscimento
Filtro a porosità standard lungo 125 mm	A
Primo filtro a porosità maggiorata lungo 125 mm	B
Filtro a porosità maggiorata lungo 61 mm	C
Secondo filtro a porosità maggiorata lungo 125 mm	D

Sono stati provati filtri di lunghezza pari a 125 mm (analogamente alle precedenti annualità) e 60 mm, e con porosità standard (diametro medio dei pori pari a 11 µm) e maggiorata (diametro medio pari a 17 µm, in entrambi i casi con una carica del catalizzatore pari al 20%).

Prove con filtro a porosità standard e lunghezza 125 mm

I filtri analizzati sono stati sottoposti a test della durata di due giorni (con orario indicativamente dalle ore 10 alle ore 16), ad eccezione del filtro a lunghezza ridotta, che è stato provato per tre giorni. L'andamento dei valori di emissione di CO e PM a valle di uno di questi test è riportato in Figura 112.

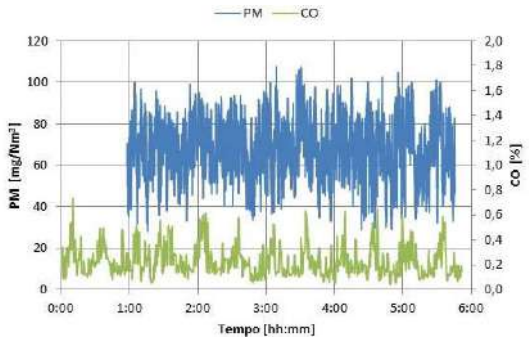


Figura 112. Andamento delle emissioni di PM e CO durante una prova

La rigenerazione dei filtri è stata effettuata attraverso un riscaldatore elettrico a fascia ceramica resistente alle alte temperature (fino a 750 °C). La strategia di rigenerazione, definita con i primi test, prevede che la temperatura di controllo del riscaldatore sia portata da 180 a 300 °C per 5 minuti, poi a 400 °C per altri 5 minuti, quindi incrementata fino a 500 °C a step di 50 °C ogni 5 minuti, a cui segue un periodo di mantenimento della durata di 10 minuti.

Nel corso di diverse prove si è riscontrato che mantenere temperature di rigenerazione superiori a 550 °C per periodi prolungati non porta a significativi benefici in termini di riduzione delle perdite di carico. Gli esperimenti effettuati hanno fatto emergere come la rigenerazione tenda a peggiorare in modo sensibile con il tempo (soprattutto dopo il terzo ciclo), e come la durata di un ciclo di occlusione/rigenerazione del filtro vada nel contempo diminuendo, da un massimo di 3 h a meno di 1 h. Si è altresì notato come i filtri tendano ad aumentare più rapidamente le perdite di carico per valori di caduta di pressione variabili tra i 600 e i 700 Pa (transizione dalla depth filtration alla cake filtration).

A titolo di esempio, in Figura 113 si riporta l'andamento della caduta di pressione registrata in una prova, durante la quale il filtro ha subito 3 rigenerazioni. Si può notare come il filtro subisca un peggioramento delle prestazioni, raggiungendo dopo la rigenerazione valori della caduta di pressione sempre più alti. Anche in questa prova si è notato come mantenere per più tempo alte temperature del riscaldatore elettrico (e quindi del filtro) non abbia portato sostanziali vantaggi alla pressione minima raggiunta, poiché dopo essere diminuita la caduta di pressione ha presentato un graduale appiattimento.

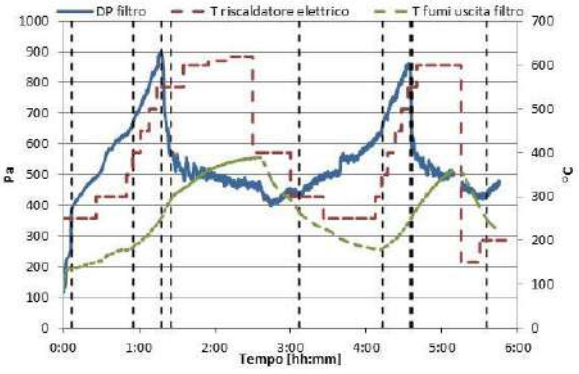


Figura 113. Andamento della caduta di pressione nel filtro a porosità standard e lunghezza di 125 mm

Nelle prove effettuate è emersa infine una relazione tra l'inizio della rigenerazione e la temperatura dei fumi in uscita dal filtro, a valori compresi tra i 220 e i 280 °C. E' da sottolineare come questa temperatura abbia raggiunto i 300 °C nei filtri di lunghezza minore, probabilmente a causa di un più accentuato fenomeno di quenching dei fumi su tale tipologia di filtro.

Per queste tipologie di filtri le prove condotte portano ad osservare che:

- temperature troppo elevate del riscaldatore (> 500 °C) non sembrano portare benefici visibili alla rigenerazione del filtro;
- mantenere per più tempo una temperatura elevata dopo la fase di rigenerazione non porta vantaggi rilevanti;
- il secondo ciclo di rigenerazione ha ancora un'alta efficienza, poiché si raggiungono valori finali di caduta di pressione molto simili a quelli del primo ciclo.

Prove con filtro a porosità maggiorata e lunghezza 125 mm

Sulla base delle prove effettuate con il filtro A, si è affinata la strategia di rigenerazione. La temperatura di base del riscaldatore, durante la fase di normale funzionamento del filtro, è stata impostata a 180 °C per mantenere in temperatura la linea di prova evitando la condensa dei fumi campionati. Una volta superata la caduta di pressione nel filtro caratteristica del passaggio dalla depth filtration alla cake filtration (indicativamente 600 Pa) la temperatura del riscaldatore elettrico è stata impostata a 300 °C, e successivamente viene variata ogni cinque minuti secondo i seguenti intervalli:

- da 300 a 400 °C;
- da 400 a 450 °C;
- da 450 a 500 °C.

Una volta iniziata la rigenerazione nel filtro la temperatura di 500 °C è mantenuta per dieci minuti, alla fine dei quali viene impostata nuovamente la temperatura di 180 °C. Tale procedura è stata utilizzata anche per le successive prove.

Dall'esame della Figura 114 si può notare come durante la prima giornata di prova il filtro abbia effettuato tre cicli completi. Inoltre dal secondo ciclo si nota una perdita di efficienza che però sembra rimanere la stessa nel terzo ciclo della prova. E' possibile osservare come durante la prima fase di impaccamento si raggiunga un valore di caduta di pressione minore rispetto ai 372 Pa del filtro a porosità standard, mentre la variazione di pendenza nel filtro avviene a valori molto simili (intorno i 600 Pa), confermando quindi la bontà del valore scelto per l'inizio della procedura di rigenerazione. La temperatura dei fumi in uscita dal filtro invece assume valori compresi tra i 220 e i 240 °C.

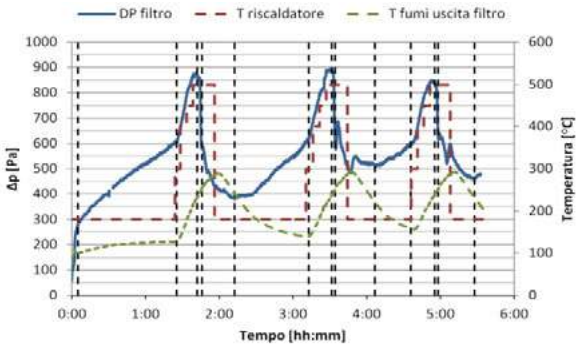


Figura 114. Andamento della caduta di pressione nel filtro

I valori delle emissioni di particolato e di monossido di carbonio sono riportati in Figura 115 dalla quale si ricava che durante la prova le emissioni medie di CO della caldaia sono state minori rispetto alle prove precedenti.

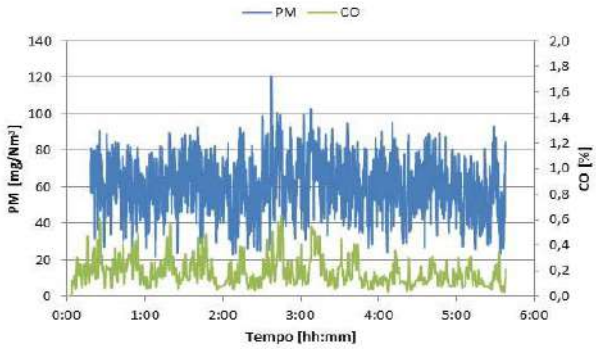


Figura 115. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova B1

Prove filtro a porosità maggiorata e lunghezza 60 mm

Con l'obiettivo di valutare l'influenza della lunghezza del filtro sulle prestazioni di filtrazione e sulla rigenerazione si è analizzao un filtro di lunghezza minore (60 mm).

Lo scopo della prima giornata di prova è stato di testare il campione C nelle stesse condizioni di prova dei precedenti filtri a lunghezza maggiore. Per questo motivo la portata impostata nella pompa a valle della linea di aspirazione pari a 5,6 NL/min, per un totale di 7,6 NL/min di fumi che fluiscono nel filtro e la tecnica di rigenerazione utilizzata nell'impostare il riscaldatore elettrico è stata la stessa utilizzata nelle prove precedenti. In Figura 116 è mostrato l'andamento della caduta di pressione durante la prova. Le cadute di pressione iniziali sono più marcate che nelle prove con i due precedenti tipi di filtro. Ne consegue che la rigenerazione è ostacolata.

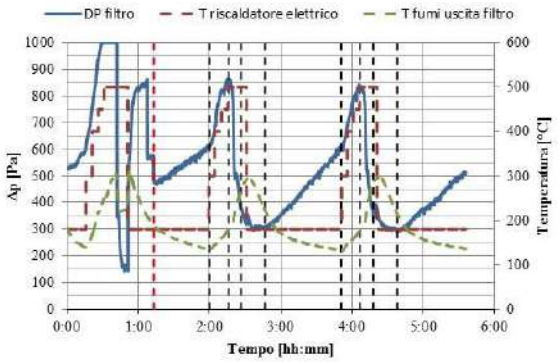


Figura 116. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova C1. La linea rossa indica il momento in cui è stata abbassata la portata di aspirazione della pompa

Riducendo la portata dei fumi a 2 NL/min, la rigenerazione viene favorita e la perdita di carico nel filtro si riduce drasticamente. Sulla base di questa esperienza si è deciso di verificare un eventuale legame tra la rigenerazione del filtro e la portata dei fumi come già evidenziato da altri studi. Si è quindi stabilito di impostare la pompa in modo da avere una portata di fumi minore rispetto a prima, pari a circa la metà (4 NL/min).

La minore quantità di particolato che impatta il filtro permette un aumento della caduta di pressione più graduale. Con una portata di 4 NL/min la rigenerazione avviene senza problemi e l'andamento della caduta di pressione è paragonabile a quello dei filtri della lunghezza di 125 mm. Si rileva, poi, che, a causa della minore portata e della minore quantità di particolato, la caduta di pressione massima e minima di ogni ciclo risulta più bassa rispetto ai filtri con lunghezza di 125 mm. Inoltre, il filtro sembra non perdere di efficienza di rigenerazione, e infatti si raggiungono pressoché gli stessi valori nei due cicli con portata dei fumi pari a 4 NL/min Ciò è dovuto sia alla minore portata di particolato che impatta il filtro, sia al minore effetto di quenching legato alla minore portata che fluisce nel filtro.

Le prove sui filtri a lunghezza ridotta hanno fatto altresì emergere un legame tra la rigenerazione e la portata dei fumi: infatti con una portata di fumi pari a 7,6 NL/min (pari a quella imposta anche per i filtri a lunghezza doppia) la rigenerazione è meno efficace e avviene con maggiore difficoltà nei filtri a lunghezza ridotta.

Le prove sperimentali con filtri aventi le stesse caratteristiche (porosità maggiorata, lunghezza pari a 125 mm) hanno permesso di evidenziare prestazioni simili e una soddisfacente ripetibilità dei risultati. Nei test effettuati è stato possibile misurare l'assorbimento elettrico del rigeneratore, pari a 0,3 kWh per ogni ciclo, tramite un dispositivo conta-energia.

Dal confronto tra i filtri a porosità standard e quelli a porosità maggiorata è emerso che i secondi tendono a raggiungere valori di caduta di pressione post rigenerazione inferiori rispetto ai primi. La maggior parte dei filtri provati è in grado di sostenere fino a 5 cicli, oltre i quali l'esigenza di rigenerazione diventa troppo frequente e la sua efficacia sembra essere insufficiente. Indipendentemente dalla porosità dei filtri, si ha una diminuzione dell'efficienza di rigenerazione del filtro da valori molto alti (il 90% nel caso del filtro a porosità standard, il 70% per il filtro a porosità maggiorata) a valori inferiori del 50% .

Presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno sono proseguite le attività relative ai sistemi di filtrazione ceramici catalizzati per la rimozione del particolato dalle emissioni gassose di impianti di combustione a biomassa. La principale novità delle attività svolte in questa annualità è stata l'ottimizzazione della

procedura che consente di modificare la porosità iniziale di supporti in carburo di silicio, consentendo in tal modo la preparazione di filtri catalitici Wall Flow che, a parità di carico di specie attive, sono caratterizzati da minori perdite di carico e, quindi, da minori frequenze di rigenerazione.

Una prima fase di lavoro ha riguardato la validazione sperimentale dei risultati ottenuti nella precedente annualità e la verifica di parametri quali:

- temperatura minima di attivazione del catalizzatore a base di ferrite di rame ($CuFe_2O_4$);
- perdite di carico dei sistemi di filtrazione in relazione alla portata dei fumi per unità di volume del filtro, alla porosità e alle caratteristiche geometriche dei filtri;
- efficienza di abbattimento di particolato e CO nei fumi di combustione, in relazione alla porosità del filtro e alla percentuale di catalizzatore depositato sulla matrice filtrante;
- frequenza di rigenerazione dei supporti filtranti.

Sono state, inoltre, confrontate le diverse tipologie di particolato carbonioso emesso da una caldaia a biomassa e da un motore diesel e le indagini hanno rilevato che presentano la stessa struttura a grappolo e pressappoco le stesse dimensioni medie (circa 50 nm), anche se il particolato emesso dalla caldaia ha un maggior contenuto di metalli pesanti adsorbiti sulla matrice carboniosa.

Durante questa annualità, a valle del lavoro svolto in precedenza, l'attenzione è stata rivolta ai filtri catalitici con il 20% in peso di ferrite di rame. I risultati ottenuti provando i filtri catalitici in carburo di cilicio (SiC) in configurazione Wall Flow allo scarico del motore diesel hanno confermato le loro buone prestazioni in termini di attività catalitica nei confronti dell'ossidazione del particolato carbonioso, già mostrate in precedenza. In particolare le prove hanno evidenziato che i filtri caricati col 20% in peso di ferrite di rame hanno una temperatura di attivazione di circa 400 °C.

Più nel dettaglio, i risultati di tali test hanno confermato che i filtri in configurazione Wall Flow sono caratterizzati da un'efficienza di filtrazione superiore al 90%, consentendo quindi l'abbattimento di quasi tutto il particolato emesso, e che in circa 20 minuti si ottiene la loro completa rigenerazione.

Al fine di ridurre le perdite di carico, e quindi ridurre la frequenza delle rigenerazioni dei filtri catalitici, già nella scorsa annualità è stata messa a punto una procedura di preparazione che consentiva di aumentare la porosità della matrice ceramica di partenza. La procedura è stata ulteriormente migliorata, individuando in particolare la durata ottimale del trattamento acido che consente di aumentarne la porosità senza inficiarne la resistenza meccanica. A tal scopo è stato misurato il carico di rottura dei monoliti al variare del tempo di immersione nella soluzione acida utilizzata per erodere dall'interno i supporti ceramici ed aumentarne la porosità. In seguito ai risultati delle prove effettuate è stato individuato quale parametro ottimale un tempo di trattamento nella soluzione acida di 30 minuti, in corrispondenza del quale la porosità iniziale (pari a circa 17 μm) delle matrici ceramiche viene aumentata a circa 25 μm.

Determinata la procedura di erosione dei supporti ceramici in carburo di silicio, sono stati preparati e caratterizzati, mediante diverse tecniche (BET, porosimetria a penetrazione di mercurio analisi SEM e SEM-EDX e prove di adesione agli ultrasuoni) vari filtri catalitici al 20% in peso di ferrite di rame.

In particolare la porosimetria a penetrazione di mercurio effettuata su un campione di filtro al 20% in peso di ferrite di rame ha evidenziato l'effettivo aumento della porosità dei campioni che, a parità di carico di catalizzatore, sono passati da un diametro medio dei pori di circa 13 μm a circa 17,5 μm.

Le analisi SEM e SEM-EDX hanno confermato l'effettivo aumento della porosità del filtro. In particolare le immagini SEM hanno evidenziato il ricoprimento del supporto con le specie attive e la buona ed omogenea distribuzione del catalizzatore sui granuli di carburo di silicio. Inoltre sempre dalle stesse immagini si evince che le specie attive si depositano all'interno del filtro diminuendo il diametro medio dei pori e non occludendo le porosità. Le immagini SEM, inoltre, mostrano chiaramente l'assoluta mancanza di crepe e rotture interne dovute all'immersione dei monoliti in SiC nella soluzione acida. Le analisi EDX, inoltre, evidenziano che sul filtro catalitico sono presenti non solo C, O e Si (costituenti del supporto), ma anche Cu e Fe (costituenti delle specie attive): in tal modo si è avuta l'ulteriore conferma che con la procedura di preparazione messa a punto è possibile depositare le specie attive sul supporto in SiC senza la preliminare deposizione di nessun washcoat.

I risultati delle prove di adesione delle specie attive hanno mostrato che la perdita di peso, dopo 5 cicli, è di circa lo 0,1%. Valore molto basso che conferma la bontà della procedura di preparazione messa a punto.

Sono stati poi appositamente preparati vari filtri catalitici che sono stati forniti ad ENEA per essere testati allo scarico di una caldaia a biomassa. Parallelamente alle prove effettuate in ENEA, i filtri catalitici caratterizzati dall'aumento della porosità iniziale sono stati testati allo scarico di un motore Diesel. In particolare i risultati relativi al filtro caricato col 20% in peso di ferrite di rame hanno evidenziato che:

- i filtri sono caratterizzati da perdite di carico iniziali più basse;
- l'aumento delle perdite di carico avviene in un tempo maggiore, come era prevedibile;
- la temperatura di attivazione è rimasta invariata a circa 400°C;
- l'efficienza di filtrazione è sempre superiore al 90%.

d. Diffusione dei risultati

d.1 Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali

Il diffuso interesse, a livello nazionale e internazionale, verso un uso crescente di biomasse e rifiuti organici di diversa natura per la produzione di energia elettrica e nuovi vettori energetici (biometano), ha determinato anche nel corso dell'annualità 2014 dell'Accordo di Programma sulla Ricerca di Sistema Elettrico il coinvolgimento dell'ENEA in diversi contesti sia a livello nazionale, con una costante attività di supporto tecnico-scientifico ai Ministeri per la definizione di un quadro nazionale di riferimento nel settore, sia in campo internazionale, con l'obiettivo di favorire il rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali sul tema della bioenergia.

In particolare, per quel che riguarda le collaborazioni internazionali, sono proseguite le attività connesse con la presenza dell'ENEA nella European Energy Research Alliance (EERA) e nell'Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) sulla Bioenergia, con scambio di informazioni sui programmi internazionali nel settore e studi e analisi su temi di comune interesse.

In ambito IEA, ENEA ha coordinato, insieme al GSE, il contributo delle strutture nazionali interessate e partecipato direttamente alle attività dell'Executive Committee (ExCo) e delle seguenti Task:

- Task 33 - Thermal gasification of biomass
- Task 42 - Biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass

La Task 33 svolge attività di monitoraggio, analisi e scambio di informazioni su ricerca, sviluppo, dimostrazione e commercializzazione, concernenti la gassificazione delle biomasse. Tali attività vengono condotte cercando un continuo ed attivo coinvolgimento delle industrie operanti nel settore delle bioenergie e favorendo la cooperazione tra i Paesi partecipanti alla Task, con l'obiettivo di fornire un contributo utile alla rimozione delle barriere che attualmente ostacolano il successo di questa tecnologia, promuovendo la commercializzazione di processi di gassificazione delle biomasse efficienti in termini energetici, economicamente competitivi e sostenibili da un punto di vista ambientale.

La Task 42 si occupa invece di attività e tecnologie connesse allo sviluppo delle bioraffinerie, ovvero di piattaforme tecnologiche integrate attraverso le quali le biomasse in ingresso vengono trasformate in combustibili, energia e prodotti chimici in maniera analoga a quanto avviene in una raffineria convenzionale.

Nell'ambito dei meeting periodici dell'Executive Committee dell'IEA/BA (Bruxelles, 21-23 ottobre 2014 e Dublino 19-21 maggio 2015), sono state svolte azioni di scambio di informazioni sui programmi dei diversi Paesi e analisi congiunte delle tecnologie di interesse. A Bruxelles è stata avanzata la proposta di tenere il primo meeting del 2016 a Roma, proposta che è stata ufficializzata e ratificata formalmente durante il meeting di Dublino. Nel corso del meeting, organizzato da GSE e ENEA, si terrà un Workshop tematico sullo "stato dell'arte" delle tecnologie per la produzione del biometano, nel quale è previsto uno specifico intervento ENEA sulle attività di ricerca svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico. Sarà inoltre organizzata, sempre da parte di ENEA e con il supporto di ITABIA (Italian Biomass Association) una visita tecnica presso un impianto di produzione di biogas da reflui zootecnici e residui agricoli nei pressi di Roma.

Per quel che riguarda più in particolare la partecipazione alla Task 33, si sono svolti 2 meeting semi-annuali, di cui il primo, nel mese di novembre 2014, presso KIT Karlsruhe, Germania ed il secondo, a maggio 2015, presso il CIUDEN (Symposium on Renewable Energy and Products from Biomass and Waste), Ponferrada, Spagna, che è un potenziale nuovo partner nella Task per il prossimo triennio 2016-2018. Nel primo meeting, è stata discussa la pianificazione delle attività per il prossimo triennio, in particolare per quel che riguarda l'inserimento all'interno della Task della gassificazione dei rifiuti, la produzione di idrogeno e relativi usi finali e, su proposta specifica dell'Italia, la gassificazione in condizioni sub e super critiche di biomasse ad alto contenuto in umidità. Nello corso dello stesso meeting è stato poi organizzato un workshop dal sul tema Liquid Biofuels, al quale hanno preso parte diverse industrie che operano nella produzione di metanolo, DME, Gas naturale sintetico, biofuels da FT.

Il secondo meeting ha avuto come oggetto principale la definizione della cooperazione con la Task 36 (energia da rifiuti) nella definizione delle attività relative alla gassificazione dei rifiuti solidi urbani, con la valutazione del potenziale mercato per la tecnologia di gassificazione, gli aspetti di regolamentazione ambientale, le criticità

connesse con la pulizia e la valutazione di metodiche analitiche consolidate, con un comune denominatore tra le diverse presentazioni provenienti dal mondo scientifico e industriale rappresentato dall'interesse verso le tecnologie di gassificazione dei rifiuti per la produzione di biocombustibili.

Nell'ambito della partecipazione alla Task 42, nel corso dell'annualità 2014 della RSE è stata svolta una specifica attività di "networking" fra i principali operatori nazionali del settore per raccogliere una serie di osservazioni e contributi utilizzati successivamente per la redazione di un report dal titolo "The role of industry in a transition towards the BioEconomy in relation to biorefinery".

A maggio 2015 l'Italia ha ospitato in Sardegna il convegno dell'IEA Bioenergy Task 40 e Task 42. L'evento è stato organizzato da ENEA in collaborazione con il CNR di Sassari ed ha coinvolto ricercatori, mondo industriale e policy maker per discutere degli scenari italiani ed europei di settore. I relatori delle Task IEA Bioenergy hanno evidenziato quanto lo scenario globale attuale offra un'opportunità chiave per focalizzare risorse ed investimenti nel settore dei bioprodotti ad alto valore aggiunto e delle tecnologie che utilizzano biomasse. In questo contesto, l'Italia si posiziona all'avanguardia nello sviluppo di moderne bioraffinerie, grazie ad un lavoro sinergico tra l'industria e il mondo della ricerca nazionali che ha dato vita ad esempi eccellenti: la bioraffineria di Matrica (Versalis - Novamont), che ha ospitato parte del convegno, e la bioraffineria di Crescentino (Mossi & Ghisolfi) in provincia di Vercelli. Impianti fondati su forti investimenti in innovazione e ricerca che puntano all'integrazione nei territori, alla costruzione di una filiera di approvvigionamento locale e ad una gestione compatibile con gli agro-ecosistemi. Le presentazioni dell'evento sono accessibili al link http://www.enea.it/en/events/iea-task42_5may15 /Task42-Matrica_5may15.

Nel corso della presente annualità ENEA ha curato inoltre la partecipazione nazionale alle attività di EERA (European Energy Research Alliance) sulla Bioenergia (SP5 Stationary Bioenergy). L'obiettivo generale delle azioni condotte in quest'ambito riguarda la cooperazione fra istituti che svolgono attività di ricerca pre-competitiva al fine di fornire le basi tecniche e scientifiche per l'ulteriore sviluppo dei sistemi per la produzione di energia che utilizzano biomasse ed individuare aree di interesse comune per lo sviluppo tecnologico congiunto, allo scopo di accelerare il superamento di barriere tecnologiche e lo sviluppo di nuove soluzioni.

Nel mese di giugno 2015, ENEA ha partecipato al workshop del Sub Programme su Stationary Bioenergy (organizzato a Petten (NL) presso l'istituto ECN (Energy research Centre of the Netherlands). Durante il meeting sono state riconfermate le tre linee di attività principali del Sub Programme:

- WP1 - Residential/Domestic heating and cooling (including micro-CHP) che si occupa degli aspetti energetici, ambientali e di utilizzo dei sistemi di piccolo taglia, a cui ENEA può contribuire con le proprie competenze relative allo sviluppo di sistemi, di analisi e di prova di dispositivi per l'abbattimento delle emissioni;
- WP2 - Industrial and municipal combined heat, power and cooling (CHPC) che si interessa degli aspetti legati all'integrazione con altri fonti rinnovabili (solare ed eolica), alla modellazione e monitoraggio della combustione ed alla possibilità di recupero di elementi per l'industria chimica e per usi agronomici dagli scarti della produzione di energia,
- WP3 - Utility multifuel operation che intende infine supportare il passaggio ad un utilizzo di biomassa superiore al 50% rispetto alle fonti fossili in impianti di co-firing, in particolare con analisi volte a verificare potenzialità ed effetti del funzionamento a carico parziale e a definire nuove soluzioni tecnologiche e di processo.

Il workshop è stato finalizzato al potenziamento delle attività congiunte di networking e di progettualità e, di conseguenza, allo stesso seguiranno periodici aggiornamenti in merito alla possibilità di partecipare a bandi di ricerca internazionali anche su tematiche trasversali ad altri SP (ad esempio: sistemi ibridi solare/biomassa, bioCCS, bioraffinerie, produzione per via termica di biofuel, etc.) e la presentazione di proposte progettuali nell'ambito di call su programmi europei e di cooperazione internazionale.

ENEA, in particolare, metterà a disposizione il proprio contributo sulle tematiche essenzialmente riconducibili a: analisi energetiche ed ambientali delle filiere legno-energia; sviluppo di sistemi di contenimento delle emissioni conseguenti alla produzione di combustibili alternativi (biocombustibili densificati a partire da scarti di bioraffinerie) e utilizzo degli stessi in direct e indirect co-firing; sistemi CHP con integrazione di biomassa e solare; analisi e modellazione di sistemi CHP.

d.2 Comunicazione e diffusione dei risultati

Le attività relative alla produzione di elettricità da biomasse svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico e i loro risultati sono state oggetto del Workshop dal titolo "Le Bioenergie e la Ricerca di Sistema Elettrico", organizzato dall'ENEA presso la propria Sede Legale di Roma il 25 giugno 2015 (il secondo di una serie di workshop tematici sulle diverse tecnologie di interesse della RdS), che ha visto la partecipazione di circa 70 persone.

Nel corso dell'evento sono state illustrate sia le attività svolte durante le precedenti annualità della RdS, sia quelle in corso, con una serie di relazioni seguite da una tavola rotonda cui hanno preso parte rappresentanti della Pubblica Amministrazione, del mondo della ricerca e dell'industria nazionale del settore.

Le attività descritte nel PAR 2014 e svolte durante l'annualità, ed i relativi risultati, sono stati comunicati e diffusi in occasione di congressi, workshops e seminari sulle tematiche specifiche e mediante la pubblicazione di articoli su riviste nazionali e internazionali del settore.

PARTE B. ATTIVITÀ POLO TECNOLOGICO DEL SULCIS

Presso Sotacarbo sono stati effettuati test di gassificazione e co-gassificazione di biomassa e carbone al fine di testare l'impianto dimostrativo da 5 MW_t , opportunamente modificato, con differenti combustibili.

L'impianto dimostrativo (Figura 117) è costituito dalle sezioni di gassificazione, pulizia gas e torcia. Il combustibile solido, mediante opportuno sistema di caricamento, viene alimentato dall'alto al gassificatore a letto fisso in controcorrente, mentre la miscela gassificante (vapore surriscaldato miscelato alla corrente di aria) viene inviata al sistema distributore del reattore posto nella parte bassa dello stesso, in controcorrente rispetto al combustibile solido. Un agitatore (stirrer) immerso nel letto solido provvede, se azionato, ad omogeneizzare il letto medesimo. Il reattore è raffreddato tramite camicia alimentata ad acqua ed il raffreddamento viene effettuato tramite l'evaporazione dell'acqua medesima. Il vapore prodotto viene inviato ad un condensatore ad aria a convezione forzata che condensa il vapore. La fase condensata viene nuovamente alimentata alla camicia. La circolazione dell'acqua nel circuito di raffreddamento (camicia e condensatore) avviene tramite circolazione naturale.



Figura 117. Viste Impianto dimostrativo di Gassificazione 5MWt c/o Sotacarbo

Lo stirrer è raffreddato tramite circuito chiuso con acqua in fase liquida che ne percorre l'interno e provvede al raffreddamento dello stirrer medesimo rimanendo in fase liquida. La circolazione dell'acqua avviene tramite pompe. Lo smaltimento dell'energia termica asportata dall'acqua di raffreddamento avviene per dispersione in ambiente in un serbatoio polmone dimensionato opportunamente. Il gas di sintesi così ottenuto in uscita dal reattore viene inviato ad una sezione di abbattimento di temperatura, del TAR, del particolato e dei composti solforati. Questa unità di processo è costituita da uno scrubber, che, realizzando un netto abbassamento della temperatura dei fumi in uscita dal gassificatore (300÷450 °C), permette la condensazione dei composti organici condensabili trascinati dal flusso gassoso. Il particolato presente viene lavato con acqua e soda dalla corrente gassosa mediante trascinamento dell'acqua di lavaggio. Il syngas così ottenuto, purificato, raffreddato e saturo di umidità, è inviato alla torcia assieme all'aria comburente a 20 °C e al gas combustibile ausiliario (GPL) per permettere il processo di combustione e smaltimento del syngas.

Una task force dedicata allo start up e alla gestione dell'impianto di gassificazione dimostrativo è stata istituita con la partecipazione di personale ENEA e Sotacarbo. In particolare l'attività ha visto la partecipazione del personale ENEA nella predisposizione e verifica delle modifiche attuate in impianto, nella definizione e predisposizione delle specifiche di prova, nella sperimentazione e diagnostica e, infine, nell'elaborazione e analisi dei dati ottenuti.

a.1. Progetto e realizzazione delle modifiche dell'impianto dimostrativo Sotacarbo

Nell'ambito del presente task sono state apportate delle modifiche all'impianto dimostrativo per poter migliorare l'esercizio dell'impianto dimostrativo e ottimizzare la fase di sperimentazione [rapporto RdS/PAR2014/164]. In particolare sono state verificate, progettate e modificate alcune parti dell'impianto dimostrativo, di seguito riportate:

- Progettazione e modifica del sistema di caricamento del combustibile
- Progettazione del sistema di scarico automatico delle ceneri
- Sistema di raffreddamento della camicia del gassificatore
- Sistema di movimentazione del letto del gassificatore (STIRRER)
- Sistema di accensione del gassificatore
- Sistema di adduzione aria processo
- Scrubber e sistemi di scarico e stoccaggio reflui
- Linea Vent
- Sistema Torcia
- Sistema di regolazione e controllo
- Sistema di campionamento e analisi.

Sono di seguito descritte le principali modifiche apportate ai sistemi di caricamento del combustibile, raffreddamento della camicia del gassificatore e scarico ceneri:

1. Sistema di caricamento del combustibile. Il sistema di caricamento del combustibile presente in impianto a paranco e tramogge si è dimostrato eccessivamente lento (e impegnativo dal punto di vista di impiego del personale) per la gassificazione di cippato di legno (1000 kg/h con 4 big bag per un totale di 4 m^3/h). Tale problematica è stata risolta progettando e realizzando un sistema di caricamento automatico a redler (Figura 119). Durante i test di gassificazione (sia di solo cippato di legno sia di miscele di cippato di legno e di carbone colombiano) si sono comunque verificati alcuni problemi dovuti a impaccamenti del combustibile in ingresso al gassificatore. Per tale motivazione sono allo studio delle modifiche sulle tubazioni di alimento (e sulle ghigliottine di carico) che permettono al combustibile di confluire nel gassificatore.



Figura 118. Tramoggia di caricamento e sistema di traino con comando a catenaria (a sinistra) e scomparti del sistema Redler (a destra)

2. Sistema di raffreddamento della camicia del gassificatore. L'eliminazione di due rotametri ed altre modifiche effettuate sul piping hanno risolto i problemi manifestatisi in precedenza, eliminando le perdite di carico sul circuito ed innalzando la potenzialità dell'impianto di raffreddamento. Inoltre, per migliorare la conoscenza dell'andamento dei principali parametri del circuito, sono stati introdotti diversi strumenti di misura: un misuratore di portata di condensa installato a valle dell'aerotermo e un misuratore visivo del livello dello steam drum a supporto di quello elettronico (un differenziale di pressione) che durante i test presentava delle misure poco attendibili.

3. Sistema di scarico ceneri. Le modifiche apportate hanno riguardato.
   - realizzazione di un sistema di raffreddamento della ralla con vapore,
   - sostituzione della ralla con una più resistente,
   - realizzazione di un sistema a protezione della ralla,
   - modifica dell'allineamento motoriduttore-albero-griglia.

Durante il corso dell'annualità sono poi state effettuate diverse migliorie sulla strumentazione di misura presente nell'impianto dimostrativo Sotacarbo, sono stati eseguiti i seguenti interventi:

- taratura del misuratore di portata volumetrico per syngas FT001P e regolazione del misuratore massico per aria 491P;
- installazione del misuratore visivo di livello per lo steam drum;
- installazione del misuratore di condensa sul circuito di raffreddamento del vapore alla camicia del gassificatore;
- installazione dei misuratori di livello per i tank del circuito scrubber.

a.2. Sperimentazione presso l'Impianto Dimostrativo Sotacarbo

Sulla base dell'esperienza maturata degli studi di processo e di una prima caratterizzazione del syngas, sono state predisposte da parte del gruppo di lavoro ENEA/Sotacarbo le procedure operative sia per la fase di sperimentazione, sia per la successiva fase di esercizio per la generazione elettrica in continuo. Sono stati inoltre effettuati test sperimentali di lunga durata per un totale di circa 200 ore, al fine di pervenire ad una prima caratterizzazione dell'impianto in fase di funzionamento in regime stazionario. E' stato raggiunto l'obiettivo di eseguire test di lunga durata con sperimentazioni di 48 ore e più in continuo.

Le procedure operative sono individuabili nelle seguenti fasi principali: verifiche iniziali e avviamento degli ausiliari; start-up dell'impianto; fase operativa; shut-down dell'impianto.

I principali obiettivi delle campagne sperimentali sono stati quelli di:

- eseguire dei test di lunga durata al fine di verificare il funzionamento del gassificatore in continuo, di verificare la stabilità del processo e mediante l'analisi del syngas ottenuto fornire indicazioni utili alla determinazione dei parametri di progettazione dei sistemi di pulizia syngas e produzione di energia elettrica da immettere in rete;
- testare il processo di gassificazione di biomasse e di co-gassificazione con diversi combustibili. In particolare quelli utilizzati in alimentazione sono stati cippato di legna vergine (eucaliptus e pinus pinea) e una miscela di carbone (colombiano) e cippato di legna vergine (eucaliptus e pinus pinea di provenienza locale);
- automatizzare e strumentare meglio alcune parti dell'impianto quali: sistema di caricamento combustibile, sistema di raffreddamento della camicia del gassificatore, gruppo scrubber.

Tali sperimentazioni hanno permesso di:

- verificare il funzionamento del gassificatore in continuo e la stabilità del processo;
- determinare i parametri di progettazione dei dispositivi per la pulizia del syngas per renderlo idoneo ad alimentare i sistemi produzione di energia elettrica.

In generale, i test sperimentali hanno mostrato che il reattore di gassificazione può essere utilizzato per alimentare i sistemi di produzione di energia elettrica fino ad una taglia massima di circa 500 kWe. Per tale motivazione durante questa annualità si è proceduto all'automazione dell'impianto con un sistema di caricamento automatico e con diverse modifiche che hanno permesso di ottimizzare il processo di gassificazione. Nella prossima annualità si prevede di realizzare un sistema di clean up del syngas per accoppiare il gassificatore ad un cogeneratore e di continuare ad ottimizzare e automatizzare il reattore di gassificatore.

La tecnologia di gassificazione del reattore dell'impianto ben si presta alla gassificazione di cippato di legno sia in termini di portata di syngas prodotto sia in termini di potere calorifico. Le analisi delle ceneri scaricate mostrano la quasi totale assenza di carbonio fisso residuo. In Tabella 46 sono riportati i test sperimentali effettuati nel corso del 2015.

Nel primo test sperimentale di gassificazione di cippato di legna, la portata d'aria è stata contenuta intorno ai 600-650 kg/h con un consumo di combustibile pari a 250-300 kg/h ed una portata di syngas prodotto di 650-720 m^3/h; il potere calorifico del syngas si è attestato intorno ai 5,15 MJ/kg. Nel secondo test si è aumentata la portata di aria processo con un massimo di 850 kg/h e la portata di combustibile ad un massimo di circa 800 kg/h con un considerevole aumento della portata di syngas (1000-1100 m^3/h) ed un potere calorifico all'incirca di 4,7 MJ/kg.

Tabella 46 .Test sperimentali con biomasse e con mix di carbone e biomasse

Data	Processo e alimentazione
25-27/mar	Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea
28-30/apr	Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea
10-12/giu	Co-gassificazione biomasse, cippato di Eucalipto / carbone colombiano
30/giu-02/lug	Co-gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea / carbone colombiano

Questi dati dimostrano come il gassificatore sia in grado di alimentare un sistema di produzione di energia elettrica come ad esempio un motore a combustione interna (con rendimento supposto intorno al 30%), con potenzialità di circa 300 kWe con i parametri di gassificazione utilizzati nel primo test sperimentale e di circa 500 kWe con i parametri di gassificazione utilizzati nel secondo test sperimentale.

Effettuando per i due test sperimentali il calcolo del rendimento di gas freddo (definito come il rapporto tra la potenza chimica prodotta dal gassificatore sotto forma di syngas e quella introdotta nel gassificatore attraverso il combustibile) è stata ricavata un'efficienza di gassificazione di circa 90% per il primo, e di circa 80% per il secondo.

Per quanto invece riguarda i due test di co-gassificazione con miscele di carbone e cippato di legno, effettuati successivamente si può asserire che:

1. durante il primo il primo test la miscela di combustibile utilizzata ha avuto una percentuale in peso del carbone pari al 35-40%; i risultati non sono stati ottimali anche a causa di alcune problematiche riscontrate sul sistema di caricamento del combustibile. In generale si può affermare che l'eccessiva differenza di reattività fra i due combustibili ha comportato il consumo rapido del cippato e la permanenza del carbone, molto meno reattivo del cippato, con variazioni di prestazioni rilevanti durante il test sperimentale. E' stata appurata la difficoltà di gassificare il mix di combustibili nelle percentuali utilizzate nel corso del test sperimentale;
2. durante il secondo test il combustibile in alimentazione ha avuto una percentuale in peso del carbone pari al 10% e cippato di legno al 90%. I risultati sono stati ottimali con delle prestazioni del tutto simili al primo test sperimentale con solo cippato di legno; il rendimento del gassificatore è stato leggermente inferiore all'80% contro il 90% registrato nel primo test sperimentale a cippato.

In entrambi i test sperimentali è stata utilizzata una quantità volumetrica di combustibile inferiore rispetto ai test con solo cippato. In particolare, nel corso della prova sperimentale del 30 giugno-02 luglio 2015, sono stati gassificati mediamente 300 kg/h di miscela 90/10 (Cippato di legna vergine Cip5/Carbone colombiano), con potere calorifico inferiore pari a 18,97 MJ/kg. La portata di aria utilizzata si è attestata sui 620-670 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato poco utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri.

La Figura 119 mostra l'andamento nel tempo delle concentrazioni medie, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H_2, CO e CO_2 e CH_4

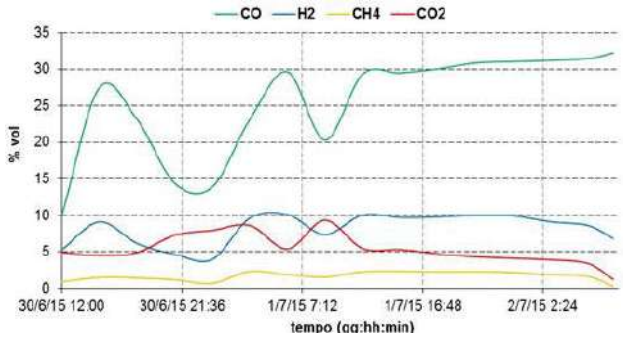


Figura 119. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo della prova 30 giu - 02 lug2015

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H_2 risulta pari a circa il 10%, quella di CO pari a circa il 27%, quella di CH_4 pari al 1,6% e quella di CO_2 pari a circa 3,9% per un rapporto CO/CO_2 pari a 6,9 ed un rapporto H_2/CO pari a 0,37.

In conclusione, si può affermare che i combustibili utilizzati, carbone colombiano e cippato di legno (Pinus Pinea), portano a dei buoni risultati della co-gassificazione se la percentuale di carbone si mantiene intorno al 10%. Rispetto all'utilizzo del solo cippato, la gestione dell'impianto è facilitata dalla minore quantità volumetrica di

combustibile in alimentazione.

Una prima caratterizzazione del processo è stata eseguita e le modalità ed i parametri chiave per ottenere condizioni operative standard sono stati identificati. Dopo le prime sessioni sperimentali, diverse attività sono tutt'ora in esecuzione e sviluppi futuri sono previsti. L'obiettivo dichiarato è quello di dimostrare il funzionamento di un'unità completa da circa 500 kWe, collegata alla rete per la generazione di energia.

a.3 Tecnologie avanzate di co-gassificazione e trattamento tar

Nell'ambito di questo obiettivo era stata prevista la prosecuzione delle attività sperimentali avviate in precedenza, al fine di ottenere un più approfondito sviluppo e caratterizzazione del processo di co-gassificazione biomassa-carbone.

L'attività sperimentale di gassificazione in oggetto avrebbe dovuto essere condotta presso l'impianto GESSYCA (messo a punto nel precedente PAR), opportunamente modificato sia con l'acquisizione e l'installazione di nuova sensoristica, sia con la realizzazione "ex novo" di un sistema di abbattimento del tar e del particolato mediante un reattore secondario di reforming catalitico ossidativo, riempito con materiale inerte o composti a reazione basica (olivina, allumina, ossidi di Ca e/o Mg ecc.) e collocato in serie al gassificatore.

A valle di una prima valutazione del processo, inserito nella cornice del presistente impianto GESSYCA, è stata svolta l'attività di redazione del progetto esecutivo del reattore secondario di reforming catalitico ossidativo, che ha condotto alla predisposizione dei disegni costruttivi ed all'individuazione delle interfacce di sistema nell'impianto (piping per il flusso di processo, connessione meccaniche e staffature, sensoristica di corredo, segnali dedicati per il monitoraggio termico verso il sistema di controllo, linee per riscaldamento elettrico). Una rappresentazione schematica del componente è riportata in Figura 120.

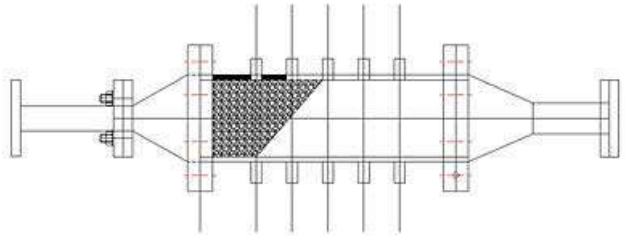


Figura 120. Progetto del reattore secondario di abbattimento TAR

La prosecuzione delle attività sperimentali avviate nel precedente PAR, al fine di ottenere un più approfondito sviluppo e caratterizzazione del processo di co-gassificazione biomassa-carbone è stata condotta sugli impianti di gassificazione presso Sotacarbo. Non è stato possibile effettuare invece la sperimentazione sull'impianto GESSYCA in quanto non si è riusciti a completare, nei tempi dell'annualità, quanto previsto circa l'iter di acquisizione della nuova sensoristica e la realizzazione "ex novo" del reattore, che verrà costruito ed installato nella prossima annualità.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Le attività del progetto sono state svolte in stretta collaborazione fra i ricercatori delle Unità Tecniche dell'ENEA e quelli delle strutture di ricerca universitarie riportate nel seguito.

- **Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale**
  "Prove di fermentazione di biomassa lignocellulosica e sviluppo di un modello matematico riguardante la cinetica della digestione anaerobica di materiale lignocellulosico, in particolare con sistemi a secco" (linea di attività a.1)
- **Università della Tuscia, Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche**
  "Studio e sviluppo di un processo fermentativo anaerobico di materiali ad alto contenuto in chitina e di acque di vegetazione" (linea di attività a.1)

- **Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Chimica**
  "Supporto alla realizzazione dei test ed alla caratterizzazione dei mezzi di coltura e della biomassa algale" (linea di attività a.2)
- **Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica (DIATIC)**
  "Attività di preparazione e caratterizzazioni dei catalizzatori, valutare la loro stabilità chimica e meccanica, individuare fenomeni irreversibili per la rigenerazione e l'implementazione del modello matematico" (linea di attività a.3)
- **Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Industriale**
  "Attività di preparazione e caratterizzazioni dei catalizzatori, valutare la loro stabilità chimica e meccanica, individuare fenomeni irreversibili per la rigenerazione e l'implementazione del modello matematico" (linea di attività b.1)
  "Sviluppo, realizzazione e verifica sperimentale di filtri catalitici strutturati, approfondendo quanto studiato nelle precedenti annualità, con screening e la caratterizzazione dei supporti ceramici, con tecniche di microscopia SEM-EDS, XRD, densità e porosimetria, termogravimetria TGA/DTA" (linea di attività c.3)
- **Sapienza Università di Roma, Dipartimento di ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente**
  "Validazione e ottimizzazione del processo di separazione con AMP in solvente organico, continuando le prove a livello di laboratorio con gas simulati ed affiancando ENEA nella sperimentazione con biogas reale su un sistema progettato ad hoc" (linea di attività b.2)
- **Università di Chieti e Pescara, Dipartimento di Farmacia**
  "Validazione e ottimizzazione del processo di separazione mediante formazione dei gas idrati con ulteriori prove sperimentali da effettuare sugli stessi apparati usati nella precedente annualità al fine di aumentare la conversione di acqua in idrato, migliorare la reologia della fase idrato, diminuire le pressioni ed aumentare le temperature di lavoro" (linea di attività b.2)
- **Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia**
  "Produzione di nuovi quantitativi dei sorbenti risultati più promettenti nella scorsa annualità, preparati in pellet granulari e testati in laboratorio, da fornire all'ENEA per la sperimentazione con il gas reale. Caratterizzazioni chimiche e morfologiche, pre e post test (SEM-EDX, XRF, XRD, FTIR, TGA-DTA, BET-BJH) di tutti i materiali testati, al fine di avere una più completa descrizione della fenomenologia dei processi in atto" (linea di attività b.3)
- **Università di Bologna. Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari"**
  "Preparazione di quantitativi adeguati per la sperimentazione dei catalizzatori di metanazione del tipo Ni/Mg/Al in un rapporto ottimizzato. Caratterizzazioni chimiche e morfologiche dei catalizzatori, pre e post test (granulometria, porosimetria, SEM/EDX, analisi in temperatura programmata TPR/TPO, XRD, spettrometria Raman con microscopia)" (linea di attività b.3)

Per quel che riguarda invece le attività relative al **Polo Tecnologico del Sulcis** (Parte B), finalizzate allo sviluppo di tecnologie associate alla gassificazione delle biomasse per le quali si possano utilizzare gli impianti di gassificazione del carbone, la maggior parte delle stesse è stata svolta nell'ambito di uno specifico Accordo di Collaborazione con la Società **Sotacarbo S.p.A.**, con il supporto tecnico e scientifico dell'ENEA. In particolare, si è proceduto ad apportare modifiche e migliorie all'impianto di gassificazione costituito dal reattore a letto fisso up-draft da 5 MWt, presente presso il Centro Ricerche Sotacarbo, allo scopo di renderlo adatto al funzionamento in continuo per la co-gassificazione delle biomasse (cippato di legna) e carbone per la produzione di un syngas utilizzabile anche per la generazione elettrica, e ad effettuare sull'impianto modificato una serie di test sperimentali di gassificazione di biomassa e co-gassificazione di biomassa e carbone.

Energia elettrica da fonte solare
Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

Lo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche innovative è ritenuto cruciale per combattere in maniera efficace i cambiamenti climatici e per garantire la sicurezza della fornitura di elettricità in Europa e nel mondo. Grazie agli indubbi vantaggi della tecnologia fotovoltaica (FV) si è assistito ad un evidente incremento del mercato di celle e moduli fotovoltaici negli ultimi anni.

Per quanto riguarda i moduli FV presenti in commercio, più dell'85% della produzione corrente usa la consolidata tecnologia basata sui wafer di silicio cristallino. Tale tecnologia è oramai decisamente matura e non offre grandi possibilità in termini di miglioramento delle prestazioni e di competitività economica. Occorre pertanto studiare soluzioni nuove che possano attrarre il mercato produttivo con prospettive di maggiore efficienza.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività oggetto della presente linea di ricerca ha l'obiettivo di sviluppare celle solari innovative caratterizzate da prestazioni sensibilmente migliori rispetto a quelle dei prodotti attualmente disponibili sul mercato. Partendo dalle attività e dai prodotti sviluppati nelle prededenti annualità, si è deciso di indagare ulteriormente alcune delle soluzioni già esaminate e, sulla base dell'analisi dello stato dell'arte della tecnologia fotovoltaica, valutare nuove soluzioni emergenti.

Le attività sono state focalizzate sullo sviluppo di celle FV a base di silicio sulla sola eterogiunzione a-Si/c-Si, in quanto ritenuta l'architettura più promettente per migliorare le prestazioni dei prodotti FV attuali nel breve/medio termine, e si e deciso di sviluppare film sottili innovativi da utilizzare come materiali assorbitori della componente anteriore di celle tandem ad altissime efficienze (>30%) nelle quali la cella posteriore sia realizzata in silicio. I materiali a film sottile studiati come possibili candidati per la realizzazione delle strutture tandem sono il CZTS (il cui studio è iniziato già nelle scorse annualità) e le perovskiti ibride. Quest'ultima classe di materiali ha pesantemente attratto l'attenzione del mondo della ricerca fotovoltaica grazie agli eclatanti risultati ottenuti degli ultimi anni (efficienze attuali di conversione di circa il 20%). Si è ritenuto inoltre necessario indagare le perovskiti anche al fine di comprenderne le potenzialità in termini di ricadute industriali. Si deciso invece di interrompere nell'ambito della Rcerca di Sistema Elettrico lo sviluppo delle celle polimeriche e delle multigiunzioni a film sottile di silicio in quanto, sebbene ritenute entrambe di rilevante interesse nella ricerca mondiale sul fotovoltaico, non possono assicurare nel breve termine i richiesti incrementi in termini di prestazioni di dispositivo. Si vuole precisare che la ricerca in tali ambiti continua nei laboratori ENEA, grazie anche a finanziamenti provenienti da progetti nazionali ed europei, in quanto ritenuta comunque strategicamente rilevante per il medio/lungo periodo.

Le attività svolte nell'ambito dello sviluppo di celle a eterogiunzione hanno riguardato lo studio dell'ossido trasparente e conduttore (TCO) e degli strati a film sottile di silicio utilizzati nel dispositivo e l'ottimizzazione dell'intero processo di realizzazione delle celle solari. Relativamente allo sviluppo del TCO sono stati realizzati film di ossido di zinco drogati alluminio per sputtering, valutando l'influenza della potenza di scarica e dell'introduzione dell'idrogeno nella miscela gassosa sulle proprietà del materiale e evidenziando eventuali criticità quando questo materiale venga utilizzato nei dispositivi. E' stato condotto uno studio sistematico delle proprietà passivanti di film di silicio amorfo idrogenato di tipo intrinseco depositati per PECVD che ha consentito di ottimizzare il processo, migliorandolo sia in termini di riproducibilità che in termini di qualità del materiale cresciuto. Tale studio ha previsto anche una contestuale ottimizzazione delle proprietà degli strati drogati a film sottile di silicio di tipo p ed n, visto che la sperimentazione effettuata nella scorsa annualità aveva mostrato che tali strati potevano influenzare la qualità della passivazione del wafer. Sono stati pertanto valutati film drogati p ed n a base di silicio o di ossido di silicio depositati in fase amorfa o microcristallina. Gli studi eseguiti hanno consentito di migliorare in maniera evidente le prestazioni dei dispositivi: è stata ottenuta un'efficienza massima pari al 18% su area attiva e per varie celle sono stati misurati valori di tensione di circuito aperto di circa 700 mV, che rappresenta il valore di soglia per ottenere alte efficienze di conversione fotovoltaica.

Nell'ambito dello sviluppo di celle solari a film sottile policristallino CZTS, il lavoro ha avuto il principale obiettivo di valutare i vari step di processo per una profonda comprensione dei principali agenti che limitano le prestazioni attuali dei dispositivi (efficienza massima pari al 6,4% su area attiva). Si è lavorato al miglioramento dei processi di

crescita del CZTS sia per quanto riguarda la deposizione del precursore che per quanto riguarda il processo di solforizzazione. In particolare è stato installato, a valle di un'accurata fase di progettazione, un forno di solforizzazione innovativo per migliorare il controllo e la riproducibilità del processo. Nell'ottica poi di migliorare la riproducibilità della stechiometria dei precursori depositati per co-sputtering sono state sperimentate combinazioni differenti di target (Cu-Sn-ZnS, Cu-SnS-ZnS e CuS-SnS-ZnS). E' stato effettuato uno studio per correlare il grado di disordine cationico nel CZTS alle sue proprietà ottiche con l'obiettivo di sviluppare un metodo che consentisse di quantificare questo disordine e valutarne l'effetto sulle prestazioni delle celle solari. E' stato, poi, avviato uno studio di possibili strati buffer alternativi al CdS con lo scopo di individuare un materiale capace di migliorare le prestazioni delle celle grazie ad un migliore allineamento delle bande energetiche e/o una minore densità di difetti all'interfaccia e anche quello di superare le restrizioni comunitarie sull'utilizzo del cadmio a causa della sua tossicità. E' stata avviata un'attività di simulazioni numeriche delle celle in CZTS in grado di evidenziare il peso dei fattori che limitano le prestazioni dei dispositivi e le potenzialità sperimentali della tecnologia proposta. E', inoltre, proseguita l'attività sullo studio di tecniche di crescita del CZTS da soluzione. Infine è stato effettuato uno studio sull'ossido di Nichel per un suo potenziale utilizzo nella giunzione tunnel di celle tandem CZTS/c-Si.

La ricerca condotta sullo sviluppo di celle solari a film sottile a base di perovskite ha avuto l'obiettivo di sviluppare nuovi materiali assorbitori a base di alogenuri organometallici perovskitici e strategie di intrappolamento della radiazione solare. Sono state messe a punto tecniche di preparazione da soluzione di strati assorbitori a base di $CH_3NH_3PbI_3$. Tali strati sono stati utilizzati per la realizzazione di dispositivi fabbricati sia su materiali trasportatori di elettroni a base di ossido di titanio mesoporoso commerciali che su film di TiO_2 flat sviluppati in ENEA, ottenendo un'efficienza massima di conversione pari a 6.5%. E', inoltre, stata avviata un'attività sullo sviluppo di strati trasportatori di elettroni innovativi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati, caratterizzati da inclusione selettiva in domini nanometrici di nanoparticelle di ossido di zinco.

Per quanto riguarda le strategie di intrappolamento della radiazione solare, sono state portate avanti due attività di ricerca: sviluppo di vetri con morfologia superficiale random e sviluppo di substrati con strutture regolari periodiche e aperiodiche definite mediante modelli teorici. In entrambi i casi le strutture realizzate sono state testate mediante la fabbricazione di celle solari convenzionali a film sottile di silicio. Relativamente allo sviluppo di substrati con testurizzazione random, sono stati messi a punto trattamenti di testurizzazione di vetri utilizzando il Reactive Ion Etching e mediante attacchi chimici. Tali trattamenti si sono mostrati idonei allo scopo di produrre un efficace confinamento della luce, presentando al contempo caratteristiche di semplicità realizzativa e di economicità tali da renderli interessanti per applicazioni industriali. Per quanto riguarda i back-reflector con pattern periodico e aperiodico, è stata completata la progettazione di strutture adatte a celle sottili. E' stato validato e messo a punto il processo sperimentale di strutturazione mediante Nano-Imprint Lithography (NIL), che consente di operare su aree di dimensioni idonee per l'applicazione fotovoltaica. Mediante tale tecnica sarà possibile completare la fase di validazione delle strutture progettate appena sarà disponibile il master acquisito.

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

a. Celle solari ad eterogiunzione a-Si/c-Si su wafer di tipo p
b. Celle solari a base di Cu_2ZnSnS_4
c. Materiali e architetture di dispositivo per celle solari a film sottile a base di perovskite
d. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Celle solari ad eterogiunzione a-Si/c-Si su wafer di tipo p

L'obiettivo di questa attività consiste nella realizzazione di celle fotovoltaiche ad eterogiunzione con wafer di silicio cristallino di tipo p con efficienza di conversione pari ad almeno il 18%. Nel seguito sono analizzati i principali elementi critici della struttura del dispositivo in esame (Figura 121) che attualmente ne limitano l'efficienza e ne viene quindi descritto sinteticamente il lavoro di ottimizzazione svolto presso i laboratori ENEA della Casaccia e di Portici. Il Dipartimento di Ingegneria Informatica, Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università Sapienza di Roma ha collaborato alle attività, curando, in particolare, la parte riguardante la deposizione di film sottili di ossido trasparente e conduttivo (TCO) e la caratterizzazione dell'elettrodo frontale anche in termini di stabilità. Un approfondimento delle varie tematiche è riportato nei rapporti RdS/PAR2014/001 e RdS/PAR2014/002.

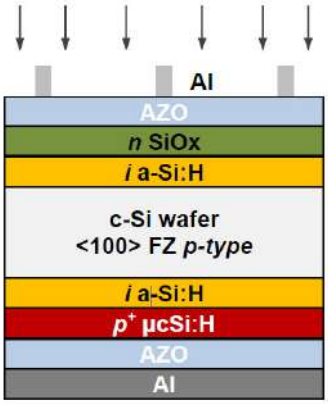


Figura 121. Struttura della cella solare ad eterogiunzione

Contatto frontale in ossido conduttivo e trasparente

Lo strato di ossido di zinco drogato alluminio (AZO), presente nei dispositivi ad eterogiunzione realizzati al Centro Ricerche di Portici, è stato depositato per sputtering in plasma di argon, il cui processo di deposizione era stato ottimizzato in precedenza in termini di pressione di argon e potenza RF per l'ottenimento delle migliori caratteristiche ottiche (trasmittanza) ed elettriche (resistività) adatte allo scopo.

I laboratori del Centro Casaccia sono dotati di un sistema di deposizione per sputtering, sia convenzionale che reattivo e con controllo in temperatura, con il quale è stato condotto uno studio esplorativo sulle proprietà di film di AZO. La sperimentazione è stata anche volta a studiare il possibile danneggiamento che il processo di deposizione per sputtering di AZO può causare ai layer sottostanti nella struttura di un dispositivo ad eterogiunzione, rendendo meno efficace la passivazione attuata dal layer intrinseco in silicio amorfo, fenomeno che può evidenziarsi in una curva tensione-corrente del dispositivo con forma detta "S-shape".

Sono stati cresciuti per sputtering convenzionale e reattivo vari campioni a film sottile di AZO, tenendo fissa la temperatura dei substrati a 180 °C e la pressione a 1,1 x 10^{-3} mbar. Il plasma è stato originato mediante un generatore DC in impulsata, utilizzando un profilo d'impulso caratterizzato da una frequenza di 20 kHz e da un tempo di inversione di 8 µs. Lo sputtering reattivo è ottenuto introducendo idrogeno in camera di reazione oltre al necessario argon: è noto che la presenza dell'idrogeno nel plasma migliora le proprietà di conduzione e trasparenza del film di AZO, anche se tale processo necessita di un maggior controllo in quanto può comportare modifiche alla stechiometria del materiale. Si è variata anche la potenza DC in quanto ci si aspetta che a potenza minore corrisponda una velocità di crescita minore, il che favorisce una dimensione maggiore dei grani cristallini di AZO che si traduce in un miglioramento delle proprietà di trasporto oltre che in una modifica della funzione lavoro. In Tabella 47 sono riportati i parametri di processo e le caratteristiche dei 4 campioni più significativi.

Tabella 47. Caratteristiche di film di AZO ottenuti in varie condizioni di processo

Campione	Processo		Caratteristiche	
	Potenza DC (W)	Gas	Resistività (Ω*cm)	ϕ (eV)
AZO1	500	$H_2/[Ar + H_2]$ = 4%	1,3 x 10^{-3}	4,13 – 4,16
AZO2	100	$H_2/[Ar + H_2]$ = 4%	1,4 x 10^{-3}	4,32
AZO3	100	Ar	2,2 x 10^{-3}	4,12
AZO4	60	$H_2/[Ar + H_2]$ = 4%	4,0 x 10^{-3}	4,30

La resistività di bulk è stata valutata tramite misure di resistenza sheet e di spessore dei film mentre la funzione lavoro si è ottenuta da misure C-V. Sebbene il campione AZO1 risulti il migliore in termini di resistività e con un ragionevole valore per la funzione lavoro, dalle misure di lifetime effettivo su wafer di c-Si (p-type, 1 Ω cm) passivati con layer in silicio amorfo, risulta che la passivazione peggiora con la deposizione del film AZO1, ciò è probabilmente dovuto ad una potenza RF troppo elevata e quindi ad un bombardamento più energico sul layer passivante durante la fase di crescita dell'AZO. Tale fenomeno non risulta da analoghe misure effettuate con film di AZO depositati con potenza minore o uguale a 100 W, come nei processi utilizzati per ottenere i campioni AZO2,

3 e 4 nella Tabella 47, anche se una potenza troppo bassa comporta una resistività inaccettabile, come si evince dal confronto tra AZO2 e AZO4.

L'introduzione di idrogeno provoca un'attesa diminuzione della resistività, come risulta da un confronto tra le caratteristiche di AZO2 e AZO3, ma al contempo si evidenzia un aumento della funzione lavoro. A tale proposito si ricorda che sulla base del lavoro di simulazione svolto nelle precedenti annualità si è definito che il valore ottimale della funzione lavoro del TCO per il dispositivo in analisi è pari a circa 4,1 eV. E' interessante però far presente che un successivo annealing termico del campione AZO2 ha comportato una diminuzione sia della resistività che della funzione lavoro rispettivamente a 8,8 x 10^{-4} Ω cm e 4,16 eV.

E' stata inoltre eseguita una caratterizzazione ottica dei campioni di AZO mediante misure di trasmittanza in vista della loro applicazione come strati frontali in un dispositivo ad eterogiunzione. Dalla Figura 122 è interessante notare che a parità di potenza (100 W), confrontando i campioni AZO2 e AZO3, la presenza di idrogeno contribuisce ad un aumento sensibile della trasmittanza del film di AZO, risultato che contribuisce a rendere interessante lo studio del processo di deposizione di film di AZO mediante sputtering reattivo.

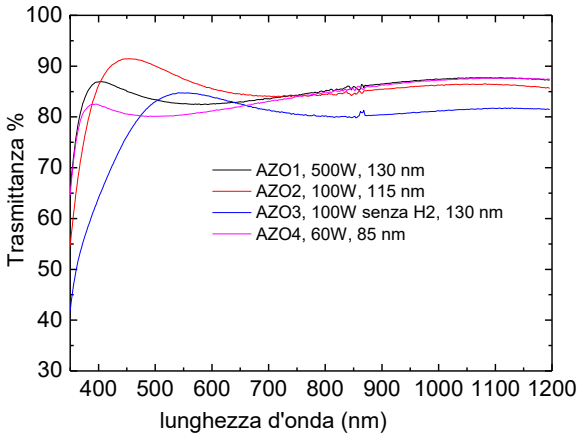


Figura 122. Confronto di trasmittanze degli strati di AZO prodotti in diverse condizioni

Film sottili di silicio amorfo intrinseco e drogati per i dispositivi

Strato passivante in silicio amorfo

La funzione del sottile strato intrinseco tra il c-Si e l'emitter è quella di saturare i legami di silicio "appesi", detti "dangling bonds", che inevitabilmente si addensano sulla superficie di un wafer c-Si. Tali legami insaturi rappresentano centri di ricombinazione per le cariche fotogenerate e questo si traduce in un abbassamento della tensione di circuito aperto, V_{oc}, del dispositivo e quindi dell'efficienza stessa. La qualità della passivazione di tale strato è legata a vari fattori strutturali e chimici del film il cui controllo dipende a sua volta dai parametri di processo di deposizione, che nelle attività di seguito descritte è operato con tecnologia PECVD. Nella precedente annualità si è condotto uno studio sistematico delle proprietà passivanti del silicio amorfo idrogenato (a-Si:H) depositato a film sottile in varie condizioni di processo, variando in particolare la composizione dei gas di processo (silano, idrogeno), la durata del trattamento termico dopo il processo (annealing) e la frequenza di eccitazione del plasma (40 e 100 MHz). A queste frequenze si ottenevano velocità di crescita dei film piuttosto elevate (4 - 5 Å/s) e film caratterizzati eventualmente da una microstruttura porosa. Le alte velocità di crescita determinavano tempi di deposizione così piccoli (decine di secondi) da rendere i processi poco controllabili e quindi poco ripetibili, mentre la porosità dei film poteva avere effetti deleteri nelle fasi successive di deposizione degli strati drogati. La sperimentazione condotta aveva infatti evidenziato che la passivazione peggiorava con la successiva deposizione dei layer drogati e ciò era stato attribuito ad un aumento di difetti all'interfaccia c-Si/a-Si:H dovuti ad una migrazione di elementi dei layer drogati attraverso il sottile strato di a-Si:H poroso. Si è quindi preferito condurre studi sull'ottimizzazione dell'intrinseco passivante, utilizzando una frequenza di eccitazione del plasma a 13,56 MHz e condizioni di deposizione che permettessero di ridurre la velocità di crescita del materiale a valori di circa 1 Å/s.

La qualità della passivazione dell'a-Si:H è stata valutata mediante tecnica QSS PCD (Sinton Consulting, WCT-100) che misura il tempo di vita media dei portatori minoritari (τ_{eff}) in un wafer di c-Si sulle cui superfici viene depositato il materiale da caratterizzare. In una fase preliminare si è individuata una diluizione ottimale del silano in idrogeno che massimizzasse il valore di lifetime depositando circa 7 nm di a-Si:H su entrambe le superfici lappate di un wafer p-c-Si e con un trattamento termico a temperatura di processo di 180 °C in vuoto: fissando il flusso totale di gas a 20 sccm, il rapporto dei flussi di gas $D_{sil} = SiH_4/(SiH_4 + H_2) = 0{,}175$ comporta un $\tau_{eff} = 326$ µs. Dal punto di vista però più generale di ottimizzare la passivazione per ottenere un dispositivo ad alta efficienza, si è poi provveduto a validare lo studio eseguito sull'ottimizzazione dei parametri di processo per il singolo strato intrinseco, ripetendo tale studio a valle della deposizione dei drogati. Sono stati cioè confrontati i valori di τ_{eff} misurati su dispositivi semifiniti, completi cioè degli strati drogati, al variare della diluizione D_{sil} nel processo di deposizione del layer intrinseco. La struttura in esame (Figura 123) è depositata a T=150 °C nel seguente ordine: i–a-Si (lato n), i-a-Si (lato p), p-layer, n-layer, con un trattamento termino a 180° C per 2 h prima della deposizione dei drogati. In tabella 48 sono riportati i valori di τ_{eff} relativi ai campioni realizzati con differenti strati intrinseci valutati dalle curve di Figura 124 a un valore di densità di portatori in eccesso pari a $8x10^{15}$ cm^{-3}.

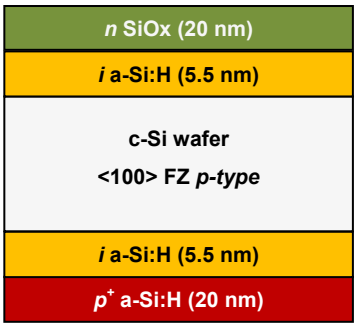


Figura 123. Struttura di test per valutazione della passivazione del layer intrinseco

Tabella 48. Misure di τ_{eff} per passivanti cresciuti con varie diluizioni di silano in idrogeno

Campione	$D_{sil} = SiH_4/(SiH_4 + H_2)$	Flussi SiH_4/H_2 (sccm)	τ_{eff} (µs) @ n =8 E15 cm^{-3}
CL29	0,125	2,5/17,5	80
CL30	0,175	3,5/16,5	972
CL31	0,25	5/15	765
CL32	0,5	10/10	362

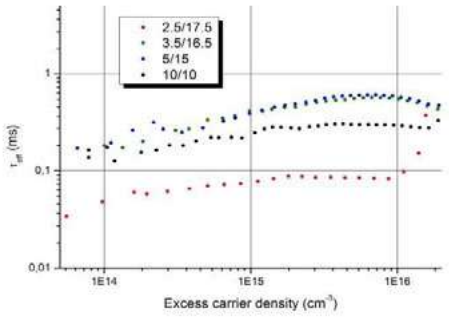


Figura 124.Confronto tra τ_{eff} per i-layer ottenuti a varie diluizioni si silano in idrogeno

E' importante precisare che la misura di τ_{eff} su di una struttura con layer drogati, ed inoltre non simmetrica, non è di immediata interpretazione in quanto oltre all'effetto passivante dovuto alla saturazione dei dangling bonds del c-Si da parte del layer intrinseco, vi è anche un contributo dovuto all'effetto di campo causato dal campo elettrico generato dalla distribuzione di cariche fisse, ad esempio quelle costituenti le regioni di svuotamento intorno alle interfacce. Nella struttura in esame però si è variato solo la composizione degli strati passivanti, lasciando inalterati i layer drogati e quindi ha senso operare un confronto relativo delle misure di lifetime. Dai valori in Tabella 48 e più generalmente dai grafici di Figura 124, si nota che all'aumentare della diluizione di idrogeno, cioè al diminuire della frazione D_{sil}, si ha un aumento di τ_{eff}: studi recenti infatti mostrano che la passivazione migliora quando la deposizione di a-Si:H avviene in condizioni prossime alla fase microcristallina, come ad esempio con alte diluizioni di idrogeno, in quanto la maggiore concentrazione di idrogeno incorporato nel film comporta una maggiore densità superficiale di legami passivanti (Si-H) all'interfaccia a-Si/c-Si. Ma un'eccessiva fase microcristallina risulta deleteria, come si evince dal dato relativo a $D_{sil} = 0{,}125$ e per comprendere ciò basti pensare al caso estremo: un film di c-Si, cresciuto ad esempio in modo epitassiale, non produrrebbe alcun effetto di passivazione ma sposterebbe solo il problema sulla sua superficie libera.

Si è quindi proceduto a realizzare un dispositivo ad eterogiunzione completo, partendo dalla struttura ottimizzata in termini di lifetime (CL30, Tabella 48) e completandola con contatti AZO + Alluminio come da Figura 121. E' risultato un dispositivo che presenta un evidente controdiodo causato quasi sicuramente da una barriera energetica che si forma all'interfaccia AZO/p-a-Si, come evidenziato nella curva IV-light (Figura 125) ottenuta da misure con radiazione da simulatore solare a spettro convenzionale AM1.5G.

E' importante precisare che nella precedente annualità, durante la quale si sono ottenuti risultati soddisfacenti in termini di efficienza di conversione, ci si è concentrati sulla messa a punto dell'emitter in n-SiOx, completando i vari dispositivi di test con il necessario layer drogato p sul back nonostante quest'ultimo non fosse stato ancora ottimizzato, senza l'introduzione del necessario layer in AZO sul back. Si è pertanto resa evidente la necessità di uno studio approfondito dello strato drogato p al fine di ottimizzarne le proprietà per l'applicazione nel dispositivo.

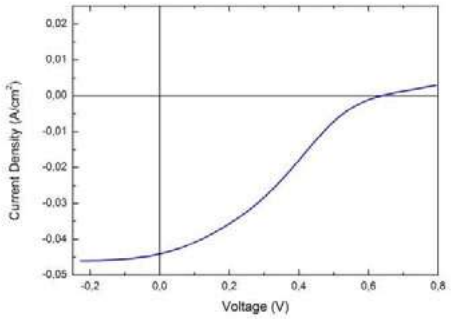


Figura 125. Caratteristica IV-light per dispositivo con layer p costituito da un film sottile di silicio amorfo

Strato drogato di tipo p

La funzione principale dello strato drogato di tipo p sul back della cella è quella di creare una barriera energetica (Back Surface Field, BSF) che blocchi il passaggio di elettroni fotogenerati verso il contatto posteriore ed al contempo consenta la raccolta di lacune attraverso un'adeguata conduzione elettrica all'interfaccia p/TCO. Risulta però generalmente difficile se non impossibile trovare un adeguato TCO caratterizzato da una funzione lavoro che si adatti perfettamente a quella del layer p in modo da ottenere un contatto "ohmico", ma si può sfruttare il meccanismo di conduzione per tunnelling soprattutto se il layer p è molto drogato ed al contempo la differenza tra le funzioni lavoro del layer p e del TCO non sia elevata. In tal senso si è condotto uno studio su diversi materiali drogati di tipo p, ovviamente basati su silicio a film sottile e cresciuti con tecnologia PECVD. Nella Tabella 49 sono riportate le misure di conducibilità al buio (σ_d) e di energia di attivazione (Ea) di tre materiali drogati di tipo p differentemente strutturati: p-a-Si:H, p-µc-Si:H e p-µc-SiO_x:H. L'idea alla base di questo studio è quella di valutare materiali differenti sia in termini di proprietà ottiche che elettriche. Il silicio microcristallino ad esempio è caratterizzato da una più bassa gap ottica rispetto al silicio amorfo e ciò potrebbe consentire un miglior adattamento alla funzione lavoro dello strato di AZO, evitando la barriera energetica che comporta l'evidente controdiodo presente nella caratteristica I-V di Figura 125. Inoltre, grazie al più efficace drogaggio della fase microcristallina, i film a fase mista sono caratterizzati da una miglior conducibilità rispetto a quelli amorfi.

Tabella 49. Confronto di conducibilità (σ_d) ed energia di attivazione (Ea) tra vari film di silicio di tipo p

Campione	d (*nm*)	σ_d (S/cm)	Condizione di deposizione	Ea (eV)
PA-26 (p-α-Si:H)	130	$4x10^{-6}$	SiH_4,TMB, 5W, 150°C	0,290
PA-27 (p-α-Si:H)	20	$1x10^{-7}$		0,245
P5-92 (p-µc-Si:H)	32	0,11	15W	0,059
P5-93 (p-µc-Si:H)	60	0,9	8W	0,036
P5-95 (p-µc-SiO_x)	29	$7x10^{-5}$	CO_2=0.5, H_2=125, 8W	0,259
P5-96 (p-µc-SiO_x)	116	$2,3x10^{-2}$		0,072
P5-98 (p-µc-SiO_x)	31	$3,6x10^{-5}$	CO_2=1, H_2=150, 8W	0,260
P5-99 (p-µc-SiO_x)	90	$1,1x10^{-2}$		0,094

Dall'analisi dei risultati riportati in Tabella 49 risulta innanzitutto evidente che, a parità di condizioni di deposizione, a spessore maggiore corrisponde una maggiore conducibilità; tale fenomeno è in generale dovuto al finite size effect ed è accentuato nel caso di materiali a fase mista a causa della fase iniziale di nucleazione. E' interessante però operare un confronto di σ_d tra campioni a spessore minore in vista dell'applicazione finale, che prevede appunto uno spessore dell'ordine di 10-20 nm nella struttura del dispositivo ad eterogiunzione. In tal senso risulta evidente che il p-µc-Si:H è il miglior candidato, essendo caratterizzato da una conducibilità (σ_d ~ 0.1 S/cm) di oltre 3 ordini di grandezza maggiore rispetto agli altri materiali sperimentati di analogo spessore (σ_d < $2x10^{-5}$ S/cm). C'è inoltre da considerare che l'energia di attivazione è, con buona approssimazione, pari alla distanza del livello di Fermi EF dalla banda di valenza Ev per un materiale drogato di tipo p. Quindi, quanto più è

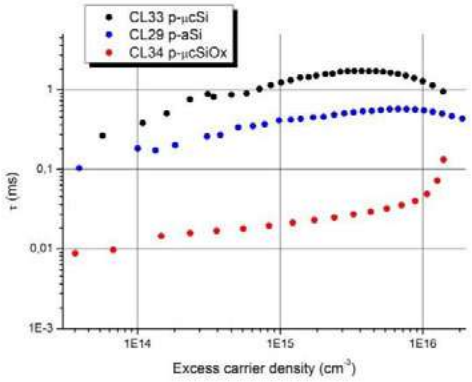


Figura 126. Confronto tra τ_{eff} per differenti film sottili di silicio di tipo p

piccola Ea tanto maggiore sarà la distanza tra i livelli EF dei semiconduttori drogati n e p nella cella ad eterogiunzione, il che si riflette su una maggiore tensione V_{OC} del dispositivo, determinando una maggiore efficienza di conversione. In tal senso va letto il confronto tra E_a ~ 60 meV del campione P5-92 ed Ea > 200 meV degli altri a spessore compatibile, confermando quindi che il p-µc-Si:H sia ottimale anche in questo caso. Infine, dal confronto tra i campioni di silicio microcristallino P5-92 e P5-93 depositati rispettivamente con potenza del segnale RF pari a 15 e 8 W, non si evidenzia una grossa differenza in σ_d e Ea a parità di spessore, ma si preferisce optare per una deposizione a potenza minore (8 W) in quanto una maggior potenza potrebbe determinare un danneggiamento dello strato intrinseco sottostante nella struttura del dispositivo. Risulta altresì importante valutare l'influenza dei diversi layer p sulla passivazione attuata dai layer intrinseci, che, come già accennato in precedenza, può essere modificata sia dal processo per PECVD mediante la variazione dello stato di legame dei dangling bonds saturati sia da un eventuale effetto campo. In Figura 126 sono riportate le misure di τ_{eff} in funzione dell'iniezione di carica (portatori minoritari) misurate su strutture semifinite descritte in Figura 123 al variare del tipo di p-layer.

Appare evidente dal grafico in Figura 126 che lo strato p-µc-Si è potenzialmente il più promettente degli strati indagati in quanto sulla struttura ottenuta con esso vengono misurati valori di τ_{eff} > 1 ms su buona parte del range di interesse di iniezione di carica. Il basso valore di lifetime ottenuto con p-µc-SiO_x deve essere ulteriormente analizzato per una migliore comprensione; ad esempio, l'ipotesi di un effetto campo non ottimale va verificata attraverso la conoscenza della struttura a bande del materiale, quale la sua band-gap (Eg) e l'affinità elettronica.

Strato drogato di tipo n

Nelle scorse annualità è stato messo a punto uno strato innovativo per l'emitter di tipo n a base di ossido di silicio a fase mista (n-µc-SiO_x) che è stato applicato con successo nei dispositivi. Tuttavia nel corso di questa annualità si è ritenuto utile sperimentare l'applicazione di un emitter a base di silicio microcristallino (n-µc-Si:H) allo scopo di ottenere un maggior drogaggio e quindi una maggiore Voc. Sono stati testati due differenti film di tipo n uno a più bassa diluizione di idrogeno indicato come n-µc-Si e uno ottenuto con maggiore diluizione di idrogeno indicato come n-µc-Si+. In Figura 127 sono riportate le misure di lifetime operate sul dispositivo semifinito, mancante cioè dei soli contatti metallici come nella struttura test di Figura 123. Risulta innanzitutto evidente che l'andamento di τ_{eff} sia diverso soprattutto nel caso di emitter ottenuto in alta diluizione in idrogeno (n-µc-Si+): per bassi valori di iniezione di carica (< 10^{15} cm^{-3}) il lifetime resta intorno a 0,5 ms per poi diminuire e restare inferiore rispetto agli altri campioni. Tale andamento necessita di ulteriori indagini, ma potrebbe essere attribuibile ad un effetto campo (bassa iniezione) e ad un deterioramento della passivazione (maggiore iniezione) dovuto all'elevata diluizione in idrogeno che potrebbe aver introdotto dei difetti localizzati all'interfaccia a-Si/c-Si. Più interessante sembra essere il caso del film a più bassa diluizione di idrogeno dove è ottenuta una curva di τ_{eff} caratterizzata da valori maggiori rispetto a quelli degli altri campioni.

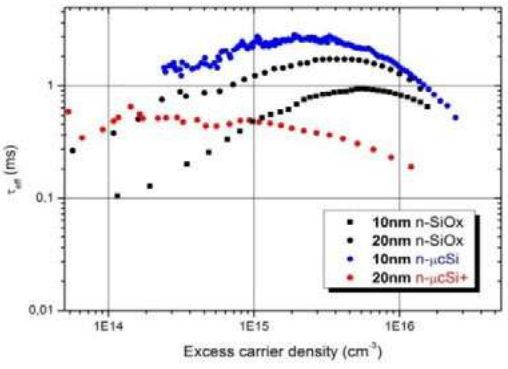


Figura 127. Confronto di τeff per dispositivi semifiniti con differente emitter (strato n)

Realizzazione di celle solari ad eterogiunzione

Sulla base dei risultati ottenuti dallo studio dello strato intrinseco passivante e dei drogati, si è proceduto alla realizzazione di celle fotovoltaiche strutturate come in Figura 121. Sono state inizialmente disegnate delle nuove geometrie di griglia frontale di raccolta, in modo da trovare un punto di equilibrio tra la minima ombreggiatura e le minima resistenza serie tra i diversi finger allo scopo di massimizzare la corrente di emettitore. In Figura 128 sono mostrati i disegni delle maschere utilizzate le cui geometrie individuano su di un wafer singole celle da 2x2 cm^2 e da 1x1 cm^2 (Figura 128).

La struttura metallica risultante della griglia presenta vari finger paralleli di larghezza 50 µm, un bus-bar largo 400 µm e 100 µm rispettivamente nei casi (a) e (b) ed un isolotto per contattare elettricamente la cella dal lato

emitter. La perdita di potenza per ombreggiamento è di circa il 4% e la perdita totale, considerando quella dovuta alla resistività dello strato di AZO, dell'alluminio della griglia e della resistenza di contatto risulta del 6.4% e 5.7% rispettivamente per i casi (a) e (b).

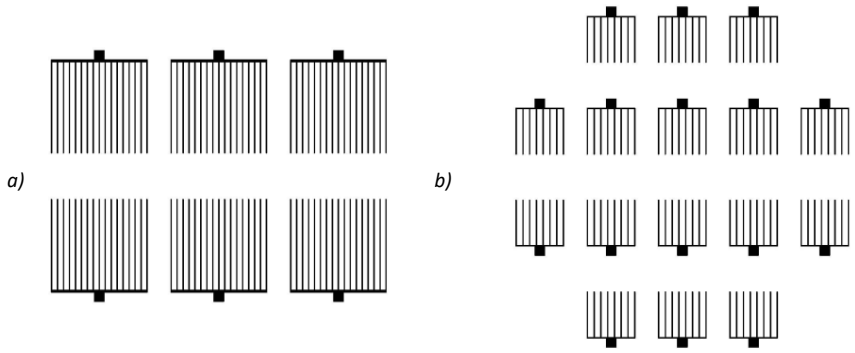


Figura 128. Maschere metalliche per deposizione griglia frontale per celle da (a) 4 cm^2 e (b) 1 cm^2

L'intero processo di realizzazione di un dispositivo ad eterogiunzione, prevede i seguenti passaggi:

1. pulizia delle superfici del wafer p-c-Si con procedura RCA standard;
2. rimozione dell'ossido nativo superficiale con soluzione in HF (2%);
3. deposizione i-layer lato emitter (PECVD) (spessore 5 nm);
4. deposizione i-layer lato back (PECVD) (spessore 5 nm);
5. annealing in vuoto di 2 ore a T = 180 °C;
6. deposizione p-layer su back (PECVD) (spessore 10-20 nm);
7. deposizione dell'emitter n-layer su front (PECVD) (spessore 10-20 nm);
8. deposizione AZO su front (Sputtering) (spessore 70 nm);
9. deposizione AZO su back (Sputtering) (spessore 0-70 nm);
10. annealing in basso vuoto di 30 minuti a T = 180 °C;
11. deposizione griglia frontale in Al (Evaporazione e-gun);
12. deposizione contatto posteriore in Al (Evaporazione e-gun).

Sono stati utilizzati wafer di c-Si p-type di ottima qualità (FZ, 1-5 Ω cm, spessore ~ 270µm) flat sia mono-lappati che bi-lappati. La rimozione dell'ossido nativo avviene immediatamente prima dell'introduzione del wafer nella camera di deposizione. L'annealing in vuoto consente di funzionalizzare in maniera ottimale la passivazione del wafer, mentre il secondo annealing, operato dopo la deposizione per sputtering degli strati di AZO, è risultato necessario a valle di una sperimentazione mirata a valutare il danno comportato alla passivazione dal processo di sputtering stesso. Da studi recenti risulta infatti che la radiazione di plasma in argon pertinente al processo di sputtering modifica l'energia di legame dei dangling bonds saturati diminuendone la capacità passivante, ma un trattamento termico operato a 180 °C e per una durata di 30 minuti è sufficiente per ripristinare i legami in maniera corretta. Ciò è stato verificato da misure di τ_{eff} su vari campioni prima e dopo il trattamento termico operato in una stufa in basso vuoto. Lo spessore di AZO su front è di 70 nm, risultante come compromesso ottimale tra la funzione anti-riflesso e quella di "canale" conduttivo tra la superficie dell'emitter e la griglia di raccolta, presentando un'accettabile resistenza sheet di circa 145 Ω/sq. Lo strato di AZO sul back serve per ottimizzare il contatto tra alluminio e strato p per la raccolta di lacune ed in questo caso non vi è conduzione laterale e quindi non vi sono vincoli sullo spessore per una resistenza di sheet ottimale. Per le griglie frontali sono stati realizzati 5 µm di alluminio, mentre per il contatto posteriore è risultato sufficiente depositare 500 nm di alluminio.

L'introduzione dei layer p-µc-Si:H ed AZO sul back della cella ha principalmente comportato un importante aumento della tensione di circuito aperto V_{OC}, se paragonato al miglior risultato della precedente annualità in cui sul back era utilizzato un semplice strato di silicio amorfo di tipo p, come mostrato dai parametri elettrici dei due dispositivi rappresentativi riportati in Tabella 50. Il ragguardevole valore ottenuto per la V_{OC} (702 mV) ha permesso di raggiungere il principale obiettivo dell'attività prevista per questa annualità e cioè ottenere un dispositivo con efficienza di almeno il 18% su area attiva, calcolata cioè a meno del fattore di ombreggiamento della griglia frontale di raccolta, contro il 17,4% raggiunto l'anno precedente.

Tabella 50. Confronto tra i parametri elettrici valutati dalla curva I-V light del miglior dispositivo ottenuto nel PAR2013 e quello realizzato nella presente annualità

Cella	p-layer	Eff (%)	FF (%)	Jsc (mA/cm^2)	Voc (mV)	Rs (Ωcm^2)
CL5	a-Si:H	17,4	73,0	37,0	644	1,4
CL39	µc-Si:H	18,0	70,5	36,32	702	2,3

La struttura del dispositivo è potenzialmente migliorabile soprattutto in termini di resistenza serie e quindi di Fill Factor, ed in tal senso si è proceduto alla realizzazione di vari dispositivi ad eterogiunzione ottenuti principalmente al variare degli spessori dei layer drogati. Lo spessore dello strato drogato può influire in maniera differente sul dispositivo: nel caso dell'emitter (n) ci si aspetta un contatto ohmico con la sovrastante struttura AZO/Al, mentre per il layer posteriore di tipo p la conduzione verso il contatto AZO/Al avviene per tunneling. Bisogna inoltre tener conto che una variazione dello spessore dello strato drogato su valori così piccoli (10-20 nm) può comportare una sostanziale variazione del valore di conducibilità dello strato stesso. Infine va anche considerato che dal punto di vista della corrente sarebbe auspicabile avere un emitter il più possibile sottile, essendo questo strato finestra per la parte attiva del dispositivo.

In Tabella 51 sono sintetizzati i principali risultati ottenuti da misure IV-light su vari dispositivi realizzati. Nella prima colonna di tabella è indicata la tipologia di wafer di c-Si utilizzato, mentre nelle colonne relative ai layer drogati sono indicati il materiale e lo spessore in nm. Il valore Jsc_EQE è quello ottenuto da misure di efficienza quantica esterna (EQE) operate in condizioni di corto circuito: tale misura permette una più corretta valutazione della Jsc in quanto la tecnica di misura stessa è meno perturbativa termicamente rispetto ad una misura con simulatore solare, ed inoltre elimina la possibilità di commettere errori in eccesso o in difetto legati alla raccolta di correnti laterali. Il valore di Jsc_EQE viene utilizzato per valutare l'efficienza di un dispositivo su area attiva.

Tabella 51. Parametri elettrici di dispositivi ad eterogiunzione estratti da misure IV-ligh e da misure di efficienza quantica esterna

Cella	Wafer*	n-layer (nm)**	p-layer (nm)	Eff (%)	FF (%)	Jsc_EQE mA/cm^2	Voc (V)	Rs (Ωcm^2)	Note
33	Mp	O_20	µ_20	14,7	62,5	34,34	687	2,5	
39 b	Bp	O_10	µ_20	16,2	65,3	35,08	707	3,4	
39 m	Mp	O_10	µ_20	18,0	70,5	36,32	702	2,3	
40 m	Mp	O_10	µ_10	13,8	58,2	35,87	664	5,3	
40 b	Bp	O_10	µ_10	13,6	57,2	35,19	678	4,2	
41	Mp	O_20	µ_20	16,5	68,6	34,86	690	2,3	
42	Mp	O_20	µ_20	13,8	73,6	32,66	576	1,6	No AZO back
43	Bp	O_20	µ_20	11,2	48,9	34,04	674	8,7	20 nm AZO back
44 n1	Bn	O_20	µ_20	17,2	71	34,37	705	1,9	Cella invertita
44 p	Bp	O_20	µ_20	14,7	65,2	31,92	704	2,9	Cella invertita
44 n2	Bn	O_20	µ_20	15,4	71,6	30,8	699	2,1	
45	Mp	µ_10	µ_20	14,2	57,8	35,55	689	8,9	
47	Mp	O_20	µ_25	12,8	52,6	35,23	694	8,8	
48	Mp	O_20	µ_30	12,9	54,9	33,66	696	14	
49	Mp	µ+_20	µ_20	15,0	67,5	34,74	641	2,7	

* B = Bi-lappato, M = Mono-lappato, p = wafer di tipo p, n = wafer di tipo n
** O = µc-SiOx, µ = µc-Si, µ+ = µc-Si+

Dai dati riportati in Tabella 51 si può innanzitutto osservare che si riesce a replicare l'elevato valore di Voc per varie tipologie di dispositivo. I valori più bassi per tale parametro sono attribuibili a varie cause:

a) Uno spessore minore di AZO sul back (cella 43), o addirittura la mancanza dello stesso (cella 42), comporta una bassa tensione V_{OC} se confrontata con quella di una cella a parità di struttura (cella 33). Ciò è probabilmente legato ad un non ottimale allineamento delle bande energetiche in questi casi che introduce una barriera energetica per la raccolta delle lacune dal retro del dispositivo.

b) Dal confronto delle celle 39 e 40, sia basate su wafer mono- che bi-lappato, risulta che con p-layer troppo sottile (10 nm) sul back si ottiene una V_{OC} minore dove tale effetto è probabilmente attribuibile ad un drogaggio minore dello strato per effetto della riduzione dello stesso spessore, visto che il drogaggio influisce logaritmicamente sulla tensione V_{bi} (tensione di Built in) e quindi sulla V_{OC}.
c) Dal confronto tra cella 33 (emitter in ossido di silicio) e cella 49 (emitter di tipo µc-Si ad alta diluizione di idrogeno) si osserva una tensione Voc minore in quest'ultimo caso, determinata probabilmente dal peggioramento della qualità della passivazione già evidenziato nel paragrafo precedente (Figura 127).
d) Il confronto tra le celle 33, 47 e 48 permette di studiare le caratteristiche del dispositivo quando venga aumentato lo spessore del solo layer p. Aumentando lo spessore di p da 20 a 30 nm si osserva un aumento inaccettabile della resistenza serie ed un corrispondente piccolo aumento della tensione Voc. L'aumento della tensione potrebbe essere dovuto ad un maggior drogaggio del materiale, mentre l'aumento della resistenza serie potrebbe invece essere attribuibile ad una minore probabilità di passaggio attraverso il layer p di una carica per tunneling (tra il p-c-Si ed AZO), forse dovuto ad una regione di svuotamento nel layer p troppo estesa. Tali ipotesi saranno indagate ulteriormente nel prossimo futuro.
e) Per quanto riguarda lo strato di tipo n, nonostante gli incoraggianti risultati in termini di lifetime misurati sul campione di silicio microcristallino ottenuto a più bassa diluizione (Figura 127), la sua applicazione al dispositivo (cella 45) non ha apportato gli sperati miglioramenti, si è anzi osservato un peggioramento della resistenza serie rispetto alla cella 39 (emitter in SiOx di uguale spessore) dovuto probabilmente ad un non corretto allineamento delle bande energetiche per questo materiale. Anche in questo caso saranno necessari ulteriori approfondimenti. Per quanto riguarda poi lo spessore dell'emitter è stato verificato, nel caso del materiale n a base di ossido di silicio, l'effetto benefico di una sua riduzione. Dalla Figura 129, dove sono confrontate le misure di EQE per le celle 33 (emitter 20 nm) e 39 (emitter 10 nm), è evidente che il dispositivo con emitter più sottile presenta una migliore EQE a basse lunghezza d'onda e quindi una maggiore corrente di corto circuito.

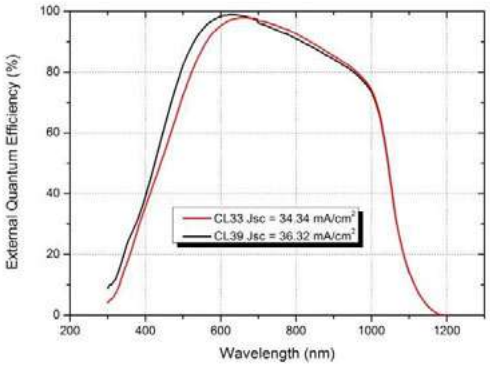


Figura 129. Confronto di efficienza quantica esterna per dispositivi caratterizzati da diverso spessore di emitter: 10 nm (curva nera) e 20 nm (curva rossa)

Si sono infine eseguiti anche test preliminari di fabbricazione di dispositivi ad eterogiunzione con wafer di tipo n bi-lappato ottenendo risultati incoraggianti sia con strutture "classiche", cioè con radiazione incidente sull'emitter (cella 44 n2) che con prime strutture invertite (cella 44 n1), con radiazione incidente dal lato posteriore. Quest'ultima configurazione è stata infine sperimentata anche con wafer di tipo p (cella 44 p), ottenendo prestazioni comparabili a quelle pertinenti ad una configurazione classica (cella 33) ed un interessante valore di V_{OC} (704 mV).

In conclusione è stata condotta un'attività sperimentale sulla fabbricazione di dispositivi ad eterogiunzione a-Si/c-Si che ha consentito di realizzare dispositivi con efficienza di conversione massima pari al 18% su area attiva. Per conseguire tale risultato si è lavorato all'ottimizzazione delle proprietà del TCO e della passivazione di un wafer di tipo p ad opera di layer sottili in silicio intrinseco. E' stato inoltre studiato l'effetto sul dispositivo degli strati drogati sia di tipo p che di tipo n al variare sia della composizione (film di silicio e film di ossido di silicio) sia della struttura (film amorfi e microcristallini). Bisogna sottolineare che le attività svolte hanno permesso di ottenere in maniera stabile e riproducibile valori di tensione V_{OC} di circa 700 mV per varie celle, valori che rappresentano un ottimo risultato per questo tipo di dispositivo.

b. Celle solari a base di Cu_2ZnSnS_4

L'utilizzo del Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) per la realizzazione di celle fotovoltaiche a film sottile è un argomento che sta raccogliendo un grandissimo interesse sia per la possibilità di sviluppare celle a film sottile con prestazioni analoghe a quelle del CIGS (Eff>20%), ma senza utilizzare elementi rari, sia per la possibilità di realizzare celle *tandem* che possano superare il limite termodinamico del 30% imposto ai dispositivi basati su una singola giunzione.
Nel corso della presente annualità sono state avviate diverse attività volte soprattutto a migliorare la riproducibilità dei processi di fabbricazione. Un'ottima riproducibilità infatti è la condizione necessaria per poter effettuare degli studi sistematici indispensabili per l'ulteriore miglioramento dei dispositivi. Le principali attività svolte sono state:

- progettazione esecutiva, realizzazione e fasi iniziali di collaudo di un forno di solforizzazione innovativo che consenta di controllare meglio il processo stesso;
- confronto della riproducibilità della stechiometria dei precursori depositati per co-sputtering con tre combinazioni diverse di target: Cu-Sn-ZnS, Cu-SnS-ZnS e CuS-SnS-ZnS;
- studio delle cause del blistering nei film di CZTS, fenomeno che può limitare fortemente l'efficienza delle celle solari;
- avvio di una campagna di simulazioni numeriche delle celle in CZTS volta ad identificare i principali fattori limitanti l'efficienza;
- studio degli effetti del livello di disordine nel CZTS e dei fattori che possono influenzarlo;
- studio su possibili strati buffer alternativi al CdS;
- studio delle tecniche di preparazione di dispersioni di nanoparticelle di CZTS e loro uso per la crescita di film compatti da usare per la realizzazione di dispositivi fotovoltaici.

E', inoltre, continuato lo studio dell'ossido di nichel per la realizzazione di giunzioni tunnel per celle tandem CZTS/c-Si. L'attività di ricerca è stata svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università di Trento, con il Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma e con Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano Bicocca. La collaborazione con le prime due Università (Roma e Trento) ha riguardato anche tutte le attività sperimentali svolte nei laboratori ENEA. In particolare il Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma ha svolto gran parte della caratterizzazione ottica dei materiali e ha provveduto ad effettuare nei propri laboratori le misure di fotoluminescenza e di spettroscopia Raman. L'Università di Trento ha invece condotto le attività di caratterizzazione strutturale tramite XRD di tutti i materiali utilizzati ed in più ha portato avanti l'attività sulla deposizione CZTS da fase liquida. L'Università di Milano ha lavorato sullo sviluppo di possibili strati buffer alternativi al CdS.

Tutte le attività riportate nel seguito sono descritte con maggior dettaglio nei rapporti RdS/PAR2014/003, RdS/PAR2014/004, RdS/PAR2014/005 e RdS/PAR2014/006.

Implementazione delle attrezzature

Per quanto riguarda le attrezzature, si è lavorato per acquisire un nuovo forno di solforizzazione, attrezzatura di fondamentale importanza per il processo di fabbricazione delle celle solari. A tal proposito si ricorda per chiarezza che i film di CZTS cresciuti in ENEA vengono realizzati con un processo a due step in cui si deposita prima un film precursore contenente i tre metalli e tutto o parte dello zolfo necessario. I precursori hanno una struttura nanocristallina e vengono quindi sottoposti ad un secondo step ad alta temperatura (circa 550 °C) in presenza di vapori di zolfo (solforizzazione) per raggiungere la stechiometria voluta e per ottenere un materiale con grani di maggiori dimensioni.

L'attuale trattamento di solforizzazione a cui vengono sottoposti i precursori presenta ancora dei limiti in termini di riproducibilità dovuti all'impossibilità di fare un buon vuoto di pulizia preliminare nel forno tubolare e soprattutto allo scarso controllo sulla pressione dei vapori di zolfo ottenuti semplicemente riscaldando e vaporizzando una determinata quantità di zolfo insieme al campione in un volume confinato. Il nuovo forno di solforizzazione invece è contenuto dentro una camera da vuoto e lo zolfo viene vaporizzato in una cameretta separata e controllata ad una temperatura indipendente da quella del campione. In questo modo sarà possibile controllare il flusso, la pressione parziale e la permanenza dello zolfo nella camera di solforizzazione.

Una prima fase ha previsto la progettazione esecutiva del sistema, svolta in stretta collaborazione tra ENEA e IONVAC (ditta aggiudicatrice della fornitura), visti i complessi problemi termici e di corrosione. In particolare è risultato abbastanza difficile mantenere la temperatura della sorgente di zolfo indipendente da quella del forno vista la loro prossimità geometrica. Allontanarla avrebbe creato il problema di controllare la temperatura della linea di connessione e quindi si è alla fine optato per l'introduzione di un sistema di raffreddamento ad acqua che

permette alla sorgente di zolfo di rimanere ben sotto i 100 °C anche quando il campione è riscaldato a 550 °C. Il sistema è stato trasferito in ENEA in una versione ancora non completamente perfezionata nello scorso luglio. Una foto del sistema è riportata in Figura 130.



Figura 130. Nuovo forno di solforizzazione installato presso il Centro ENEA di Casaccia

Il nuovo forno di solforizzazione permetterà di fare processi rapidi grazie alla possibilità di inserire ed estrarre il campione nel forno alla temperatura voluta e in atmosfera di gas inerte tramite un trasferitore "da vuoto". Sono stati inoltre previsti due metodi per freddare rapidamente il campione appena estratto (flusso di azoto freddo dall'alto e piattello raffreddato e scorrevole dal basso). Sono attualmente in corso delle rifiniture finali per ottimizzare l'omogeneità di flussi e temperature e per sistemare il software di controllo.

Ottimizzazione della riproducibilità della stechiometria dei precursori

Nell'annualità precedente gli strati assorbitori di CZTS erano stati prodotti tramite solforizzazione di precursori ottenuti mediante co-sputtering dei tre target di solfuri binari: CuS, SnS e ZnS. Le celle solari a singola giunzione ottenute da questi campioni hanno mostrato prestazioni molto promettenti, raggiungendo efficienze di circa il 6%.

La riproducibilità di questi precursori non è però sufficiente e il problema principale è stato identificato nell'utilizzo del target di CuS, che ha mostrato problemi di fragilità, surriscaldamento e possibili variazioni di stechiometria dello strato superficiale. Durante questa annualità si sono quindi ottimizzate altre due famiglie di precursori sostituendo il target di CuS con un target di rame metallico (co-sputtering di Cu-SnS-ZnS) oppure sostituendo anche il target di SnS con un target di stagno metallico (co-sputtering di Cu-Sn-ZnS). Entrambi i processi hanno richiesto degli esperimenti preliminari per ottimizzare empiricamente le potenze di sputtering, al fine di produrre campioni con una stechiometria simile a quella ottimale (nota dalla letteratura e evidenziata nel grafico in Figura 131). Per ogni famiglia di precursori è stata quindi valutata la riproducibilità di processo tramite misure EDX su campioni depositati a parità di condizioni di sputtering. I risultati principali sono messi a confronto nel grafico in Figura 131.

Per i precursori depositati a partire dai tre solfuri binari (dati in nero) si osserva una evidente fluttuazione di composizione, legata chiaramente ad uno scarso controllo del contenuto di rame (come suggerito dalla variazione del rapporto Cu/Sn e dal valore costante, entro l'errore sperimentale, del rapporto Zn/Sn). La sostituzione del target di CuS con quello di Cu ha permesso di eliminare, oltre ai problemi di fragilità, anche quelli di surriscaldamento del target, permettendo di ridurre notevolmente la potenza di sputtering. Questo ha portato ad un netto miglioramento dell'affidabilità di processo: i dati in blu riportati in figura per i precursori di tipo Cu-SnS-ZnS evidenziano il buon controllo della stechiometria e l'elevata riproducibilità della deposizione.

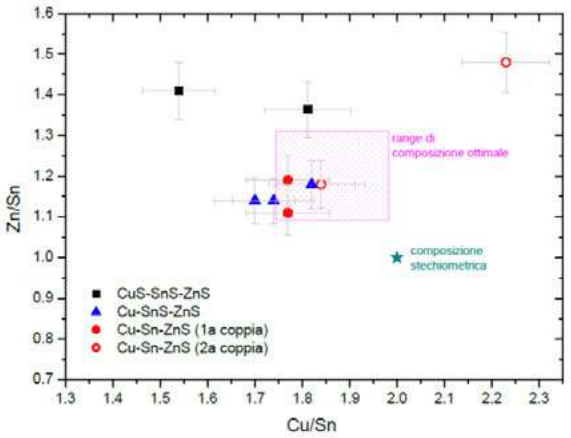


Figura 131. Composizione di tre famiglie di precursori ottenuti dal co-sputtering di Cu-Sn-ZnS, Cu-SnS-ZnS e CuS-SnS-ZnS. Simboli uguali corrispondono a campioni depositati nelle stesse condizioni di sputtering

L'utilizzo del target di stagno metallico si è invece rivelato più difficoltoso poiché la superficie del target può raggiungere facilmente la temperatura di fusione, generando un brusca e incontrollata variazione del rate di

sputtering. Riducendo al minimo la potenza applicata, la frequenza di questi eventi si è molto ridotta permettendo di ottenere una serie di precursori con una stechiometria controllata (Figura131, 1ª coppia). Tuttavia, pur lavorando a bassa potenza di sputtering, piccole oscillazioni possono generare forti variazioni nel rate di deposizione dello stagno, facendo perdere saltuariamente ogni controllo sul processo. Un esempio è dato dalla seconda coppia di campioni in Figura 131, dove, a parità di condizioni, si trova una brusca variazione di composizione legata a un forte deficit di Sn.

Questo studio ha permesso di mettere a confronto diversi processi di deposizione, evidenziando come quello basato sul co-sputtering di Cu-SnS-ZnS sia quello che garantisce la migliore affidabilità in termini di controllo e riproducibilità della composizione.

Blistering nei film di CZTS

Un altro fenomeno che ha ostacolato il miglioramento delle efficienze delle nostre celle in CZTS è quello del *blistering* e cioè la formazione nei film di CZTS di bolle che tendono a rompersi nel prosieguo del processo riducendo la resistenza di shunt e quindi l'efficienza dei dispositivi finali. Questo fenomeno si presenta con modalità abbastanza variabili, ma tende a presentarsi in maniera più grave proprio nei film di qualità migliore (cosa verificata spesso realizzando qualche celle in una delle rare zone prive di buchi).

Il fenomeno del *blistering* è stato riportato spesso in letteratura e viene attribuito o ad un forte stress compressivo del film, accoppiato ad una adesione al substrato non sufficientemente buona, oppure alla formazione di gas all'interfaccia film/substrato. Recentemente, un fenomeno di *blistering* in film di CZTS, simile a quello osservato nei campioni in esame, è stato riportato in letteratura anche da un gruppo di ricerca svedese, che attribuisce questo fenomeno all'evoluzione dell'argon intrappolato nel precursore durante il processo di sputtering; non viene, tuttavia, presentato un chiaro modello che permetta di spiegare la successiva evoluzione del gas (fino alla formazione del *blistering*) durante il trattamento termico, né una valutazione quantitativa della quantità di argon e/o della pressione di gas necessaria a generare un rigonfiamento del film delle dimensioni osservate.

Data l'importanza del problema, durante questa annualità è proseguito lo studio di questo fenomeno, già avviato nell'anno precedente, valutando in modo dettagliato i possibili meccanismi di *blistering* (stress compressivo e/o gas all'interfaccia) e la loro applicazione. In letteratura è possibile trovare delle espressioni che permettono di stimare, nel limite di deformazioni elastiche del materiale, i valori di stress/pressione necessari a generare una bolla di un dato diametro e altezza. E' necessario tener presente che nel nostro caso i valori ricavati da queste espressioni risultano sovrastimati, poiché le deformazioni connesse ai *blister* sono sufficientemente grandi da cadere nel regime plastico. Questa affermazione deriva sia dal valore misurato delle deformazioni (intorno all'8%) sia dal fatto che i frammenti delle bolle fratturate rimangono curvi. In queste condizioni è quindi difficile fare una valutazione quantitativa dei due meccanismi di stress. Tuttavia alcune considerazioni portano a ritenere abbastanza improbabile che il *blistering* nei campioni sia generato da una pressione di gas accumulato all'interfaccia. Infatti mentre il gruppo svedese trova tracce di argon nei film sputterati da misure EDX, misure dello stesso tipo effettuate nei precursori in esame non si è rilevata alcuna traccia del gas di sputtering e quindi si può affermare che la concentrazione di argon eventualmente presente è ben inferiore all'1 at%, concentrazione troppo bassa per formare bolle (rapporto RdS/PAR2014/003).

Il secondo meccanismo che è stato valutato è quello basato esclusivamente sul rilascio dello stress compressivo del film, che può essere o intrinseco (perché già presente nel precursore di partenza o perché si sviluppa durante il trattamento termico, ad esempio a seguito della crescita dei grani) o essere generato dalla sovrappressione di micro bolle di gas intrappolato (che in questo modello non sono direttamente responsabili del *blistering*, ma solo dello stress del materiale). È stata quindi messa a punto una tecnica sperimentale che permette di ricavare lo stress dei campioni direttamente dalla misura al profilometro della deformazione (raggio di curvatura residuo) indotta sul substrato dal film in stress tensile o compressivo. La validità della tecnica è stata verificata dal confronto con le misure di stress fatte all'Università di Trento, utilizzando la diffrazione dei raggi X che ha fornito risultati in ottimo accordo con le misure eseguite in ENEA. Le misure hanno mostrato che lo stress compressivo dei precursori è di circa 400 MPa. Questo valore sembra a prima vista molto basso, ma recenti misure effettuate sul CIGS hanno fornito valori della tensione di snervamento dai 600 a 1200 MPa a temperatura ambiente. Aggiungendo allo stress residuo (400 MPa) anche lo stress compressivo derivante dalla differenza dei coefficienti di espansione termica tra CZTS e substrato di vetro soda lime (circa 240 MPa) e tenendo conto del calo della tensione di snervamento previsto ad alte temperature, l'ipotesi basata sullo stress sembra abbastanza più probabile rispetto a quella basata all'evoluzione dell'argon.

A ulteriore supporto di questa affermazione, si è osservato che depositando i precursori con una maggiore pressione di Ar (fino a 1 Pa) si ottengono film di partenza privi di stress (Figura 132), che determinano campioni di

CZTS privi di bolle. La correlazione tra *blistering* e pressione di sputtering osservata nei nostri esperimenti è in accordo con quanto osservato anche dal gruppo svedese, che però attribuisce la scomparsa del *blistering* a una riduzione della quantità di argon intrappolato nei film depositati ad alte pressioni di sputtering. Purtroppo i precursori depositati a pressione più alta hanno anche mostrato una tendenza a degradare rapidamente se non solforizzati e il relativo processo non è quindi stato ottimizzato.

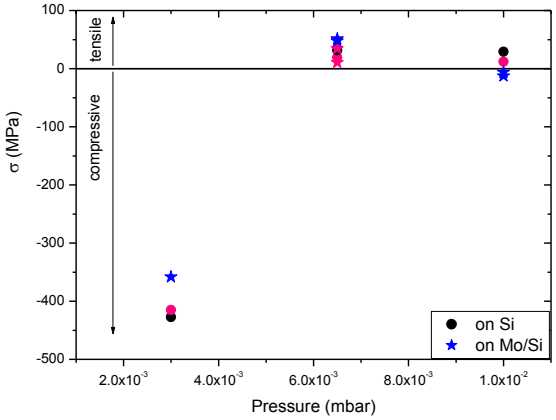


Figura 132. Stress residuo misurato su precursori co-sputterati da target di CuS-SnS-ZnS a diverse pressioni di argon

Una seconda serie di esperimenti è stata condotta depositando dei precursori a bassa pressione di sputtering, ma sostituendo i target di solfuri binari con uno o due target metallici (Cu-SnS-ZnS o Cu-Sn-ZnS). In questo modo si ottengono materiali di partenza con un deficit di zolfo rispetto alla quantità stechiometrica. Aggiungendo una sorgente per l'evaporazione di zolfo nella camera di sputtering e variando solo la quantità di zolfo evaporato durante la crescita sono stati ottenuti diversi precursori, in cui è stata incorporata una quantità crescente di zolfo, fino a raggiungere il 50% stechiometrico. I risultati hanno mostrato un chiaro trend tra la quantità di zolfo incorporata nel precursore e la formazione di blistering, che scompare completamente per contenuti di zolfo inferiori al 40% e diventa molto evidente per concentrazioni prossime a quella stechiometrica. Questo risultato è difficile da interpretare usando l'ipotesi delle bolle di argon perché l'eventuale quantità di gas intrappolato nei diversi precursori dovrebbe essere sempre la stessa, o eventualmente essere inferiore nei precursori più stechiometrici in zolfo (depositati con una pressione totale, $Ar+S_2$, più alta), che invece hanno mostrato un *blistering* maggiore.

Supponendo invece che la causa del *blistering* sia lo stress, gli stessi risultati sono di più facile interpretazione perché le differenze in termini di microstruttura cristallina, contenuto di zolfo e cammino di reazione durante la crescita, possono facilmente indurre livelli diversi di stress durante il trattamento termico.

In definitiva l'ipotesi più probabile è che il *blistering* derivi dallo stress residuo del precursore unito allo stress termico associato alla solforizzazione. I nuovi precursori depositati da Cu-SnS-ZnS non mostrano questo fenomeno. Se la loro ottimizzazione produrrà campioni di CZTS e celle di buona qualità la questione potrà dirsi risolta. Se invece si rivelasse necessario tornare ad utilizzare precursori con contenuto di zolfo stechiometrico si potrebbe riprendere la strada dell'aumento della pressione di sputtering o, grazie al nuovo forno di solforizzazione, del controllo della pressione di zolfo durante i successivi trattamenti termici.

Simulazioni numeriche delle celle in CZTS

Il record mondiale di efficienza delle celle in CZTS è ancora fermo al 9,2% ed è quindi molto inferiore al limite teorico di circa il 30%. Per comprendere quali siano i fattori che portano a queste prestazioni ancora insoddisfacenti sono state avviate una serie di simulazioni numeriche di celle in CZTS utilizzando un programma di simulazione semplice, abbastanza completo e liberamente disponibile in rete chiamato SCAPS.

Il primo obiettivo è stato quello di riprodurre le caratteristiche fondamentali (caratteristica I-V al buio e sotto illuminazione AM1.5, risposta spettrale e curva capacità-tensione) di una delle migliori celle realizzate (Eff=6,4% su area attiva). I parametri del modello sono numerosissimi ed è impossibile fissare tutti i loro valori basandosi sui dati sperimentali a disposizione. Si possono però fare alcune affermazioni generali con una buona confidenza:

- Il CZTS è un materiale compensato con concentrazioni dei donori e degli accettori dell'ordine di 10^{17} cm^{-3}. Il donore è molto profondo, ma anche il livello dell'accettore deve essere posizionato a non meno di 0,3 eV dalla banda di valenza;
- le code di banda, pur presenti, non danno un contributo significativo alla ricombinazione. Il ruolo negativo che gli viene spesso attribuito può perciò derivare da altri effetti come la riduzione della mobilità dei portatori;
- per riprodurre simultaneamente le curve I-V al buio e sotto luce bisogna introdurre nel modello un'alta densità di stati all'interfaccia della giunzione CdS/CZTS (maggiore di 10^{12} cm^{-2}). Anche in questo caso i migliori risultati si ottengono introducendo sia un accettore che un donore con $N_A^{int} \approx N_D^{int} \approx 10^{13}$ cm^{-2}.

Un esempio dei fit delle curve IV al buio e sotto luce è mostrato in Figura 133. Partendo da questo modello che descrive la situazione attuale si sono potuti valutare i diversi miglioramenti possibili al variare dei parametri entro limiti ragionevoli.

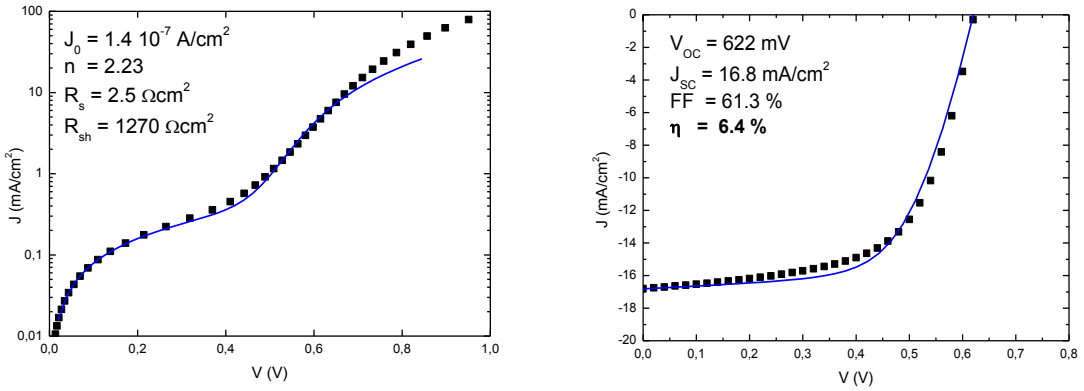


Figura 133. Fit delle curve IV di una cella ENEA (quadrati) con il modello numerico sviluppato con SCAPS (linea continua). I parametri riportati negli inset sono quelli delle curve sperimentali

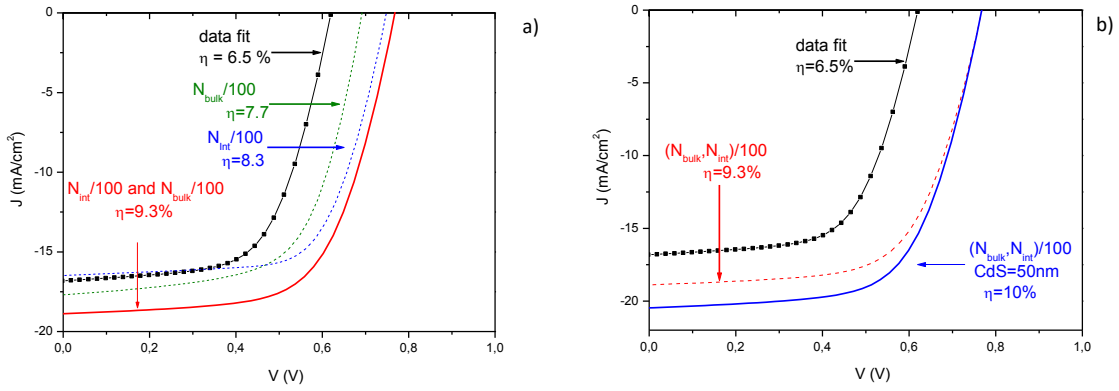


Figura 134. Evoluzione delle curve IV di luce al variare della densità dei difetti nel bulk e all'interfaccia (a) e dello spessore del CdS (b)

La riduzione di due ordini di grandezza della densità dei difetti nel bulk del CZTS e all'interfaccia CdS/CZTS porta l'efficienza al 9,3% (Figura 134a): mentre il calo della densità dei difetti di bulk migliora sia la V_{OC} che la J_{SC}, la riduzione dei difetti all'interfaccia migliora sempre la V_{OC}, ma può lasciare la J_{SC} immutata o migliorarla a seconda della qualità del bulk e del tipo e della densità di carica immagazzinata nei difetti di interfaccia. La riduzione dello spessore del CdS dal valore di 130 nm usato nelle nostre celle a 50 nm riduce l'assorbimento ottico nel blu e porta l'efficienza al 10% (Figura 134b). Le simulazioni non prevedono ulteriori miglioramenti se si aumenta il drogaggio n-type del CdS (da $n=10^{12}$ cm^{-3} fino a $n=10^{16}$ cm^{-3}).

Si potrebbe invece ottenere un rilevante miglioramento delle prestazione del dispositivo sostituendo il CdS, strato buffer comunemente utilizzato nella realizzazione della giunzione, con un buffer "ideale" [p.es. di Zn(S,O)] caratterizzato da una grande gap (riducendo così le perdite nel blu) e soprattutto da una banda di conduzione più allineata con quella del CZTS. Usando nella simulazione χ(CZTS)= χ(Zn(S,O)) si ottiene una forte riduzione della concentrazione di elettroni nella regione del buffer vicino all'interfaccia con conseguente riduzione della ricombinazione. Il risultato è un aumento dell'efficienza fino al 14,7% (Figura 135a).

L'efficienza può essere ulteriormente aumentata dando ad altri parametri valori realisticamente possibili. Per esempio si può arrivare ad una efficienza del 1,1% (Figura 135a):

- riducendo la work function dello ZnO:Al da χ=4,4 eV to χ=4,2 eV;
- abbassando la resistenza serie (da 2,5 a 1 Ωcm^2) e la riflettività frontale (da R=10% a R=5%);
- aumentando lo spessore del CZTS (ad 0,7 a 1,4 μm).

Il lavoro di simulazione ha evidenziato i principali fattori sui quali lavorare al fine di dare evidenza sperimentale alle grandi potenzialità in termini di efficienza delle celle a base di CZTS.

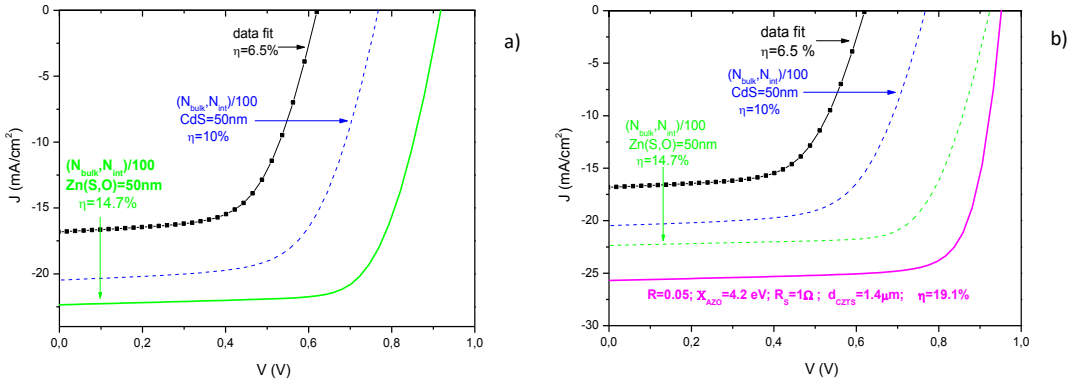


Figura 135. Effetto della sostituzione del CdS con un buffer di Zn(S,O) "ideale" (a) e del cambiamento di altri parametri collaterali (b)

Transizione ordine-disordine nel CZTS

E' ormai accertato che il CZTS possa avere, a seconda della sua "storia termica", un grado di disordine più o meno elevato nella disposizione dei suoi atomi di rame e di zinco. Un modo semplice per intuire perché ciò avvenga è quello di considerare il fatto che gli ioni Zn^{2+} e Cu^{+} hanno esattamente la stessa configurazione elettronica. Recenti esperimenti hanno anche mostrato che, per composizioni adatte alla fabbricazione dei dispositivi, il CZTS ha una transizione di fase ordine-disordine del secondo ordine con temperatura critica intorno ai 260 °C. Questo vuol dire che al disopra dei 260 °C il CZTS all'equilibrio ha una distribuzione di Cu e Zn completamente casuale, mentre al calare della temperatura sotto i 260 °C il sistema diventa progressivamente sempre più ordinato senza mai raggiungere però l'ordine perfetto. Per temperature sotto i 150 °C i tempi di rilassamento sono maggiori della decina di ore e aumentano esponenzialmente scendendo verso temperatura ambiente: quindi è possibile congelare il materiale in uno stato disordinato. Non è ancora chiaro quale sia il livello di ordine nei film utilizzati dai vari gruppi e quale sia il suo impatto sulle prestazioni dei dispositivi. La quantificazione del livello di disordine è stata fatta da altri usando tecniche di non facile accesso come la NMR e la diffrazione neutronica, o anche usando la spettroscopia Raman risonante. L'obiettivo della attività in questo campo, svolta principalmente dal Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma, è studiare la correlazione tra il grado di disordine cationico nel CZTS ed il valore della sua gap e il suo spettro di fotoluminescenza, valutandone poi l'effetto sulle prestazioni delle celle solari.

Per cambiare il livello di ordinamento cationico due campioni provenienti dallo stesso precursore sono stati sottoposti a differente trattamento termico. Un campione, K467L_A, è stato "ordinato" tenendolo a 160 °C per 24 ore, e successivamente raffreddato in modo naturale, quindi molto lento, nel forno a tubo. Il secondo campione, K465V_A, invece, è stato portato a 280 °C per un'ora, ovvero al di sopra della transizione ordine-disordine, e successivamente portato quasi istantaneamente a temperatura ambiente tramite quenching in acqua. Il campione tenuto a 160 °C per 24 ore ha una soglia praticamente uguale al campione che ha seguito il processo standard, che quindi produce campioni ben ordinati. Il campione K465V_A, dopo esser stato "congelato" nel suo stato disordinato tramite raffreddamento istantaneo da 280°C, subisce invece un notevole spostamento della soglia di assorbimento verso le basse energie (Figura 136a). Usando il plot di Tauc $[(\alpha E)^2$ in funzione di E] si ottiene un valore della banda proibita pari a 1,47 eV per il materiale più disordinato e di 1,61 eV per quello più ordinato.

La variazione del valore della banda proibita ha un effetto diretto anche sugli spettri di fotoluminescenza dei materiali (Figura 136b) che mostrano il solito picco singolo tipico del CZTS, ma con una differenza nell'energia del massimo [E_{max}(ordinato)=1,3 eV, E_{max}(disordinato)=1,164 eV, ΔE_{max}=136 meV] praticamente uguale alla differenza di banda proibita ricavata dalla trasmittanza dei due campioni. Le misure Raman sono mostrate e discusse nella rapporto RdS/PAR2014/004.

Avendo constatato l'effetto notevole che il livello di disordine ha sulle proprietà ottiche dei film singoli di CZTS è naturale chiedersi quali siano gli effetti sui dispositivi finiti. A tale scopo una cella finita (la KC220) realizzata con lo stesso precursore dei film analizzati in precedenza ed un'altra molto simile (KC223) sono state sottoposte ad un trattamento termico simile a quello usato per generare lo stato disordinato. Abbiamo poi misurato gli effetti sulle caratteristiche J-V e sulla risposta spettrale. Bisogna tenere presente che con le sigle KC220 e KC223 si indica in realtà un insieme di piccole celle ("dot") tutte realizzate contemporaneamente sullo stesso substrato di vetro con dimensioni di circa 2 x 2.5 cm^2. Le celle "disordinate" ottenute dopo il processo di quenching mostrano, rispetto al loro stato "ordinato" ottenuto a valle della preparazione standard e dopo quasi due anni di immagazzinamento al

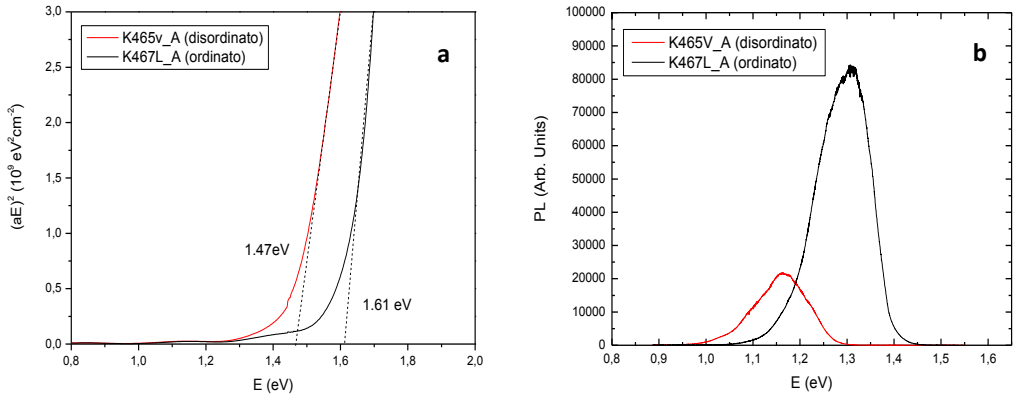


Figura 136. Stima della energia della banda proibita Eg (a) e spettro di luminescenza (b) per due campioni con differente grado di ordine

buio, valori inferiori della corrente di saturazione inversa J_0 e del fattore di idealità n (ricavati dalle loro J-V al buio) e mostrano un miglioramento della curva di risposta spettrale non solo a causa della riduzione del valore della gap ma anche per lunghezze d'onda in cui l'assorbimento da parte del materiale è praticamente completo (Figura 137). Questi miglioramenti nelle celle "disordinate" farebbero pensare anche un miglioramento delle loro prestazioni sotto illuminazione. Purtroppo però questo miglioramento non è sistematico. I valori di Voc, Jsc e FF dei dispostivi "quenched" aumentano o diminuiscono rispetto a quelli iniziali in maniera apparentemente casuale nelle varie celle presenti sui due substrati.

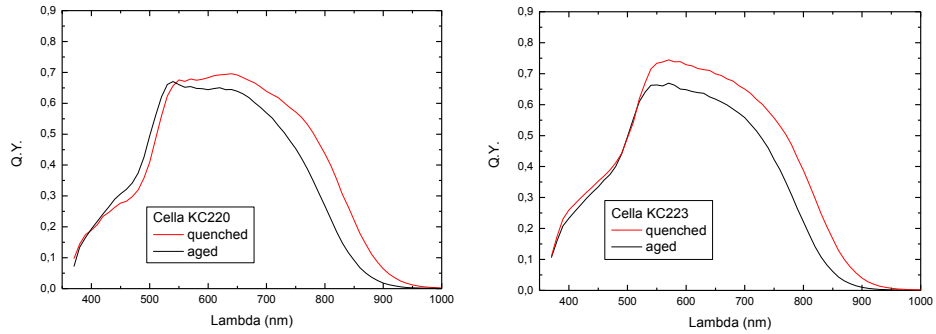


Figura 137. "Quantum Yield" delle celle celle KC220 e KC223 nello stato ordinato ("aged") ed in quello disordinato ("quenched")

La spiegazione di questi risultati non è semplice e una discussione più approfondita è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/004 L'ipotesi più plausibile è che il quenching migliori effettivamente le caratteristiche dello strato di CZTS contenuto nelle celle, ma peggiori la qualità delle interfacce con il CdS e/o con il molibdeno oppure induca una interdiffusione di elementi alle interfacce stesse. L'argomento andrà investigato ulteriormente per esempio provando ad aumentare il livello di disordine nello strato di CZTS prima di completare la cella solare.

Strati buffer alternativi al CdS

Questo filone del lavoro punta ad individuare, depositare e caratterizzare film sottili di materiali alternativi al CdS che possano svolgere il ruolo di buffer layer in una cella in CZTS. L'idea è quella di trovare un materiale capace di migliorare le prestazioni grazie ad un migliore allineamento delle bande e/o una minore densità di difetti all'interfaccia e anche quello di superare le restrizioni comunitarie sull'utilizzo del cadmio a causa della sua tossicità. E' inoltre interessante individuare metodi di deposizione di un buffer layer alternativo al CdS compatibili con i processi di crescita in vuoto usati per depositare i film dello strato assorbitore di CZTS, come quelli utilizzati da ENEA. Il lavoro è stato svolto dal Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano-Bicocca.

Sono stati studiati tre possibili materiali candidati alla sostituzione del CdS: solfuro di indio, (In_2S_3), solfuro di zinco (ZnS) e ossido misto di zinco e stagno (Zn_2SnO_4). I film sono stati depositati per sputtering a radio frequenza (RF) in diverse condizioni di potenza e pressione di argon. Per ogni materiale sono state studiate le relazioni tra parametri di processo e proprietà di trasmittanza, spessore e omogeneità dei film e determinate le velocità di deposizione. Il lavoro svolto ha portato ad individuare i parametri definitivi di processo ottimali per la crescita dei film e quindi ad

ottenere valori di trasmittanza che possono essere considerati soddisfacenti per l'applicazione richiesta. Ad esempio, facendo riferimento ad un film di Zn_2SnO_4 cresciuto a 100 W di potenza (velocità di deposizione 0,24 nm/s) si ottiene, per uno spessore di 75 nm, una trasmittanza di quasi il 90% nell'intervallo spettrale 400-800 nm. Allo stesso modo, per film di ZnS cresciuti a 75 W di potenza (velocità di deposizione 0,04 nm/s), la trasmittanza ottenuta nello stesso intervallo di lunghezze d'onda e per uno spessore di 75 nm è quasi dell'85%. Per i film invece di In_2S_3 si sono ottenute trasmittanze più basse (circa il 55%) per film di spessore confrontabile.

L'effettiva applicabilità in campo fotovoltaico dei buffer layer investigati deve ovviamente essere valutata inserendo i film in dispositivi completi, per controllare ad esempio la possibile presenza di fenomeni di danneggiamento della interfaccia durante il processo di sputtering. Visti i problemi di riproducibilità nella crescita del CZTS, i nuovi buffer layer sono stati testati utilizzando come materiale assorbitore il $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS), un materiale con caratteristiche molto simili al CZTS preparato nei laboratori dell'Università Milano-Bicocca. Le prestazioni sono state messe a confronto con dispositivi realizzati usando lo stesso assorbitore ma con il buffer layer standard costituito da film di CdS depositati per bagno chimico. Come si nota dalla Tabella 52, il buffer di Zn_2SnO_4 ha dato i risultati migliori con una corrente praticamente uguale a quella del CdS. I valori di FF e di V_{OC} sono inferiori a quelli con il CdS, ma si cercherà di migliorarli adattando il processo di deposizione dei layer ZnO sovrastanti al nuovo buffer layer.

Tabella 52. Parametri di celle con buffer layer alternativi messi a confronto con celle con CdS realizzate in parallelo con lo stesso materiale assorbitore

Buffer layer	Jsc [mA/cm^2]	Voc [mV]	FF [%]	Eff [%]
Zn_2SnO_4	30,9	355,1	48,7	5,34
CdS	31,9	559,7	69,7	12,4
In_2S_3	18,6	303,5	55,2	3,1
CdS	30,8	530,7	65,6	10,7

Il buffer di In_2S_3 mostra una minore riduzione del valore di FF, ma un calo sensibile della J_{SC} dovuto evidentemente alla bassa trasmittanza nell'IR. Questo problema può però essere ridotto con un'ulteriore ottimizzazione dei processi (riduzione dello spessore, uso di opportuni trattamenti termici, drogaggio con sodio o ossigeno).

Il buffer layer di ZnS non ha prodotto celle con efficienza significativa. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la banda di conduzione dello ZnS è posizionata ad una energia molto più alta di quella del CIGS, costituendo così una barriera per la raccolta degli elettroni. Questo allineamento può essere modificato introducendo una opportuna percentuale di ossigeno nel gas di sputtering ottenendo così film di Zn(S,O) che effettivamente hanno dato prestazioni leggermente migliori. Bisogna inoltre ricordare che la banda di conduzione del CZTS è situata più in alto di quella del CIGS e quindi i risultati dell'accoppiamento ZnS/CZTS potrebbero essere migliori, come suggerito anche da risultati riportati in letteratura.

In conclusione si è dimostrato che la deposizione dei buffer per sputtering è una via praticabile e interessante. Si ritiene che tutti e tre i nuovi buffer siano da provare in celle in CZTS depositandoli su film di CZTS realizzati da ENEA e ottimizzando la struttura completa della cella (spessori dei layer e proprietà degli strati di ZnO sia intrinseci che drogati con Al).

Film di CZTS da dispersioni di nanoparticelle

In questa annualità è proseguito il lavoro di ottimizzazione del processo di deposizione di film di CZTS a partire da "inchiostri" di nanoparticelle dispersi in opportuni solventi. Il lavoro è stato svolto principalmente dall'Università di Trento.

Il processo di fabbricazione per "hot-injection" delle nanoparticelle era stato messo a punto nella scorsa annualità e utilizza i cloruri come sorgente di cationi metallici, lo zolfo in polvere come sorgente di zolfo e soltanto oleilammina (OLA) come *capping agent*.

Le nanoparticelle di CZT così ottenute sono state ulteriormente caratterizzate tramite l'uso di microscopia elettronica ad alta risoluzione: analisi HRTEM (high-resolution transmission electron microscopy) e HAADF-STEM (high angle annular dark field-scanning transmission electron microscopy) (Figura 138). Queste analisi hanno confermato che le nanoparticelle hanno una struttura core-shell con una fase di CZTS esagonale all'interno e di una di CZTS tetragonale all'esterno.

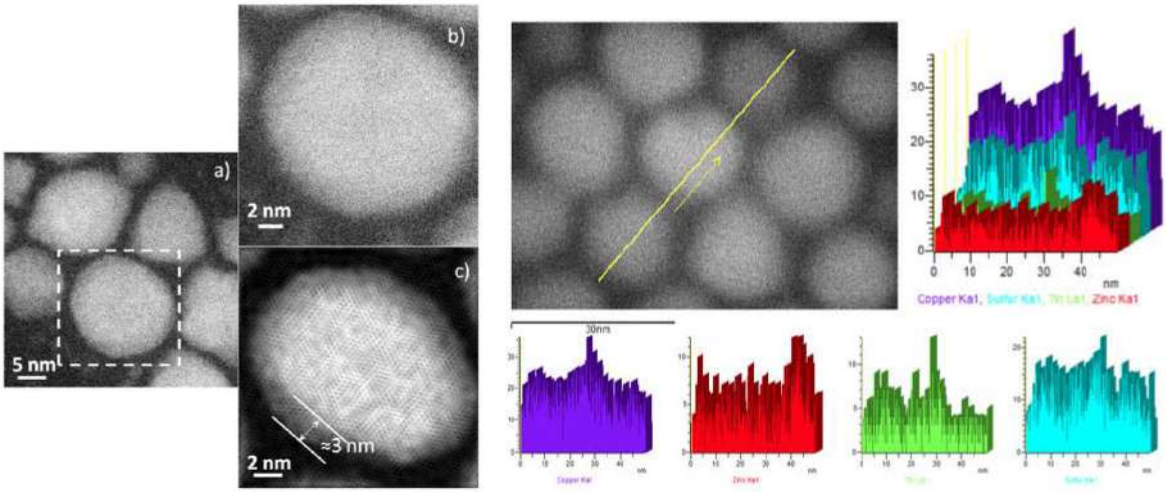


Figura 138. Immagini HAADF-STEM di nanoparticelle ad ingrandimenti diversi (a,b,c). Profili EDS dei vari elementi lungo il segmento giallo indicato nella micrografia in alto al centro. Cu viola, Zn rosso, Sn verde, S azzurro

Un problema di questo processo è la perdita di zinco durante la sintesi, dovuta al differente comportamento del suo complesso metallico rispetto a quelli di rame e stagno. Per mantenere un sufficiente contenuto di zinco nelle nanoparticelle si era intervenuti o diminuendo il contenuto dell'agente legante (OLA) oppure aumentando la concentrazione di zinco di partenza. In questa annualità si è visto che si può ottenere una maggiore incorporazione di zinco anche aumentando la quantità di zolfo usata nella sintesi.

Una volta ottenuta la dispersione di nanoparticelle in toluene, il film viene depositato via spin-coating su vetro per procedere con le diverse caratterizzazioni e su molibdeno per produrre le celle. La maggior parte del contenuto organico (toluene) viene rimosso con un trattamento termico in aria a 150 °C per 5 min. Il film viene poi ricristallizzato tramite due diversi annealing ad alta temperatura (550 °C) in flusso di argon: il primo con l'obiettivo di ricristallizzare il campione, il secondo, in presenza di zolfo, viene utilizzato per eliminare l'SnS residuo dal primo trattamento termico.

In questa annualità sono stati effettuati degli esperimenti preliminari di stampa dei film di CZTS tramite una tecnica diversa: la stampa a getto di inchiostro. L'obiettivo era quello di ottenere film privi di pin-holes e con una migliore omogeneità di spessore rispetto a quelli fatti per spin-coating. A questo scopo è stato necessario scegliere dei solventi diversi dal toluene. I film così ottenuti sono stati poi utilizzati per realizzare delle celle fotovoltaiche. Purtroppo anche questi dispositivi (come quelli ottenuti con lo spin coating) hanno mostrato basse fotocorrenti e tensioni a circuito aperto di pochi mV, tipicamente associate a bassi valori della resistenza di shunt. L'analisi SEM non ha però mostrato evidenti problemi morfologici (pin-holes) e quindi il problema potrebbe essere più probabilmente collegato ad un'eccessiva conducibilità elettrica dei film di CZTS. Quest'ultimo effetto è in genere associato alla presenza di fasi spurie di cui però non si ha traccia negli spettri di diffrazione X. Una serie di misure spettrofotometriche delle proprietà ottiche di film ottenuti con diversi tipi di trattamenti termici ha però sorprendentemente evidenziato che anche film con uno spettro XRD perfetto mostrano un eccessivo assorbimento della luce nell'infrarosso (dove il film dovrebbe essere praticamente trasparente). Una possibile ipotesi è che i film contengano fasi spurie invisibili con la XRD (come ad esempio il Cu_2SnS_3) e che sia quindi necessaria un'ulteriore ottimizzazione del processo di ricristallizzazione del CZTS al fine di evitare la loro formazione.

Studio dell'ossido di nichel per giunzioni tunnel con il silicio

In attesa di avere dei film di CZTS di qualità buona per poter fabbricare delle strutture tandem di prova (cella in CZTS)/(giunzione tunnel)/(cella in silicio), è stato effettuato uno studio preliminare delle caratteristiche di una eterogiunzione tra NiO e silicio n-type. Nella passata annualità erano state valutate le possibili proprietà del contatto NiO/c-Si considerando per la posizione della bande di valenza dell'NiO sotto al livello di vuoto un valore compreso tra 5,1 e 6,23 eV. Questa posizione era stata dedotta a partire dai dati di letteratura. Nella presente annualità si è provato ad ottenere una conferma sperimentale di questo valore mediante delle misure I-V e C-V su eterogiunzioni NiO/c-Si (n-type). Le eterogiunzioni sono state realizzate depositando un film di NiO spesso circa 200 nm su wafer di silicio n-type con resistività 1-5 Ωcm. La resistività di questo substrato in silicio è molto

maggiore di quella dell'emitter che verrà poi usato nelle celle tandem ma è quella necessaria per poter ottenere le informazioni cercate. La deposizione dell'NiO è stata effettuata per sputtering reattivo RF da un target di nichel metallico in un'atmosfera mista Ar/O_2 (34%/66%). Il film così depositato ha una resistività di circa 0,05 Ωcm e le misure di effetto Hall mostrano che il materiale è sicuramente degenere. Supponendo per la banda di valenza dell'NiO una posizione a 6,23 eV sotto il livello di vuoto si otterrebbe il diagramma a bande mostrato in Figura 139.

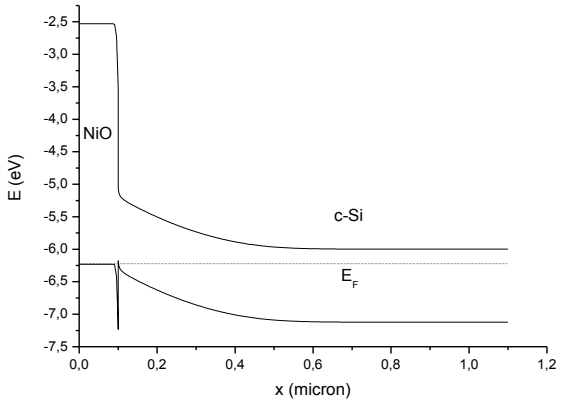


Figura 139. Struttura a bande di una eterogiunzione NiO/ c-Si

La curvatura delle bande nel silicio rimane quella mostrata finché la banda di valenza dell'NiO rimane sotto la banda di valenza del silicio [E_V(c-Si)= -5,17 eV]. Questa situazione è favorevole per i nostri scopi in quanto garantirebbe, oltre ad una buona giunzione tunnel col silicio, anche un buon contatto ohmico col CZTS. In queste condizioni ci si aspetta un potenziale di built-in della eterogiunzione molto simile al valore della gap del silicio.

Nella Figura 140 è mostrata sia la caratteristica I-V che quelle C-V misurate a diverse frequenze per l'eterogiunzione NiO/c-Si. La curva I-V conferma la formazione di una giunzione mentre l'interpretazione delle C-V è meno ovvia. Ci si aspetterebbe infatti che le curve fossero praticamente indipendenti dalla frequenza e che la loro pendenza fornisse un valore di carica uguale alla concentrazione dei donori nel silicio (circa 5 10^{15} cm^{-3}). La dipendenza dalla frequenza può essere spiegata come la conseguenza della presenza di difetti all'interfaccia tra i due materiali.

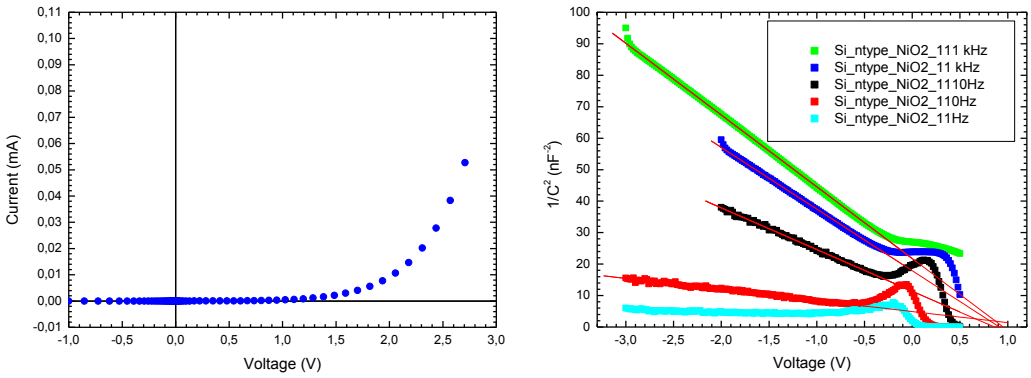


Figura 140. Curva I-V e curve C-V per una eterogiunzione NiO/c-Si

Ipotizzando verosimilmente che questi stati abbiano una risposta relativamente lenta rispetto agli elettroni nel silicio, ci si aspetta che sia la curva a frequenza più alta quella più rappresentativa delle caratteristiche della regione di svuotamento formatasi nel silicio. In effetti le pendenze delle varie curve forniscono dei valori di drogaggio che tendono a diminuire con la frequenza verso il valore corretto. Il risultato importante però è che il potenziale di built-in estrapolato dalla curva a più alta frequenza è di ben 0,95 eV in perfetto accordo con le previsioni iniziali.

Si può pertanto concludere che l'NiO è un semiconduttore degenere con la banda di valenza posizionata ad energie inferiori a quella del silicio ed è perciò un ottimo candidato per la realizzazione delle giunzioni tunnel.

In conclusione si può affermare che l'attività svolta nell'obiettivo b è del tutto in linea con quanto programmato

per la presente annualità. Il lavoro ha avuto il principale obiettivo di valutare vari step di processo per una profonda comprensione dei principali agenti che limitano le prestazioni dei dispositivi a base di CZTS. Le principali tematiche sono state: 1) la progettazione e realizzazione di un forno di solforizzazione innovativo; 2) un confronto della riproducibilità della stechiometria dei precursori depositati per co-sputtering con combinazioni diverse di target; 3) lo studio delle cause del *blistering* nei film di CZTS; 4) lo studio degli effetti sul dispositivo del livello di disordine nel CZTS e dei fattori che possono influenzarlo; 5) lo studio di possibili strati buffer alternativi al CdS. E' stata avviata un'attività di simulazioni numeriche delle celle in CZTS in grado di evidenziare il peso dei vari fattori limitanti l'efficienza dei dispositivi e le potenzialità sperimentali della tecnologia proposta. E', inoltre, proseguita l'attività sullo studio di tecniche di crescita del CZTS da soluzione. Infine è stato effettuato uno studio sull'ossido di nichel per un suo potenziale utilizzo nella giunzione tunnel di celle tandem CZTS/c-Si.

c. Materiali ed architetture per celle solari a film sottile a base di perovskite

L'attività ha avuto l'obiettivo di sviluppare nuovi materiali assorbitori a base di alogenuri organometallici perovskitici utili alla fabbricazione di dispositivi fotovoltaici ad alta efficienza (subtask c.1). Lo sviluppo di questi materiali è ritenuto interessante sia per la realizzazione di celle a film sottile a singola giunzione che per la quella di celle tandem in combinazione col c-Si. Nell'architettura a film sottile risulta poi fondamentale adottare opportune strategie di intrappolamento della radiazione solare che possano consentire di ridurre al minimo la quantità di materiale utilizzato. Tali strategie sono state oggetto della ricerca sviluppata nel substask c.2.

c.1 Sviluppo di celle solari innovative a singola giunzione a base di perovskite

Le perovskiti ad alogenuri di piombo, del tipo $CH_3NH_3PbI_3$, grazie ad importanti caratteristiche, quali band-gap diretta, elevati coefficienti di assorbimento, ottime proprietà in termini di trasporto elettrico sono diventate un materiale molto studiato nella realizzazione di dispositivi fotovoltaici. Nonostante le alte efficienze ottenute nell'arco di breve tempo (dal 3,8% del 2009 al 20,1% del 2015), sono ancora molte le questioni da approfondire per ipotizzare un processo di industrializzazione nel lungo termine.

L'attività è quindi iniziata nel corso della presente annualità con la messa a punto delle tecniche di crescita da soluzione di strati di $CH_3NH_3PbI_3$ e con la caratterizzazione strutturale, morfologica ed ottica dei materiali. Successivamente sono stati eseguiti test di fabbricazione dei dispositivi utilizzando sia un'architettura molto semplice in cui lo strato assorbitore è a contatto diretto con il metallo che costituisce l'elettrodo posteriore, la cosiddetta architettura Hole Transport Material-Free (HTM-Free), sia adottando lo schema che invece implementa nel dispositivo anche uno strato HTM per migliorare la conduzione delle cariche fotogenerate nel dispositivo e quindi la sua efficienza. I dispositivi sono stati realizzati sia su substrati commerciali che su substrati realizzati nei nostri laboratori. Inoltre, in collaborazione con l'Università di Napoli, è stata svolta un'attività sullo sviluppo di copolimeri a blocchi per la realizzazione di matrici di ossidi metallici di tipo n da utilizzare come strati innovativi nell'architettura del dispositivo a base di perovskite. Le attività di seguito sintetizzate sono riportate con maggiore dettaglio nei rapporti RdS/PAR2014/007 e RdS/PAR2014/008.

Sviluppo delle tecniche di preparazione di film di $CH_3NH_3PbI_3$ e realizzazione di celle solari HTM-free su substrati commerciali

I substrati scelti nella prima fase dell'attività per la realizzazione delle celle HTM-free sono di tipo commerciale (Solaronix) e sono costituiti da vetro ricoperto con un primo strato di ossido di stagno drogato con fluoro (fluorine doped tin oxide, FTO) che costituisce l'elettrodo frontale più un secondo strato compatto, cosiddetto *blocking*, di biossido di titanio ($cTiO_2$) ed uno strato *scaffolding* di TiO_2 mesoporoso ($mTiO_2$) di diverso spessore. Lo strato di TiO_2 ha la funzione di strato trasportatore di elettroni (Electron Transporting Layer, ETL) e su di esso è depositato lo strato di perovskite. Il processo utilizzato per ottenere i film di perovskite è quello definito *sequenziale* schematizzato in Figura 141. Esso prevede la deposizione del film di ioduro di piombo (PbI_2) tramite *spin coating* sul substrato scelto e poi la successiva immersione (*dipping*) nel secondo precursore, ioduro di metilammonio (CH_3NH_3I), che conduce alla formazione della perovskite, $CH_3NH_3PbI_3$. Il processo è stato eseguito in aria, senza il controllo delle condizioni di umidità. Quest'ultimo parametro sembra essere critico e in letteratura viene spesso riportato che dispositivi con alta efficienza sono ottenuti per valori di umidità

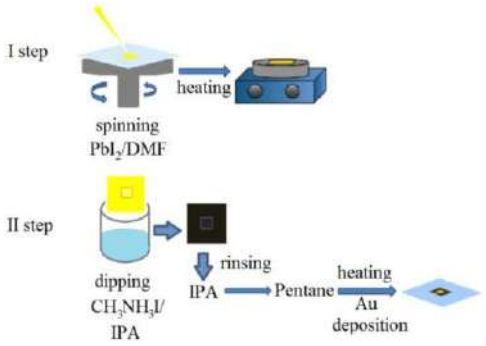


Figura 141. Schema del processo sequenziale

relativa inferiori al 30%. Date le condizioni critiche di umidità in cui si è invece operato (>30%), si è dedicata particolare attenzione al processo di lavaggio/asciugatura dopo il *dipping*. Il processo è stato modificato, rispetto a quello riportato in letteratura, prevedendo, oltre all'alcool isopropilico (IPA), l'uso del pentano, un solvente con un punto di ebollizione molto basso, che ha consentito una rapida asciugatura, determinando una migliore uniformità di ricoprimento della superficie. Le immagini SEM dimostrano che i film di perovskite dopo il lavaggio in IPA e poi pentano sono più uniformi rispetto a quelli lavati solo in IPA.

Una volta definito il processo di asciugatura, l'attività è proseguita analizzando gli spettri del coefficiente di assorbimento e di diffrazione a raggi X acquisiti sui film di perovskite depositati su vetro (Figura 142) per valutare le proprietà ottiche e strutturali del materiale realizzato. Due tipologie di campioni sono state analizzate: *layer A*, ottenuto impiegando una velocità di spinning pari a 4000 rpm e un tempo di dipping di 3 h e *layer B*, con la stessa velocità di spinning ma 30 sec di dipping. Le misure XRD (Figura 142a) mostrano picchi di diffrazione (110), (220) e (331) di $CH_3NH_3PbI_3$ che confermano la formazione della fase perovskitica. La presenza del picco a 12,75° indica che tracce di PbI_2 rimangono nei due campioni anche se in quantità minore nel *layer A* rispetto al *layer B*. Corrispondentemente i picchi della perovksite (110), (220) e (331) sono più pronunciati nel *layer A*. Questo era atteso in quanto il tempo di dipping nel *layer A* è molto maggiore che nel layer B consentendo una perfetta formazione della fase perovskitica.

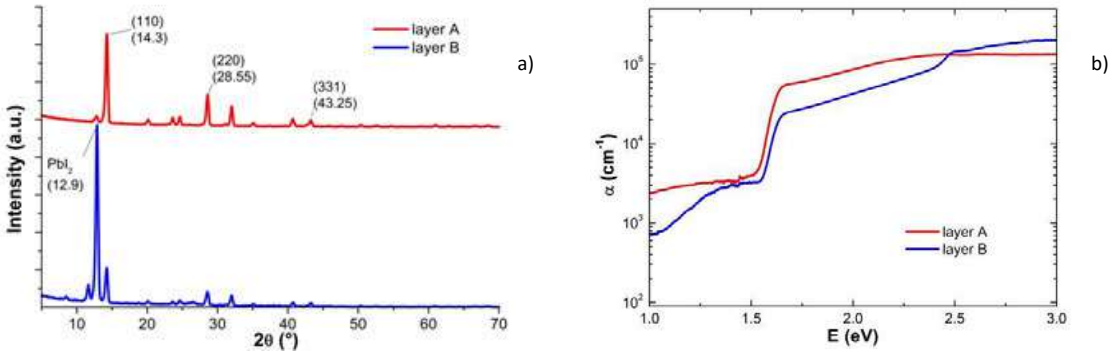


Figura 142 . (a) misure XRD e (b) spettri del coefficiente di assorbimento della perovskite realizzata con la stessa velocità di spinning, 4000 rpm, e diverso tempo di dipping, chiamati layer A (3 h dipping) e layer B (30 sec dipping)

Gli spettri del coefficiente di assorbimento (Figura142b) confermano anch'essi che la perovskite è completamente formata nel layer A. La posizione spettrale della soglia di assorbimento è leggermente sopra a 1,5 eV (bandgap della perovskite), mentre nel layer B è evidente un altro gradino attorno ai 2,3 eV che corrisponde alla bandgap del PbI_2.

L'attività è proseguita realizzando dispositivi *HTM-free* basati su un'architettura di cella, che non prevedendo la deposizione di uno strato HTM, utilizza la perovskite sia come strato assorbitore di luce che come trasportatore di lacune al contatto metallico posteriore, *back-contact*, deposto direttamente sulla perovskite stessa. In Figura 143 è mostrata l'architettura HTM-free utilizzata.

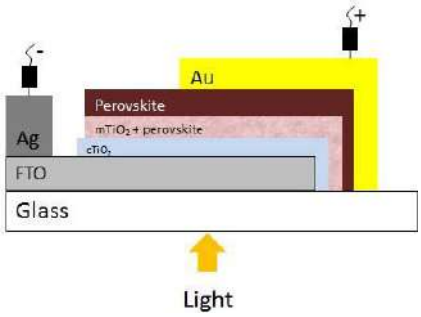


Figura 143. Tipica architettura del dispositivo HTM-free (vetro/FTO/c-TiO_2/mTiO_2/$CH_3NH_3PbI_3$/Au

Le celle HTM-free ottenute su substrati con differenti spessori di ossido di titanio mesoporoso sono state caratterizzate tramite caratteristica densità di corrente - tensione (J-V) e misure di efficienza quantica esterna (EQE). In Figura 144 sono mostrati gli spettri EQE registrati per i dispositivi con perovskite depositata su TiO_2 mesoporoso sottile (spessore 600 nm) e ultrasottile (300 nm). La migliore risposta si ha per il dispositivo su

mesoporoso da 600 nm, probabilmente grazie alla migliore raccolta delle cariche nello strato più spesso costituito da $mTiO_2$ infiltrato di perovskite. Da immagini in sezione, realizzata tramite un apparato a fascio ionico focalizzato (FIB), si evince che la perovskite ricopre completamente la struttura porosa del $mTiO_2$ sottile, aumentando in questo modo la raccolta e il trasporto di cariche quando venga utilizzato uno spessore maggiore di ossido di titanio mesoporoso. Dalle curve J-V acquisite sulle stesse celle sono stati estratti i parametri riportati in Tabella 53. Anche in questo caso i migliori risultati sono per i dispositivi mesoporosi $mTiO_2$ sottili.

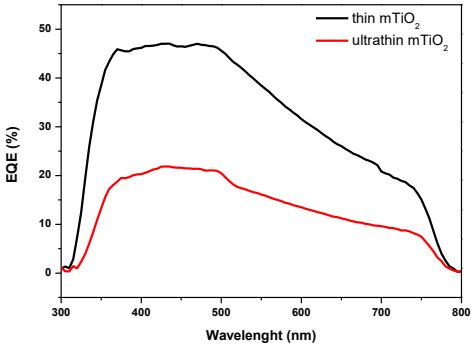


Figura 144. Spettri EQE dei dispositivi realizzati su substrati vetro/FTO/$cTiO_2$/$mTiO_2$ sottile (thin, spessore 600 nm) e ultrasottile (ultrathin, spessore 300 nm)

Tabella 53. Parametri delle celle realizzate con *scaffolding* mesoporoso estratti dalle curve J-V

	thin $mTiO_2$	ultrathin $mTiO_2$
Efficienza di conversione, PCE (%)	3,4	2,2
Fill factor, FF (%)	44,9	48,9
Densità di corrente di corto circuito , J_{sc} (mA/cm^2)	10,4	5,9
Tensione a circuito aperto, V_{oc} (mV)	715	735

I valori misurati per le V_{oc} sono confrontabili con quelli riportati in letteratura per celle solari in configurazione HTM-free, ma le efficienze sono più basse a causa dei bassi valori di FF e J_{sc}. Probabilmente un'ottimizzazione del substrato in particolare in termini di spessore del *blocking* e dello *scaffolding* potrà determinare un rilevante miglioramento delle prestazioni dei dispositivi.

I valori ragionevoli di V_{OC} danno evidenza che le celle non abbiano risentito dell'elevata umidità relativa presente durante la fabbricazione delle stesse. A ulteriore conferma di ciò è importante evidenziare che le prestazioni delle celle rimangono stabili per almeno una settimana come mostrato dal confronto degli spettri EQE misurati su una cella appena realizzata e dopo una settimana (figura 145). E' evidente che la risposta è molto stabile e ciò contribuisce a validare la procedura messa a punto per la preparazione dello strato attivo che consente di migliorare sia l'uniformità dei film che la stabilità del materiale.

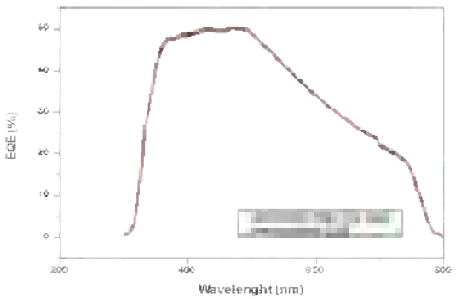


Figura 145 . Spettri EQE della cella misurata appena realizzata e dopo una settimana

Sviluppo di film di TiO_x flat per la fabbricazione di dispositivi a base di perovskite

Lo sviluppo di substrati con ossido di titanio flat, senza cioè uno strato mesoporoso, da utilizzare come strati trasportatori di elettroni (ETL) nei dispositivi appare di fondamentale importanza sia per superare le limitazioni in termini di efficienza evidenziate dall'utilizzo di substrati commerciali, sia per l'applicazione industriale, in quanto la realizzazione di un'architettura di cella planare è sicuramente preferibile. A questo scopo, parallelamente alle attività sull'ottimizzazione delle condizioni di preparazione dello strato assorbitore, sono stati eseguiti test di fabbricazione di celle fotovoltaiche a base di perovskite mettendo a punto uno strato trasportatore di elettroni flat (TiO_x) attraverso una procedura semplificata da soluzione ed utilizzando solo step di processi a bassa temperatura (< 200 °C) in modo da avere un materiale compatibile con l'utilizzo di tecnologie di stampa roll-to-roll. Anche in questo caso i test sono stati condotti all'aria in condizioni di umidità ambiente. Le celle sono state completate utilizzando anche un HTM realizzato con uno strato di Spiro-OMeTAD allo scopo di incrementare le prestazioni dei dispositivi, favorendo la raccolta delle cariche fotogenerate. La struttura dei dispositivi realizzati è del tipo:

vetro/ITO/TiO_x/Perovskite/Spiro-OMeTAD/Au, come riportato in Figura 146.

Il processo di realizzazione messo a punto può essere schematizzato come segue:

1) definizione del contatto frontale (patterning dell'ITO depositato su vetro);
2) sintesi e deposizione dello strato "n" (TiOx ricoperto da un layer di PCBM);
3) sintesi e deposizione dello strato di perovskite;
4) deposizione dello strato "p" (Spiro-OMeTAD);
5) deposizione contatto posteriore (Au).

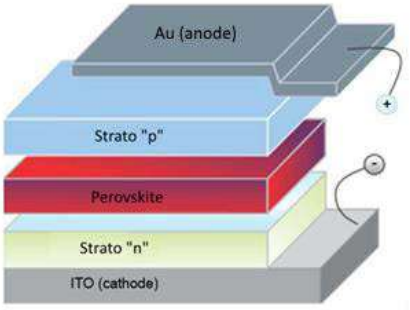


Figura 146. Struttura della cella a base di perovskite con HTM

Lo strato di TiO_x messo a punto, è stato realizzato depositando tramite spin coating una soluzione di isopropossido di titanio(IV) in 2-metossietanolo su substrati vetro/ITO precedentemente patternati. I film così ottenuti sono stati trattati termicamente a 200 °C per 60' in aria, ottenendo un film di TiO_x compatto con uno spessore di circa 80 nm. Il film presenta una buona trasparenza con valori di trasmittanza di circa l'80% al di sopra di 450 nm, mentre raggiunge il 90% intorno ai 400 nm. Occorre precisare che strati di TiO_x con spessore inferiore, risultano avere proprietà ottiche migliori in termini di trasmittanza, ma non sono "resistenti" alle successive manipolazioni (in pratica, si "bucano" a seguito della deposizione dello strato di perovskite). Lo strato "n" infine viene completato deponendo per spin coating un sottile strato di PCBM a partire da una soluzione contenente il fullerene in clorobenzene. Sullo strato di tipo n è stato poi depositata la perovskite. Il dispositivo è stato, poi, completato con uno strato di Spiro-OMeTAD ed un contatto posteriore di oro.

Le celle fotovoltaiche realizzate sono state caratterizzate tramite caratteristica I-V sotto luce simulata (spettro AM 1,5 G, 100 mW/cm^2). In Figura 147 viene riportata la caratteristica IV della migliore cella realizzata.

L'efficienza di conversione risulta essere pari a 6,5% (FF = 43%, J_{sc} = 16,5 mA/cm^2, V_{oc} = 909 mV). In particolare il lavoro eseguito sullo sviluppo del contatto frontale, insieme all'utilizzo di un HTM, ha determinato un incremento sia della V_{OC} che della corrente. Ulteriore lavoro sperimentale è, tuttavia, necessario per migliorare il FF delle celle, consentendo di incrementare in maniera significativa l'efficienza di conversione.

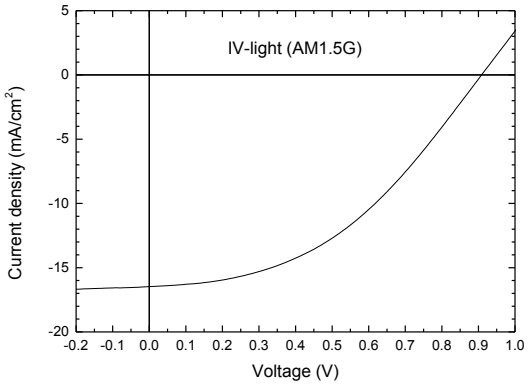


Figura 147. Caratteristica IV-light (AM1.5G) della migliore cella a base di perovskite realizzata

Sviluppo di copolimeri a blocchi per la realizzazione di matrici di ossidi metallici di tipo "n"

Le attività hanno riguardato la messa a punto di un metodo per la fabbricazione di strati a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati, caratterizzati da inclusione selettiva in domini nanometrici di nanoparticelle di ossido di zinco, secondo cammini percolativi uniformi e continui. Quest'attività s'inserisce sempre nell'ambito dello sviluppo di strati trasportatori di elettroni (ETL) innovativi che consentano di migliorare il trasporto di carica nei dispositivi a base di perovskite.

Il protocollo messo a punto consiste nell'utilizzo di un copolimero di-blocco polistirene-b-polimetilmetacrilato (PS-PMMA), caratterizzato dalla medesima lunghezza dei blocchi PS e PMMA in grado di dar luogo ad una morfologia lamellare, in cui domini lamellari di PS, si alternano a domini lamellari di PMMA, entrambi di spessore nanometrico.

Sono stati raggiunti alcuni importanti obiettivi. In primo luogo è stato identificato un metodo semplice e funzionale in grado di garantire l'ottenimento di film sottili di PS-PMMA (spessore 50-100 nm) nanostrutturati, caratterizzati da ordine orientazionale a lungo raggio dei domini lamellari di PS e PMMA perpendicolarmente alla superficie conduttiva di un supporto di ITO. E stato mostrato che i film nanostrutturati così ottenuti, posti a sandwich tra il supporto conduttivo di ITO e un elettrodo di Au, Ag o Al, per effetto dell'applicazione di campi elettrici, sono in grado di organizzarsi in nanostrutture caratterizzate da un elevato grado di ordine a lungo raggio sia per quanto riguarda l'orientazione perpendicolare dei domini lamellari, sia per quel che riguarda il loro parallelismo.

Successivamente è stata studiata la possibilità di ottenere film sottili nanocompositi di PS-PMMA a morfologia lamellare caratterizzati dall'inclusione selettiva di nanoparticelle di ZnO nei domini lamellari di PS, preservando l'orientazione perpendicolare dei domini lamellari come mostrato nell'immagine TEM di Figura 148. Tali

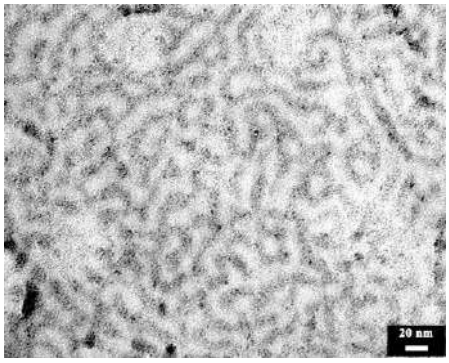


Figura 148. Immagine TEM di un film sottile del nanocomposito a base del copolimero a blocchi PS-PMMA a morfologia lamellare, caratterizzato da inclusione selettiva di nanoparticelle di ZnO nei domini di PS. I domini di PS (scuri) e PMMA (chiari) sono orientati perpendicolarmente al supporto di ITO in un arrangiamento worm-like disordinato

nanocompositi sono stati utilizzati come strati attivi per la conduzione di corrente in dispositivi a elettrodo a configurazione parallela ottenuti per deposizione di elettrodi di oro sulla superficie del film polimerico. La conduzione di corrente è assicurata dalla formazione di cammini percolativi delle nanoparticelle di ZnO nei domini nanometrici di PS, posto che la concentrazione di nanoparticelle utilizzata per la fabbricazione del dispositivo sia maggiore di un valore critico. La dispersione delle nanoparticelle di ZnO in un semplice film sottile di PS omopolimero, invece, risulta non omogenea e non uniforme, per cui anche utilizzando concentrazioni di nanoparticelle di ZnO maggiori del valore critico, non si verifica alcuna conduzione di corrente.

Si può pertanto affermare che sono stati messi a punto film sottili nanocompositi di PS-PMMA a morfologia lamellare caratterizzati dall'inclusione selettiva di nanoparticelle di ZnO da utilizzare come strati trasportatori di elettroni innovativi in celle a base di perovskite. Tali materiali dovranno essere testati con la realizzazione di dispositivi al fine di validare il processo sviluppato.

Per concludere nel subtask c.1 sono stati messi a punto processi per la preparazione da soluzione di strati assorbitori a base di $CH_3NH_3PbI_3$. Tali strati sono stati utilizzati per la realizzazione di dispositivi fabbricati sia su strati trasportatori di elettroni a base di ossido di titanio mesoporoso commerciali che su strati di TiO_2 flat sviluppati in ENEA, ottenendo un'efficienza massima di conversione pari a 6,5%. E' inoltre stata avviata un'attività sullo sviluppo di strati trasportatori di elettroni innovativi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati, caratterizzati da inclusione selettiva in domini nanometrici di nanoparticelle di ossido di zinco.

c.2 Sviluppo di substrati con elevate proprietà di scattering della radiazione solare

Il confinamento ottico della radiazione solare all'interno di celle fotovoltaiche a film sottile è un elemento cruciale per ottimizzare l'assorbimento della radiazione solare utilizzando bassissimi spessori di materiale. Questo substask si è concentrato appunto sulla realizzazione di architetture di dispositivo facenti uso di substrati di vetro testurizzati in grado di determinare un efficiente assorbimento della luce. Sono state portate avanti due strategie: sviluppo di vetri con morfologia superficiale random e sviluppo di substrati con strutture regolari periodiche e aperiodiche definite mediante modelli teorici. Nel primo caso si mira a migliorare lo scattering della radiazione all'ingresso nel dispositivo e contemporaneamente a sviluppare processi facilmente scalabili su larga area utilizzando i substrati comunemente utilizzati dall'industria fotovoltaica. Nel secondo caso l'idea è quella di realizzare dei cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori avanzati per massimizzare

l'intrappolamento della radiazione solare sfruttando effetti fotonici e plasmonici. In entrambi i casi, le strutture realizzate sono state testate mediante la fabbricazione di celle solari convenzionali a film sottile di silicio.

Testurizzazione random

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di sviluppare tecniche per produrre substrati di vetro con testurizzazione random caratterizzati da elevate proprietà di scattering in tutto l'intervallo spettrale di interesse. Infatti, nell'ambito delle strategie per ottenere un efficace intrappolamento della radiazione solare, un metodo alternativo al consolidato utilizzo di TCO naturalmente testurizzati è l'utilizzo di un processo che operi direttamente sul substrato di vetro con la creazione di una superficie di adeguata rugosità sulla quale andare a depositare TCO prodotti con tecniche per larga area e di basso costo quali lo sputtering. Questa architettura di dispositivo ha il doppio vantaggio di evitare la testurizzazione della superficie del TCO con risparmio di tempo e di energia e di facilitare l'ottimizzazione delle proprietà del TCO.

Per la testurizzazione dei vetri sono stati seguiti due differenti approcci:

- Reactive Ion Etching (RIE)
- Trattamenti di attacco chimico del vetro (attività in collaborazione con l'Università di Napoli).

Nel seguito vengono sintetizzati i risultati conseguiti per entrambi gli approcci, nei rapporti RdS/PAR2014/009 e RdS/PAR2014/010 possono essere trovati i dettagli delle attività svolte.

Sviluppo di substrati con elevate proprietà di scattering della radiazione solare mediante etching da plasma reattivo

Nelle scorse annualità sono stati sviluppati ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO depositati su substrati di vetro con superficie di adeguata rugosità da utilizzare come elettrodi frontali in celle solari a film sottile. In particolare per quanto riguarda lo sviluppo di substrati di vetro rugosi, sono stati sviluppati metodi di trattamento delle superfici di vetro sia mediante metodo Aluminium Induced Texture (AIT) che mediante attacco chimico da soluzioni.

Sulla base dell'esperienza maturata nell'analisi delle superfici e nella correlazione tra la tessitura superficiale ottenuta e le relative proprietà di scattering della luce da parte delle superfici testurizzate, nella presente annualità sono state esplorate tecniche alternative e meno costose di testurizzazione della superficie del vetro, essendo il limite principale del metodo AIT l'elevato costo del trattamento termico condotto ad alta temperatura. Nella presente ricerca sono stati sviluppati trattamenti chimico-fisici di substrati di vetro come i processi in plasma reattivo di opportuni gas, associati anche a trattamenti chimici come i processi di wet etching, con l'obiettivo di controllare sia la velocità di etching che la micro-struttura della superficie. Sono stati ottimizzati i parametri del processo RIE al fine di perseguire un controllo efficiente della velocità di rimozione e di ottenere un attacco uniforme e riproducibile del substrato anche in relazione alla composizione chimica del substrato stesso.

L'attività sperimentale per l'ottenimento di substrati di vetro testurizzati è stata sviluppata attraverso più obiettivi sequenziali:

1. sviluppo di vetri testurizzati mediante processo di Reactive Ion Etching condotto sia direttamente su vetro flat che su vetro sottoposto ad attacco di etching chimico con relativa analisi ed ottimizzazione delle caratteristiche di rugosità e morfologia superficiale;
2. deposizione di film di TCO sul lato testurizzato del vetro mediante sputtering RF;
3. analisi della relazione tra geometria di testurizzazione, proprietà di scattering delle superfici e light-trapping nei dispositivi mediante:
   - Caratterizzazione ottica e morfologica delle superfici
   - Realizzazione di dispositivi fotovoltaici a film sottile su substrati testurizzati (TCO/textured glass).

Il processo RIE è ampiamente utilizzato per la modifica di superfici in processi di microfabbricazione per la sua elevata anisotropia di rimozione. Esso si basa sull'utilizzo di un plasma, generato da un gas o una miscela di gas alimentati in camera, che presenta caratteristiche chimico reattive, al fine di rimuovere il materiale depositato su un substrato o modificare la superficie del substrato stesso. Gli ioni ad alta energia provenienti dal plasma bombardano la superficie del substrato, reagendo con essa in modo fisico oppure promuovendo l'interazione chimica tra le specie radicaliche generate ed il substrato a seconda del tipo di gas utilizzato. L'impianto RIE utilizzato è un impianto customizzato con catodo circolare raffreddato. Il substrato di vetro (7 x 7 cm^2) è posizionato direttamente sul catodo. Sono stati condotti trattamenti RIE sia direttamente su vetro flat che su vetro già sottoposto ad attacco chimico. I processi RIE su vetro flat (Corning Eagle) sono stati eseguiti ad una potenza RF di 260 W, la pressione di processo è stata variata tra 0,045 e 0,15 mbar, per tempi di processo di 30 e 60 minuti.

Come gas di etching sono state usate miscele di CF_4 e O_2 a differenti rapporti.

Analizzando il ruolo dei parametri di processo emerge che: i) miscele a più alto contenuto di ossigeno hanno una reattività più alta che produce un aumento della velocità di etching con conseguente aumento della profondità delle cavità e della rugosità; ii) la pressione è un parametro chiave nel processo di etching del vetro sia in termini di velocità di etching che di creazione di particolari morfometrici in grado di diffondere efficacemente la luce. A bassa pressione la velocità di rimozione è bassa e di conseguenza la modifica delle superfici è contenuta. A pressioni troppo elevate (0,12 - 0,15 mbar) si ottengono superfici più rugose ma anche più irregolari e sebbene ci sia un incremento delle proprietà di scattering della luce si ha una riduzione di trasmittanza del substrato e la presenza di regioni microfratturate.

Esiste invece un range intermedio di pressioni (0,07 - 0,1 mbar) che produce modifiche uniformi della superficie, le proprietà di trasmittanza e riflettanza del vetro rimangono inalterate e sebbene le proprietà di scattering non siano elevatissime sono comunque comparabili a quelle che si ottengono da superfici testurizzate di film di TCO quali l'SnO_2 o lo ZnO. La morfologia tipica di una superficie di un vetro Corning trattato per 60 minuti con una miscela CF_4/O_2 in rapporto 7:2 mostra una superficie uniformemente scavata, costituita da tante piccole cavità con una rugosità RMS di circa 40 nm.

Per i trattamenti RIE su vetro wet-etched è stato scelto un vetro comune e a basso costo, come il *soda lime*, contenente SiO_2 per circa il 70% ed una discreta percentuale di Al_2O_3 e di ossidi alcalini e alcalino-terrosi. Gli attacchi sono stati condotti con soluzioni di acido fluoridrico a differenti concentrazioni e per differente durata. Sono stati indagati i meccanismi di attacco dell'acido fluoridrico provando a stabilire delle correlazioni tra le specie chimiche presenti in soluzione, la morfologia dei crateri e la velocità di etching. Si osserva che la velocità di etching aumenta all'aumentare della concentrazione dell'acido, il processo è controllato dallo step diffusivo, ossia dallo step di rimozione dei prodotti formati dai siti di reazione. Al variare del tempo di attacco le dimensioni dei crateri aumentano, ma la rugosità varia di poco indicando che l'etching verticale è poco pronunciato. Al variare della concentrazione di HF 5-10-15% w/w, i crateri diventano più larghi e sparsi, raggiungendo una profondità fino a 100 nm. Ciò può essere messo in relazione con le specie chimiche presenti in soluzione e con le variazioni relative della frazione del dimero H_2F_2, rispetto alla frazione di HF^{2-}. Lo ione HF^{2-} reagisce più velocemente, ma dà crateri più stretti e profondi, mentre il dimero, più ingombrante e lento, porta a crateri più larghi; si passa, quindi, da una morfologia V-shape ad una morfologia U-shape più idonea per i dispositivi.

Superfici di vetro soda lime trattate con processo wet etching in soluzioni di HF al 5% per 15 min sono state sottoposte a processo RIE con gas reattivo CF_4, allo scopo di modificare la forma e la profondità dei crateri. Sono state esplorate differenti potenze RF di generazione del plasma e differenti tempi di attacco. All'aumentare del tempo di processo non si riscontra un aumento di profondità delle cavità iniziali del vetro, come ottenute dal processo di wet etching, ma solo un aumento della loro larghezza all'aumentare del tempo di trattamento RIE con la formazione di una doppia tessitura fatta di piccole cavità all'interno delle cavità grandi (Figura 149). Non si

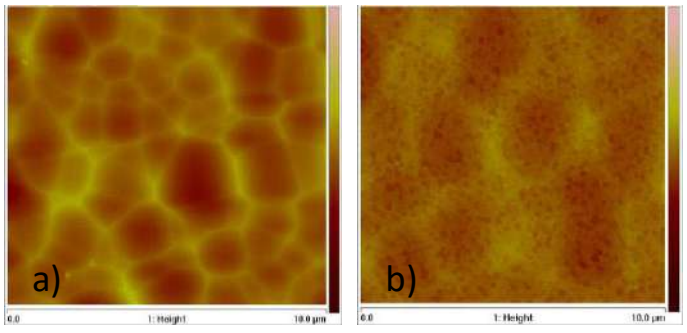


Figura 149. Morfologia superficiale di vetri soda lime attaccati mediante wet eching con soluzioni di HF (a) e successivamente sottoposti a processo RIE con CF_4/O_2 per 40 min (b)

ottengono miglioramenti significativi sia della rugosità che del fattore di haze. Il differente comportamento di questi substrati, rispetto agli attacchi RIE su vetro flat, può essere imputato alla differente chimica delle superfici sottoposte a wet etching che hanno meno siti reattivi in grado di interagire con il plasma, rendendo così il RIE meno efficace. L'indagine ha quindi evidenziato che questi substrati con doppio trattamento non hanno, rispetto ai vetri flat trattati con RIE, migliorate proprietà di scattering della luce.

I substrati di vetro flat sottoposti ad etching mediante RIE sono stati ricoperti con un film di ZnO:Ga (GZO) depositato per sputtering. Lo spessore del film di TCO è stato ottimizzato a circa 950 nm al fine di ottenere buone proprietà ottiche ed elettriche (R_{sh}=12 Ω/sq) e garantire un ricoprimento uniforme del substrato.

I film di GZO sono stati depositati sia su vetri attaccati con differente rapporto di gas reattivo che con differenti pressioni di processo, al fine di verificare il contributo della tessitura del vetro sulle proprietà di scattering della struttura risultante e la conformalità di crescita del TCO. Dopo la deposizione del GZO la struttura complessiva GZO/vetro testurizzato mostra uno scattering più elevato rispetto al solo vetro testurizzato. I migliori risultati si ottengono per campioni depositati su vetro attaccato con un rapporto CF_4/O_2 pari a 7:2, che dopo la deposizione del GZO alla lunghezza d'onda di 600 nm presentano un haze del 45 % rispetto al 30% che si otteneva con il solo vetro testurizzato. I film ottenuti su vetri testurizzati a bassa pressione appaiono invece uniformemente ricoprenti e la vista in sezione del film ottenuto a p= 0,07 mbar (Figura 150) mostra un film di GZO di spessore uniforme e ben ricoprente le cavità del substrato.

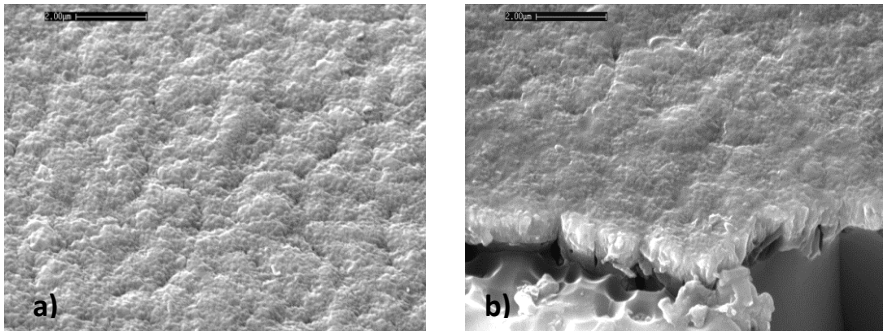


Figura 150. Morfologia della superficie e vista in sezione del film di GZO su vetro testurizzato a pressione di processo RIE di 0,07 mbar

Particolarmente interessanti sono i risultati delle misure di scattering angolare (Angular Resolved Scattering, ARS) condotte sulle strutture TCO/Etch glass. Le curve ottenute mostrano un angolo di scattering preferenziale localizzato intorno ai 25° e presentano una spalla ad angoli più alti che indicano la presenza di un secondo angolo preferenziale di scattering a valori superiori ai 45°. Gli scattering a più alto angolo sono quelli che contribuiscono altamente all'effetto di light trapping nel dispositivo. L'intensità di questa componente a più alti angoli di scattering è maggiore dopo la deposizione dello ZnO (Figura 151) e molto vicina al valore di scattering preferenziale di 43° del ZnO:B depositato per CVD la cui superficie piramidale è comunemente considerata la più idonea per ottenere un elevato confinamento ottico nei dispositivi a film sottile. Il tipo di testurizzazione ottenuta su queste superfici è molto promettenti per indurre fenomeni di scattering della luce.

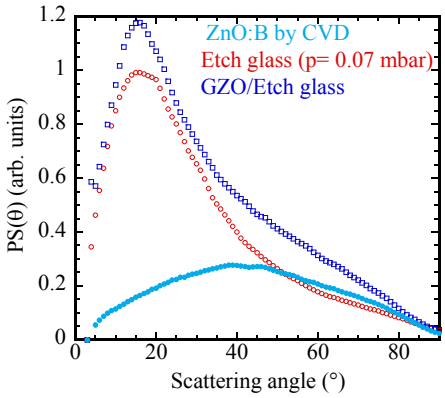


Figura 151. Potenza di scattering derivata dalla intensità trasmessa misurata con tecnica ARS in funzione dell'angolo di scattering prima e dopo la deposizione del GZO. E' riportata per confronto la curva di scattering di un film di ZnO:B naturalmente testurizzato ottenuto per CVD

Per meglio comprendere la relazione esistente tra la geometria dei particolari morfometrici ottenuti nei processi di scavo del vetro e le proprietà di scattering ottenibili, è stato condotto uno studio sistematico sulle proprietà morfologiche, ottiche e di scattering di due superfici di caratteristiche diverse. Le caratteristiche morfometriche delle superfici dei vetri testurizzati sono state messe in relazione con le proprietà dei dispositivi, con l'obiettivo di individuare quali caratteristiche deve possedere una cavità per produrre un light trapping efficace, ma anche tentare di stabilire un utile approccio per predire la qualità di un trattamento testurizzante. Per questo studio sono stati utilizzati substrati di vetro sottoposti ad etching di differente durata ed aventi una superficie costituita da

cavità di forma e dimensioni differenti. Un campione (S1), presenta cavità di piccole dimensioni (0,6 μm) mentre l'altro (S2) presenta cavità di dimensioni medie più grandi (1,5 μm). Entrambe le superfici presentano una tessitura random (Figura 152) con crateri emisferici a forma di U con valli più profonde nel campione S1 e molto più larghe e spianate nel campione S2. Misure di caratterizzazione ottica e morfologica sono state condotte su entrambi i provini, da cui sono stati ricavati il fattore di haze, la rugosità, l'angolo di inclinazione delle cavità ed il loro diametro medio. Infine, dalle misure ARS è stato valutato l'angolo preferenziale di scattering. Su entrambi i substrati di vetro sono state effettuate deposizioni di ZnO:Ga mediante sputtering e le superfici risultanti sono state caratterizzate per valutare sia la morfologia (Figura 153) che le proprietà di scattering della struttura TCO/textured glass (Figura 154 e Tabella 54). I risultanti film presentano due morfologie differenti.

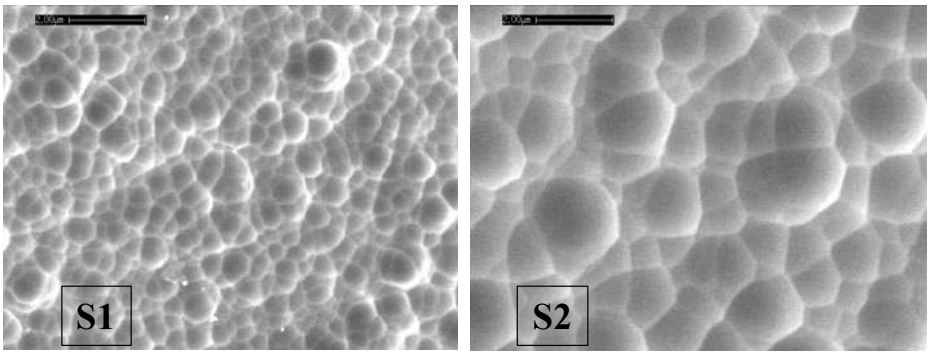


Figura 152. Immagini SEM della superficie dei campioni S1 ed S2

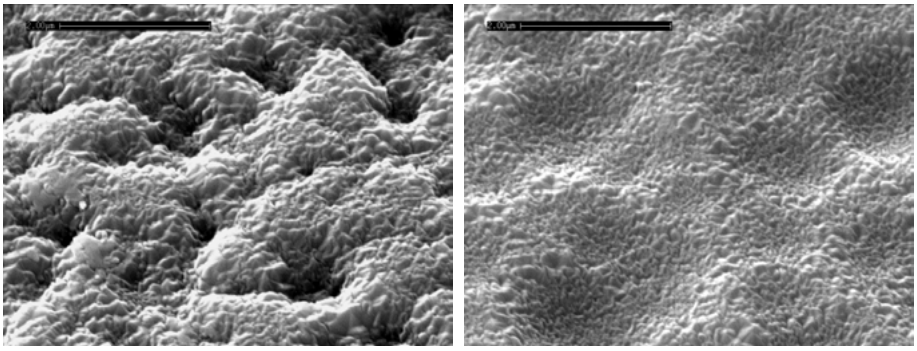


Figura 153. Immagini SEM della superficie dei campioni S1 (sinistra) e S2 (destra) dopo la deposizione del GZO

Tabella 54. Valori riassuntivi dei principali parametri che caratterizzano la forma e le dimensioni dei particolari morfometrici e la capacità di scattering delle superfici prima e dopo la deposizione dello ZnO

	Text glass		GZO / Text glass	
Campione	**S1**	**S2**	**S1**	**S2**
Haze (%)	28,7	25	33,2	28
σ_{RMS} (nm)	140	71	150	78
Angolo incl. medio (°)	16	9,5	17	10,5
Diametro cavità (μm)	0,6	1,5		

In definitiva, tutti i risultati dell'indagine morfometrica (RMS, PSD, distribuzione angolo di inclinazione delle cavità) forniscono, come importante elemento di previsione, l'informazione che la superficie del campione S1 risulta più promettente di quella del campione S2 in termini di potenzialità di scattering ad alto angolo con il beneficio di un più efficace confinamento ottico nel dispositivo fotovoltaico. Per confermare questa previsione risultava fondamentale andare a realizzare dispositivi fotovoltaici sulle superfici S1 ed S2.

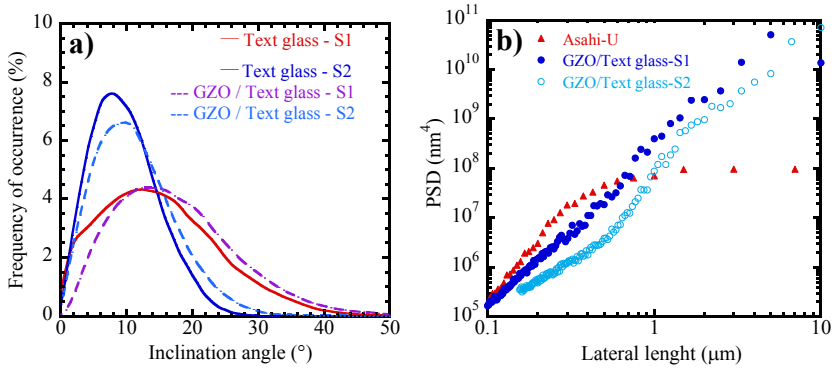


Figura 154. a) Istogrammi degli angoli di inclinazione delle cavità prima e dopo la deposizione dello ZnO; b) Funzione della densità di potenza spettrale PSD per le strutture GZO/S1 e GZO/S2

I risultati ottenuti mostrano che una struttura molto rugosa, ottenuta su vetro S1 con cavità a forma di U, produce un maggior effetto di light-trapping e più basse perdite di riflettanza (Figura 155) rispetto a strutture a forma di U-appiattita o "emisferica", indicando che particolari morfometrici di dimensioni laterali comparabili alla lunghezza d'onda della luce incidente producono un miglior light-trapping.

Le considerazioni derivanti da quest'analisi possono essere un utile approccio nella valutazione delle caratteristiche morfometriche di testurizzazioni random idonee a produrre un light-trapping efficace in dispositivi a film sottile e sono, pertanto, utilizzabili come strumento per predire la qualità di un trattamento testurizzante.

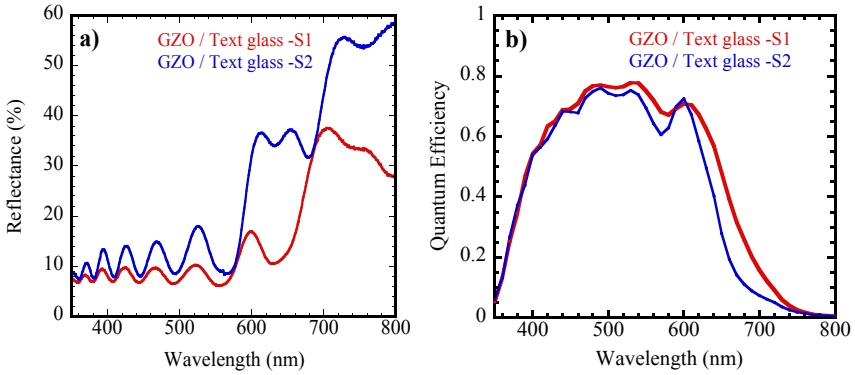


Figura 155. Dispositivi realizzati su vetri testurizzati S1 ed S2: a) curve di riflettanza emisferica, b) curve di efficienza quantica

Sviluppo di metodologie chimiche per la modulazione della morfologia superficiale di substrati vetrosi

I temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università di Napoli Federico II hanno riguardato l'ottimizzazione dei processi di testurizzazione di substrati vetrosi mediante attacco chimico. L'attività s'inquadra nel filone di ricerca rivolto ad incrementare l'efficienza di assorbimento della radiazione solare da parte di una cella solare a film sottile mediante il controllo delle caratteristiche morfologiche dell'elettrodo frontale ed in particolare dell'interfaccia substrato/ossido trasparente e conduttivo.

La procedura prevede l'attacco chimico di substrati vetrosi mediante soluzioni acquose di acido fluoridrico (HF) e il principio chimico su cui si fonda è la reazione tra il biossido di silicio, il principale costituente chimico del substrato vetroso, e l'acido fluoridrico. Per garantire l'economicità del processo e allo stesso tempo la sua scalabilità su vetri di grandi dimensioni si sono utilizzati come substrati vetri commerciali tipo soda-lime di dimensioni pari a (10 x 5) cm^2. Si sono esplorate tre diverse modalità di attacco: (1) da fase soluzione; (2) da fase solida; (3) da fase vapore. Per la modalità di tipo (1) l'ottimizzazione dei parametri di attacco è avvenuta modulando la concentrazione della soluzione acida iniziale e la sua composizione mediante l'aggiunta di additivi quali glicerina ed acido cloridrico. L'utilizzo della glicerina ha consentito di ottenere morfologie di attacco uniformi anche per tempi prolungati, l'acido cloridrico ha permesso di diminuire i tempi di attacco grazie alla sua azione di catalizzatore. L'attacco da fase solida si caratterizza per la sua semplicità evitando di manipolare soluzioni di HF

concentrate. Infatti, in questo caso le specie attive, quali HF_2^- e HF, sono generate per dissociazione in soluzione acquosa di un sale, il fluoruro acido di ammonio, che è molto stabile in condizioni ordinarie e facilmente manipolabile. Nell'attacco da fase vapore i vetrini sono esposti ai vapori provenienti da una soluzione di HF concentrato. Apparentemente questa sembrerebbe essere la strategia più semplice da un punto di vista operativo, invece essa presenta non pochi problemi di realizzazione, primo tra tutti quello di evitare la condensazione dei vapori sulla superfice del substrato. Pertanto, buona parte della sperimentazione sull'attacco da fase vapore ha riguardato la realizzazione di opportuni dispositivi sperimentali atti a realizzare condizioni tali da massimizzare la riproducibilità dell'attacco. In tale ambito la distanza che i vapori di HF devono percorrere per investire il substrato risulta essere un parametro importante da controllare insieme al volume totale del contenitore in cui avviene l'attacco.

In Figura 156 sono riportate le immagini AFM di tre vetrini testurizzati ottenuti, rispettivamente, da fase liquida (V59), da fase solida (V53) e da fase vapore (V56-2). Dal confronto delle immagini AFM si evince che le modalità di attacco da soluzione e da fase solida producono superfici caratterizzate da difetti di ampie dimensioni suggerendo un attacco meno selettivo che origina cavità caratterizzate da valori non elevati di profondità di scavo. L'attacco ottenuto da fase vapore sembra più selettivo originando cavità con valori più elevati di profondità di scavo (h = 280 nm) e di rugosità media (RMS = 59,5 nm).

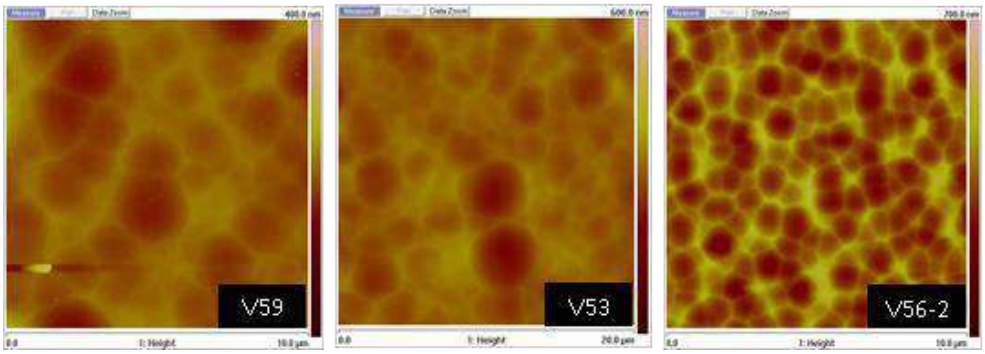


Figura 156. Immagini AFM della superficie testurizzata dei vetrini ottenuta da fase liquida (V59), fase solida (V53) e fase vapore (V56-2)

Sono state realizzate strutture TCO/vetro testurizzato depositando sottili film di GZO (spessore pari a 980 nm) mediante *sputtering magnetron* planare operante in regime RF. La rugosità e l'uniformità dei film di GZO sono fortemente dipendenti dalla morfologia del vetro sottostante. Le curve di trasmittanza totale e diffusa di tali strutture sono illustrate in Figura 157, mentre in Tabella 55 vengono confrontate le principali caratteristiche ottiche, morfologiche ed elettriche dello strato di TCO utilizzato, GZO-42, con quelle dei vetrini testurizzati e delle strutture GZO/vetro testurizzato del tipo V59 (attacco da fase liquida), V53 (attacco da fase solida), V56-2 (attacco da fase vapore).

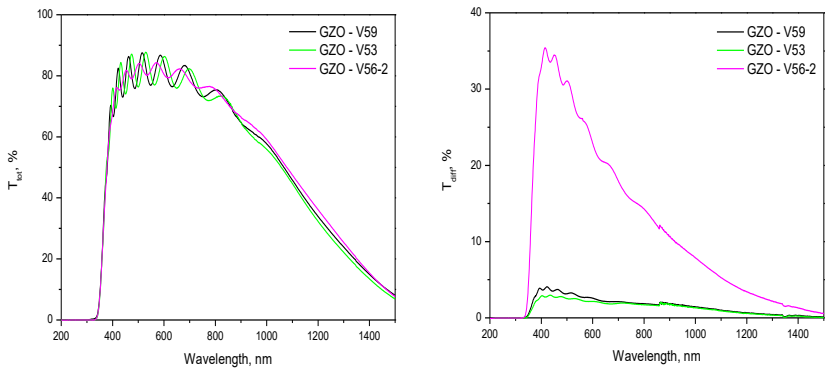


Figura 157. Spettri di trasmittanza totale, T_{tot}, (a sinistra) e diffusa, T_{diff}, (a destra) delle strutture GZO/vetro testurizzato utilizzando i vetrini V59, V53 e V56-2

Tabella 55. Caratteristiche morfologiche ed ottiche dei vetrini V59, V53 e V56-2 prima (a) e dopo (b) deposizione di GZO

Dispositivo	RMS (nm)		Angolo di inclinazione		ΔA (%)		H(λ) (%)		R_{sh} (Ω/sq)
GZO-42							0,68		8,85
GZO/V59	20,5[(a)]	22,0[(b)]	2,5[(a)]	4,8[(b)]	0,25[(a)]	0,75[(b)]	2,3[(a)]	3,6[(b)]	9,08[(b)]
GZO/V53	31,6[(a)]	-			0,13[(a)]		-	2,94[(b)]	8,74[(b)]
GZO/V56-2	59,5[(a)]	103[(b)]	15,7[(a)]	20,5[(b)]	5[(a)]	10[(b)]	26[(a)]	32[(b)]	8,48[(b)]

I risultati ottenuti indicano che per tutte le strutture studiate, si ha un aumento del valore di rugosità RMS dopo la deposizione di GZO, con conseguente aumento del valore medio di haze. Tuttavia, la struttura che presenta la capacità più elevata di diffondere la luce è quella ottenuta utilizzando il vetrino V56-2, preparato da fase vapore in modalità di attacco dinamica.

I risultati dimostrano inoltre che le modalità di attacco esplorate sono in grado di produrre substrati testurizzati, e che l'attacco da fase vapore risulta essere il più promettente per lo sviluppo di strutture idonee ad indurre fenomeni di diffusione della luce, anche se presenta i maggiori problemi di controllo e di riproducibilità.

Testurizzazione periodica e aperiodica

Il lavoro di ricerca, svolto nell'ambito di un accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio, è la naturale prosecuzione di quanto già effettuato nelle passate annualità nell'ambito di analoghi accordi di collaborazione. Le attività si sono sviluppate su due direzioni principali: una teorico/numerica, di studio e progetto delle strutture in esame, e l'altra sperimentale, rivolta alle prove di fabbricazione delle strutture e dei dispositivi. Il lavoro è stato condotto integrando risorse e competenze. L'Università del Sannio si è principalmente occupata della progettazione numerica, mentre presso i laboratori dell'ENEA sono state condotte le prove sperimentali che hanno visto il coinvolgimento anche di personale proveniente dall'Università. Le attività sintetizzate in questo paragrafo sono descritte in maniera approfondita nel rapporto RdS/PAR2014/011.

Nello specifico l'attività di ricerca si è incentrata sulla progettazione e validazione sperimentale di strati riflettori posteriori (back-reflector), costituiti da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici in configurazione sia periodica che quasi periodica, finalizzati alla definizione di nuove architetture di celle solari che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare nelle celle solari a film sottile.

Negli anni precedenti, gli studi condotti hanno evidenziato come strutture aperiodiche monodimensionali (in particolare in configurazione di Fibonacci) fossero in grado di fornire miglioramenti in termini di intrappolamento della luce, garantendo un incremento dell'efficienza della cella solare rispetto a configurazioni di tipo periodico. Tale effetto è dovuto ad una migliore eccitazione di modi guidati propaganti nella regione attiva di silicio e di modi superficiali plasmonici all'interfaccia metallo-dielettrica nonché ad effetti di tipo Fabry-Perot. Sulla base di ciò in questa annualità le attività si sono sviluppate su due direzioni principali: una teorico/numerica volta alla progettazione di riflettori posteriori basati su strutture aperiodiche bidimensionali, l'altra sperimentale, rivolta alla fabbricazione delle strutture e dei dispositivi con l'approccio della Nano Imprint Lithography (NIL).

Nel seguito quindi viene sinteticamente riportata l'attività di progettazione della cella solare a film sottile con riflettore posteriore caratterizzato da una struttura bidimensionale in configurazione aperiodica di Fibonacci con relativa controparte periodica. Vengono inoltre riportati i primi risultati relativi al processo di fabbricazione dei substrati mediante tecnica di NIL presso il centro ricerche ENEA di Portici, accompagnati da caratterizzazioni morfologiche e test di utilizzo in celle solari.

Progettazione

La cella solare analizzata è costituita dall'elettrodo frontale di ZnO trasparente e conduttivo (primo strato depositato su supporto di vetro), dalla giunzione p-i-n in silicio a film sottile e dal contatto metallico posteriore, che funge sia da collettore di cariche che da back-reflector per permettere di recuperare parte della radiazione solare non assorbita durante il primo passaggio nello strato attivo. Nel nostro approccio la strutturazione viene effettuata sul substrato di vetro di partenza. Con la deposizione dei vari strati componenti la cella, la morfologia della superficie frontale viene automaticamente riprodotta alle varie interfacce (con una certa variazione dovuta alla deposizione stessa dei materiali) fino al retro del dispositivo producendo così la voluta strutturazione del back-

reflector. Le variazioni della morfologia alle varie interfacce e gli effetti di tali variazioni sulle predizioni numeriche delle prestazioni delle celle rispetto al modello base in cui tali effetti sono trascurati sono stati investigati nella scorsa annualità.

Lo strato riflettore posteriore con pattern bidimensionale in configurazione quasi-periodica è ispirato alla sequenza di Fibonacci (Figura 158). Tale sequenza 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 a due distanze tra fori adiacenti. Ponendo $a < b$, 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 τ (per $\tau = 1$ ricadiamo nel caso di reticolo periodico).

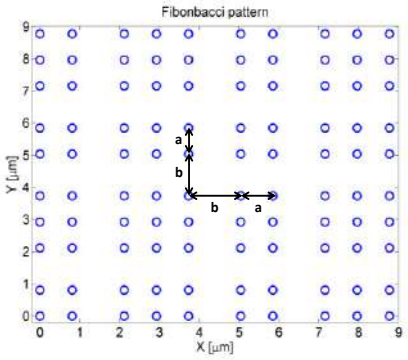


Figura 158. Struttura aperiodica di Fibonacci troncata a 9 distanze con periodo medio di 1 µm e τ=1,618

Al fine di dimensionare correttamente il pattern aperiodico ed il suo omologo periodico, si è fatto ricorso ad un approccio semi-analitico. Gli studi di ottimizzazione dei back-reflector effettuati negli anni precedenti hanno evidenziato, infatti, come l'approccio numerico accurato richieda elevate risorse computazionali con tempi di calcolo molto elevati. In particolare, si evidenziano criticità sulla sostenibilità computazionale (sia in termini di memoria che di tempi richiesti) proprio nell'analisi di strutture aperiodiche dove non è possibile ridurre il dominio computazionale ad una cella elementare.

Per non incorrere nei suddetti limiti computazionali, in alternativa ad un approccio puramente numerico è stata effettuata un'analisi basata sulle trasformate di Fourier spaziali dei pattern presi in considerazione. Il principio ispiratore del progetto è stato quello di poter comparare le prestazioni ottenibili con una cella con texturing periodico con quelle di una cella con texturing aperiodico di Fibonacci. Evidentemente la scelta dei parametri geometrici dei cristalli periodici ed aperiodici delle rispettive celle deve garantire un confronto prestazionale equo e significativo. Bisogna prestare particolare attenzione al fattore di riempimento dei pattern in quanto valori differenti possono comportare un diverso assorbimento attribuibile al diverso volume di materiale attivo piuttosto che alla geometria del pattern.

Analizzando la trasformata spaziale delle configurazioni periodica ed aperiodica si possono apprezzare alcune affinità tra un cristallo in configurazione aperiodica e un cristallo periodico. In particolare, è possibile osservare che un cristallo aperiodico, avente un periodo-medio-equivalente uguale al periodo del cristallo periodico, presenta lo stesso picco in corrispondenza del periodo del reticolo (anche se di diversa ampiezza) oltre ad altri picchi per altri valori del numero d'onda. Questa caratteristica della trasformata spaziale del cristallo aperiodico consente potenzialmente l'eccitazione di un maggior numero di modi (se sono rispettate le condizioni di phase matching) all'interno della cella ed è l'elemento distintivo dei pattern aperiodici che potrebbero fornire maggiori prestazioni alle rispettive celle solari.

Il periodo medio equivalente del cristallo aperiodico è definito come:

$$P_{av} = \frac{(n_a + n_b\tau)a}{m}$$

dove n_a ed n_b sono il numero di distanze *a* e distanze *b* nella macrocella ed *m* il numero di periodi nella macrocella periodica di riferimento. Si è scelto di fissare tale periodo pari a quello della struttura periodica in modo che entrambe le strutture abbiano il picco principale della trasformata spaziale di Fourier accordato allo stesso numero d'onda. Per evitare eventuali sovrapposizioni dovute alle tolleranze di fabbricazione si è poi fissato il duty cycle al valore di sicurezza di 0,35.

Le strutture del reticolo progettato (sia periodico che aperiodico) sono fori a forma di tronco di cono di altezza 125 nm con angolo di inclinazione di 45° (Figura 159). La scelta dell'altezza del reticolo nasce dall'esigenza di voler confrontare le prestazioni con substrati a morfologia random che nei casi più performanti hanno una distribuzione delle altezze medie fino a circa 125 nm. Inoltre si è valutato di dare alle pareti un'inclinazione (45°) sufficiente a favorire la crescita di materiale semiconduttore di buona qualità evitando la formazione di fratture e zone a bassa densità che tipicamente si manifestano con pareti troppo ripide. Con questo accorgimento è possibile ottenere celle solari con buone proprietà elettriche. La scelta del

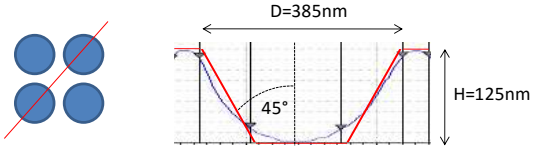


Figura 159. Profilo in sezione del texture progettato per entrambe le tipologie di reticolo

periodo, infine, è legata allo spessore dello strato attivo di silicio impiegato nella cella. Infatti precedenti studi mostrano che dato un reticolo periodico bidimensionale, per ogni periodo esiste uno spessore di silicio ottimale che permette di massimizzare il rapporto tra assorbimento della cella testurizzata e della cella con substrato flat. Detto in altri termini, per un dato spessore del materiale attivo (il silicio microcristallino in questo caso) esiste un periodo tale da accoppiare al suo interno in modo efficace il maggior numero di modi e quindi intrappolare più luce. In aggiunta gli spessori degli altri strati concorrono insieme a quello del silicio a determinare le caratteristiche della cella realizzata. Per gli spessori dei vari layer abbiamo scelto dei valori tipici per celle con strato assorbitore ridotto, di particolare interesse nell'ottica di limitare tempi e costi di produzione: 800 nm per il contatto superiore di ZnO, 600 nm per il silicio microcristallino, 80 nm per il buffer di ZnO tra silicio e contatto posteriore in argento, quest'ultimo spesso circa 200 nm.

Simulazioni effettuate sul modello di cella solare con lo strato di silicio microcristallino dello spessore di 600 nm e duty cycle pari a 0,35 al variare del periodo, mostrano il massimo dell'enhancement per un periodo pari a 550 nm. Sulla base di queste simulazioni sia per la struttura periodica che aperiodica è stato scelto un periodo di 550 nm.

Fabbricazione e caratterizzazione

Per quanto riguarda la validazione sperimentale, condotta in ENEA, si è stabilito di realizzare i substrati nanostrutturati mediante Nano-Imprint Lithography (NIL), utilizzando il sistema per UV-NIL EVG620-NT della EV Group installato di recente nei laboratori del centro di Portici. Questa tecnica consente di superare le criticità emerse per l'approccio di scrittura via Focused Ion Beam (FIB) testato nelle precedenti annualità in quanto adatto alla realizzazione di strutturazioni su larga area. In questo approccio i substrati vengono patternati per mezzo di stampi plastici (working stamps con pattern negativo) ottenuti a partire da un master strutturato in superficie con le geometrie individuate da progetto. La realizzazione del master di partenza, fabbricato con tecniche litografiche in deep UV da ditte specializzate, è stata commissionata all'azienda danese NIL Technology, fornitrice della EV Group. In Figura 160 è mostrato il layout del wafer in fused silica ordinato, con diverse aree patternate nelle due tipologie periodica e aperiodica (si notino in particolare le dimensioni delle aree patternate sulla scala del centimetro, difficilmente realizzabili con tecniche di strutturazione alternative). La NIL Technology si è trovata ad affrontare diversi problemi tecnici, soprattutto nella fase preliminare di realizzazione del reticolo per il deep UV.

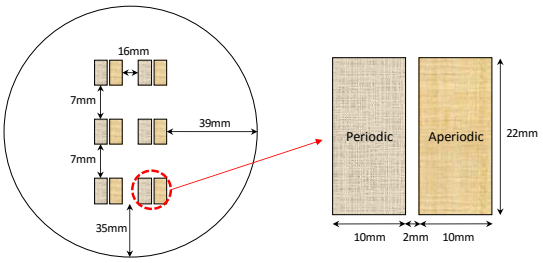


Figura 160. Schema del master (150 mm wafer di fused silica) commissionato alla NIL Technology

In Figura 161 sono riportate delle immagini SEM rappresentative d'ispezione da parte della NIL Technology sul prodotto finito. Dalle immagini SEM e da analisi AFM si evince una buona aderenza al progetto fornito.

In attesa della realizzazione del master, l'attività sperimentale è stata rivolta alla messa a punto del processo di fabbricazione via NIL e relativa caratterizzazione morfologica di substrati di vetro con micro-strutturazione casuale, che costituiscono il riferimento ultimo rispetto al quale confrontare le strutture con pattern appositamente progettato.

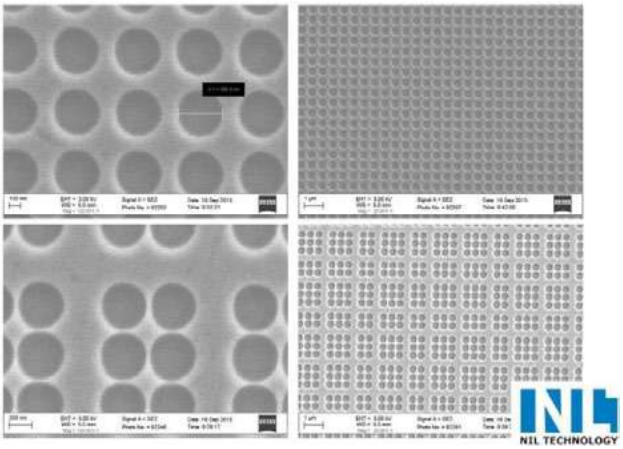


Figura 161. Immagini SEM rappresentative a fine lavorazione del master in regioni con pattern periodico (riga superiore) e aperiodico (riga inferiore)

In questa fase si è utilizzato come master un campione di vetro ricoperto da un film di ZnO rugoso con morfologia random ottenuta da etching chimico. Innanzitutto è stato realizzato il working stamp intermedio a pattern negativo seguendo i passi di processo schematizzati in Figura 162a Si è poi passati alla fase di realizzazione del pattern sul substrato finale utilizzando il working stamp come illustrato schematicamente in Figura 162b, con messa a punto di vari parametri nel workflow di processo, come velocità di spinnaggio del resist, tempi, pressione durante l'esposizione agli UV, etc.

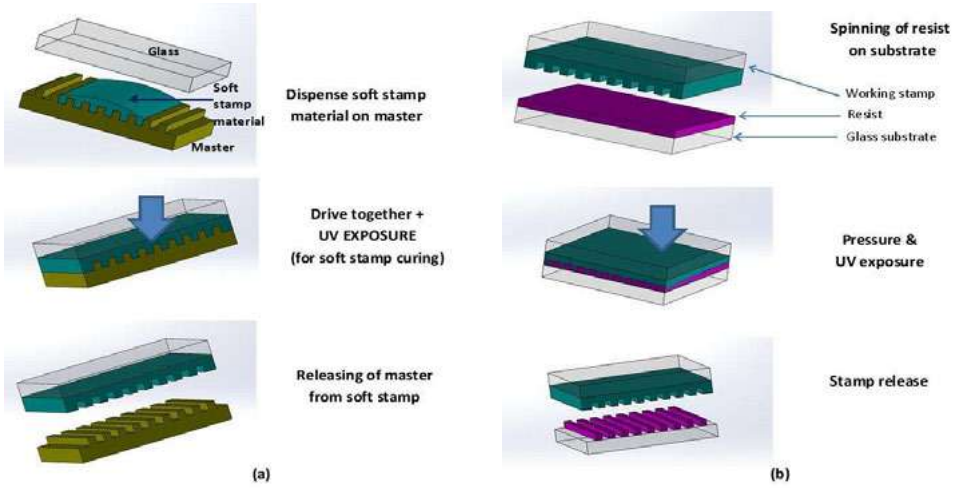


Figura 162. Schema di processo delle due fasi della NIL: (a) realizzazione dello stampo plastico (working stamp) a partire dal master originario e (b) realizzazione del pattern sul substrato finale utilizzando il working stamp

Particolare attenzione è stata rivolta all'analisi morfologica delle strutture realizzate rispetto al master di partenza in modo da valutare già in questa fase quella che sarà l'aderenza della realizzazione sperimentale alle strutture progettate. Le strutture sono state analizzate mediante il microscopio a forza atomica (AFM) disponibile presso il laboratorio di Optoelettronica dell'Università del Sannio. Le immagini topografiche delle superfici del master e della replica ottenuta dal processo NIL sono riportate rispettivamente in Figura 163 e 164 per aree di 20x20 μm^2. Qualitativamente si può apprezzare un buon livello di similitudine per la rugosità delle due superfici. Per un confronto quantitativo la rugosità è stata caratterizzata da un punto di vista statistico ed essenzialmente si è osservata una riduzione dell'altezza media del 5% circa. Tali variazioni possono essere considerate accettabili per le tolleranze in gioco.

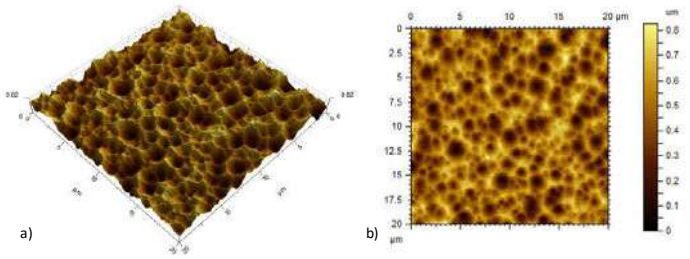


Figura 163. Caratterizzazione morfologica del master di partenza: topografia 3D della superficie (a) per un'area di 20x20μm^2 con vista superiore 2D (b)

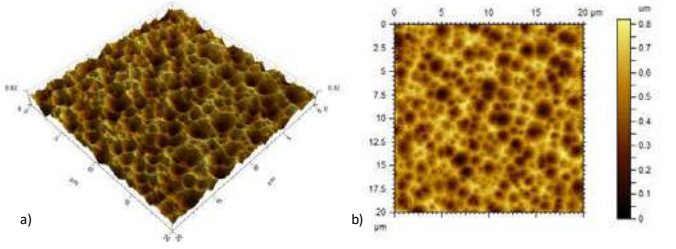


Figura 164. Caratterizzazione morfologica della replica ottenuta via NIL: topografia 3D della superficie (a) per un'area di 20x20μm^2 con vista superiore 2D (b)

Su tali substrati sono state fabbricate delle celle solari a film sottile di silicio. Questo test costituisce uno studio di fattibilità e al contempo fornisce il riferimento più adatto di architettura random di cella da confrontare con le architetture a pattern periodico e aperiodico. In questo modo, infatti, si mettono a confronto celle solari realizzate in ogni caso su vetri che hanno subito lo stesso processo di strutturazione e che fanno uso di uno stesso TCO frontale. Si è dunque sicuri di avere la geometria del pattern come unica variabile dell'esperimento.

La realizzazione e la caratterizzazione funzionale delle celle è stata effettuata in ENEA. Sul singolo substrato sono stati realizzati diversi dispositivi e si è osservata un'ottima uniformità delle prestazioni, a garanzia che il processo NIL messo a punto in ENEA replica la strutturazione in modo omogeneo. La tensione di circuito aperto delle celle è risultata pari a ~ 525 mV, valore prossimo allo stato dell'arte, e si è osservata una bassa resistenza serie (intorno a 2 Ω) che indica proprietà ottimali dello ZnO e dell'interfaccia frontale ZnO/p per nulla affette dall'inserimento sul vetro dello strato di polimero necessario per la realizzazione della testurizzazione. La Figura 165 mostra l'efficienza quantica esterna di una cella su substrato testurizzato rispetto al riferimento codepositato su vetro flat.

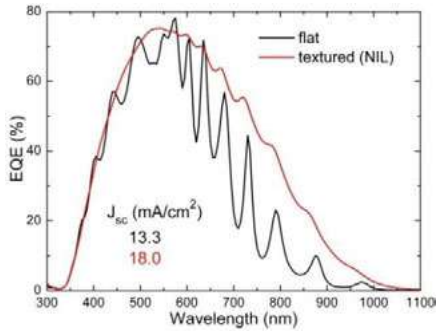


Figura 165. Efficienza quantica esterna di celle solari p-i-n a film sottile di silicio microcristallino di spessori identici realizzate su substrato flat (curva nera) e su substrato rugoso a morfologia random fabbricato via NIL (curva rossa)

Il grosso guadagno ad alta lunghezza d'onda e lo smussamento delle frange di interferenza rispetto al caso flat sono chiaro indice dell'adeguatezza della testurizzazione ottenuta via NIL, che globalmente comporta un guadagno di densità di corrente di corto circuito pari a 4,7 mA/cm^2.

Sulla base dei buoni risultati ottenuti, una volta disponibile il master realizzato da NIL Technology, verrà ripetuta la stessa procedura messa a punto in questa fase, allo scopo di validare il progetto delle strutture periodica e aperiodica e valutare inoltre la possibilità di superare l'enhancement ottenibile con morfologie random.

In conclusione si può affermare che il lavoro svolto è pienamente in linea con le previsioni iniziali. Sono stati messi a punto trattamenti di testurizzazione random di vetri utilizzando il Reactive Ion Etching e mediante attacchi chimici. I risultati ottenuti hanno mostrato che tali trattamenti sono efficaci ai fini del miglioramento complessivo delle prestazioni degli ossidi trasparenti e conduttivi. Substrati di vetro testurizzati possono essere utilmente impiegati per ottenere elevato confinamento ottico in dispositivi fotovoltaici. I processi di testurizzazione sviluppati esibiscono, rispetto alle procedure attualmente in uso, caratteristiche di semplicità realizzativa e, al contempo, di economicità del processo complessivo che li rende interessanti per applicazioni industriali.

Per quanto riguarda i back-reflector con pattern periodico e aperiodico, è stata completata la progettazione di strutture bidimensionali adatte a celle sottili. Al contempo è stato validato e messo a punto il processo sperimentale di strutturazione mediante Nano-Imprint Lithography, che consente di operare su aree di dimensioni idonee per l'applicazione fotovoltaica. Per completare la fase di validazione delle strutture progettate si è in attesa della fornitura del master ordinato alla NIL Technology, slittata per problemi tecnici dell'azienda. Si sottolinea che data la disponibilità del sistema NIL sarà sicuramente interessante estendere in futuro questo studio ad altre tipologie di celle solari.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

L'attività di diffusione è stata svolta attraverso la presentazione dei risultati in convegni e congressi, tramite pubblicazioni su riviste internazionali e tramite l'organizzazione di un workshop presso la Sede dell'ENEA di Roma. Tutte queste azioni hanno consentito di dare visibilità ai risultati ottenuti verso un'ampia platea, di aprire un confronto con gli altri gruppi di ricerca del settore, fondamentale per il progresso delle attività di ricerca, e di avviare un dialogo sempre più stretto con l'Industria nazionale di riferimento. Inoltre è stata garantita la partecipazione italiana all'Implementing Agreement "Photovoltaic Power System" della IEA in modo da rendere

disponibili e pubblici i risultati degli studi condotti in questo ambito. Le attività sintetizzate in questo paragrafo sono descritte in maniera approfondita nel rapporto RdS/PAR2014/012.

Workshop "Energia elettrica da fonte solare"

Il workshop si è svolto il 27 maggio 2015 presso la Sede ENEA di Roma. La scelta della sede per il Convegno è stata fatta in modo da rendere possibile la partecipazione ad un'ampia platea. L'idea infatti era quella di costruire un evento fruibile per un ampio pubblico costituito magari da politici, tecnici e semplici cittadini. ENEA ha curato interamente l'organizzazione del workshop ed ha aperto il convegno presentando i risultati raggiunti nell'ambito dell'Accordo di Programma sul tema del fotovoltaico e del solare termodinamico. Partendo dalla presentazione di questi risultati, il convegno ha aperto un confronto tra la ricerca svolta sul fotovoltaico in ENEA e le aspettative delle realtà produttive nazionali del settore. Il Convegno ha avuto una grande rilevanza sia in termini di partecipanti ai lavori (> 100) che in termini di rassegna stampa. L'evento ha consentito di fornire alla platea intervenuta un quadro completo di quanto in ENEA viene svolto sul FV nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico e delle prospettive del settore.

Attività svolte nel "Photovoltaic Power Systems Programme" della IEA

Nell'ambito delle linee di ricerca previste dal Programma PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme) della IEA, l'ENEA è inserita in un gruppo di lavoro che svolge attività sul tema del "High Penetration of PV Systems in Electricity Grids". Questa linea di attività si pone come obiettivo principale la promozione e l'incremento dell'uso della fonte fotovoltaica nelle reti elettriche, tenendo conto delle problematiche tecniche legate alla penetrazione di tali generatori nelle reti elettriche di trasmissione e distribuzione, inclusi i servizi ancillari e di rete da loro richiesti. In particolare, partendo dalla consapevolezza dei limiti tecnologici e delle attuali problematiche, il gruppo di lavoro intende studiare e proporre soluzioni tese a favorire la penetrazione ed integrazione in rete di un elevato numero di generatori fotovoltaici, considerando anche gli scenari introdotti con il paradigma delle Smart Grid.

A riguardo l'ENEA ha partecipato all'8th Experts Meeting and Workshop tenutosi a Tokyo (Giappone), in occasione della conferenza WCPEC 2015 "6th World Conference on Photovoltaic Energy Convertion", contribuendo ai lavori con le attività il cui dettaglio è riportato nel rapporto esteso.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Roma "Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione Elettronica e Telecomunicazioni

"Sviluppo di strati sottili di ossido trasparente e conduttivo per applicazione alle celle ad eterogiunzione silicio amorfo / silicio cristallino"
L'attività ha previsto la realizzazione e caratterizzazione di strati sottili di *TCO* per celle ad eterogiunzione silicio amorfo/silicio cristallino al fine di migliorare i contatti fra semiconduttore amorfo e TCO. Sono stati valutati diversi regimi di deposizione di film di ossido di zinco per sputtering al fine di ottimizzare le proprietà del materiale e valutare eventuali effetti di danneggiamento della eterogiunzione per effetto del processo di deposizione stesso.

Università degli Studi di Roma Sapienza, Dipartimento di Fisica

"Caratterizzazione ottica di film sottili per dispositivi fotovoltaici basati suCZTS"
Il lavoro ha avuto l'obiettivo di correlare il grado di disordine cationico nel CZTS alle sue proprietà ottiche per sviluppare un metodo che consentisse di quantificare questo disordine e valutarne l'effetto sulle proprietà optoelettroniche del materiale e sulle prestazioni delle celle solari. Lo studio ha previsto un'approfondita analisi delle proprietà ottiche dei materiali mediante misure spettrofotometriche, di spettroscopia Raman e di fotoluminescenza.

Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

"Crescita e caratterizzazione chimica, morfologica e strutturale di film sottili per celle fotovoltaiche a base di semiconduttori Cu_2-II-IV-VI_4"
L'attività si è sviluppata seguendo due linee:

- Sviluppo di processo di deposizione del CZTS da fase liquida. In particolare in questa annualità è proseguito il lavoro di ottimizzazione del processo di dispersione di nanoparticelle di CZTS e sul loro uso per la crescita di film compatti idonei alla realizzazione di dispositivi fotovoltaici in CZTS.

- Caratterizzazione strutturale tramite XRD nell'ambito della quale sono state sviluppate appropriate metodiche per l'analisi dei profili XRD di film di CZTS che hanno permesso, oltre alla tipica analisi strutturale, un'analisi quantitativa delle fasi spurie talvolta presenti nel materiale.

Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali e centro MIBSOLAR

" Sviluppo di strati buffer per celle a base di CZTS"
Il lavoro è consistito nell'individuare, depositare e caratterizzare film di sottili materiali alternativi al solfuro di cadmio (CdS) che potessero svolgere il ruolo di buffer layer in una cella in CZTS. Sono stati studiati tre possibili materiali candidati: solfuro di indio (In_2S_3), solfuro di zinco (ZnS) e ossido misto di zinco e stagno (Zn_2SnO_4). I film sono stati depositati e caratterizzati al fine di individuare le relazioni tra parametri di processo e proprietà di trasmittanza, spessore e omogeneità dei film. I risultati ottenuti relativi ai buffer layer alternativi sono stati confrontati con le proprietà dei film di CdS depositati per bagno chimico. Inoltre tali strati buffer alternativi sono stati testati preliminarmente in celle a film sottile standard in CIGS.

Università degli Studi di Napoli Federico I", Dipartimento di Chimica

"Sviluppo di copolimeri a blocchi per la realizzazione di ossidi metallici di tipo n"
L'attività ha previsto lo studio di strati trasportatori di elettroni innovativi per celle solari a base di perovskite. La strategia perseguita consiste nell'utilizzo di copolimeri a blocchi nanostrutturati, per l'inclusione selettiva in domini nanometrici di nanoparticelle di ossido di zinco, secondo cammini percolativi uniformi e continui. In particolare si è utilizzato un copolimero di-blocco polistirene-*b*-polimetilmetacrilato (PS-PMMA), caratterizzato dalla medesima lunghezza dei blocchi PS e PMMA in grado di dar luogo ad una morfologia lamellare, in cui domini lamellari di PS si alternano a domini lamellari di PMMA, entrambi di spessore nanometrico.

Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale

" *Sviluppo di metodologie chimiche per la modulazione della morfologia superficiale di substrati vetrosi"*
I temi sviluppati hanno riguardato l'ottimizzazione dei processi di testurizzazione di substrati vetrosi mediante attacco chimico con l'obiettivo di produrre un efficace intrappolamento della radiazione solare in celle a film sottile. La procedura prevede l'attacco chimico di substrati vetrosi mediante soluzioni acquose di acido fluoridrico e il principio chimico su cui si fonda è la reazione tra il biossido di silicio, il principale costituente chimico del substrato vetroso, e l'acido fluoridrico. Sono esplorate diverse modalità di attacco al fine di definire la strada più promettente.

Università degli Studi del Sannio, Dipartimento di Ingegneria - Divisione di Optoelettronica

" *Cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare*".
L'attività di ricerca si è incentrata sulla progettazione e validazione sperimentale di strati riflettori posteriori, costituiti da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici in configurazione sia periodica che quasi periodica, finalizzati alla definizione di nuove architetture di celle solari che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare nelle celle solari a film sottile. Al fine di dimensionare correttamente il pattern bidimensionale aperiodico ed il suo omologo periodico, si è fatto ricorso ad un approccio semi-analitico. Gli studi di ottimizzazione dei back-reflector effettuati negli anni precedenti hanno evidenziato infatti come l'approccio numerico accurato richieda elevate risorse computazionali con tempi di calcolo molto elevati. E' stata quindi effettuata un analisi basata sulle trasformate di Fourier spaziali dei pattern presi in considerazione.

Energia elettrica da fonte solare
Solare termodinamico

Le attività del progetto si inquadrano nell'ambito più generale dello sviluppo e diffusione dell'uso delle fonti rinnovabili di energia e si riferiscono in particolare alla produzione di energia elettrica da solare mediante tecnologia a concentrazione ad alta temperatura, "Solare Termodinamico".

Questi impianti utilizzano opportuni sistemi ottici (concentratori), per raccogliere la radiazione solare e inviarla su un componente (ricevitore), dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido, può essere eventualmente accumulato o integrato con altra fonte esterna di energia (es. gas o biomassa), ed impiegato per la produzione di energia elettrica o come calore ad alta temperatura in processi industriali. A seconda della forma dei concentratori, possiamo distinguere tre diversi tipologie di impianti: a disco parabolico, a torre centrale e a collettore lineare parabolici o Fresnel.

Allo stato attuale la tecnologia più diffusa è quella dei collettori parabolici lineari. In questo ambito l'ENEA ha sviluppato una propria originale linea tecnologica ad alta temperatura caratterizzata dall'utilizzo di sali fusi come fluido di processo e come mezzo di accumulo termico. La collaborazione con l'industria nazionale ha permesso di sviluppare una filiera industriale, portando, tra l'altro, alla realizzazione, da parte di ENEL, dell'impianto "Archimede": 5 MW integrato con un ciclo combinato a gas in Sicilia (Priolo Gargallo SR).

La ricerca ha come obiettivo principale la riduzione dei costi per rendere questi impianti sempre più competitivi rispetto alla produzione elettrica con i tradizionali combustibili fossili. Questo può essere realizzato sia attraverso il miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi che con la semplificazione impiantistica ed il miglioramento delle procedure di gestione e manutenzione.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'ENEA nel corso dell'Accordo di Programma 2012-2014, ha focalizzato l'attività di ricerca sul miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi e sullo sviluppo di soluzioni tecnologiche innovative con l'obiettivo di rendere il solare termodinamico sempre più competitivo rispetto alle altre fonti di energia. Particolare attenzione è stata posta a due componenti chiave di un impianto solare a concentrazione il tubo ricevitore ed il sistemi di accumulo termico.

Il tubo ricevitore, elemento fondamentale di un impianto solare termodinamico, svolge la funzione di assorbimento della radiazione solare concentrata e trasferimento del calore al fluido di processo. In particolare esso deve assorbire la maggiore quantità possibile di radiazione solare su di esso concentrata e, allo stesso tempo, deve disperdere verso l'ambiente esterno la minore quantità possibile del calore immagazzinato. I rivestimenti solari dei tubi ricevitori sono costituiti da stratificazioni di film sottili i cui costituenti sono materiali metallici e ceramici (cermet) prodotti, generalmente, con tecniche di sputtering. Essi devono operare a temperature di esercizio che possono essere medio-basse (da 300 a 400°C) o medio-alte (≥ 550°C). Di conseguenza, risulta fondamentale che essi abbiano alta stabilità fisica e chimico-strutturale alle temperature di impiego. Generalmente, operano in assenza di atmosfera (tubo ricevitore evacuato) sia per limitare la dispersione del calore captato (eliminazione della componente di scambio convettivo) sia per proteggere il rivestimento solare da processi di ossidazione dei suoi costituenti metallici. Tuttavia, per impieghi a medio-basse temperature, la soluzione del tubo non evacuato può essere molto attrattiva per un deciso abbattimento del costo del ricevitore valutando attentamente la riduzione dell'efficienza foto-termica a causa delle perdite convettive.

Negli impianti solari termodinamici, per sopperire alla naturale variabilità della fonte primaria di energia, è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico che consente di migliorare il funzionamento dell'impianto, aumentare non solo la sua capacità operativa, ma anche di dispacciamento, per una migliore integrazione con la rete elettrica. Sono state studiate soluzioni più compatte a calore sensibile e/o latente che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte o un materiale a cambiamento di fase; tale sistema è particolarmente adatto per impianti di piccola/media taglia a media temperatura, ma è estrapolabile anche ad impianti di grande taglia ad alta temperatura.

Sono stati presi in esame alcuni aspetti della tecnologia come la raccolta e assorbimento della radiazione solare e lo stoccaggio dell'energia termica, inoltre l'attenzione è stata posta anche ai sistemi di piccola e media taglia per la produzione combinata di energia elettrica e termica, eventualmente ibridizzati con un'altra fonte energetica. In particolare l'attività è stata finalizzata al:

- miglioramento delle prestazioni del tubo ricevitore con lo sviluppo di nuovi coating solari caratterizzati da una alta efficienza di conversione foto-termica attraverso la sostituzione della consolidata tecnologia del coating a base di strati "cermet" del tipo "graded" con la più innovativa tecnologia di filtri ottici del tipo interferenziali a partire da stratificazioni di film sottili ceramici e metallici;
- studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di differenti configurazioni impiantistiche per migliorare l'efficienza e produttività e per ridurre i costi di realizzazione e di esercizio. In particolare è stato preso in esame l'utilizzo di differenti fluidi termici e lo sviluppo di nuovi sistemi di accumulo termico;
- sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia. E' prevista la messa a punto di un sistema cogenerativo innovativo con microturbina a vapore.

Le attività del progetto si articolano in tre obiettivi intermedi, corrispondenti a diverse linee di ricerca, più un obiettivo specifico relativo ad attività di comunicazione e diffusione dei risultati, come riportato nel seguito:

a. Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità
b. Studio di sistemi alternativi di accumulo termico
c. Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia
d. Comunicazione e diffusione dei risultati, supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità

Le attività di ricerca sono relative allo studio e sviluppo di materiali, processi e tecniche di fabbricazione d'innovativi coating solari per tubi ricevitori utilizzando la tecnologia dei "filtri ottici di tipo interferenziale". Nell'ambito delle attività già espletate assume particolare rilievo la realizzazione i un impianto prototipale di sputtering dell'ENEA sul quale è ora possibile condurre processi di deposizione di tipo IBAD (Ion Beam Assisted Deposition). La nuova tecnologia dovrebbe consentire di migliorare non solo le prestazioni fototermiche del coating (alta assorbanza e bassa emissività), ma anche la durabilità ed affidabilità del componente.

a.1 Ottimizzazione di strati sottili metallici adatti alla realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale

L'obiettivo dell'attività era di realizzare film metallici molto sottili, dell'ordine di qualche nanometro, da impiegare in filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico in modo da migliorare le prestazione foto-termiche dei tubi ricevitori di impianti solari termodinamici.

Per la fabbricazione dei materiali è stato adoperato, prevalentemente, un impianto prototipale di sputtering installato nella hall tecnologica del C.R. ENEA di Portici (NA) e che era stato modificato ed attrezzato, nell'ambito del PAR 2012, con un cannone ionico Kaufman & Robinson (KRI, mod. EH200/MHC1000).

Il primo metallo depositato in forma di film molto sottile è stato l'argento. A causa della sua alta riflettanza, l'argento non può essere utilizzato come primo strato metallico dei filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico ma può essere usato come strato sottile più interno al filtro interferenziale per aiutare ad alzare la riflettanza nella regione dell'IR.

La stima corretta dei parametri ottici dei film sottili di argento ha richiesto la copertura di questi film con uno strato di nitruro di alluminio (AlN) in modo da evitare che l'ossigeno e l'acqua o altri vapori presenti nell'atmosfera penetrassero nel film degradandone il comportamento metallico.

La realizzazione di film metallici d'argento in forma sottile con proprietà metalliche simili a quelle dei film spessi è stata ottenuta lavorando principalmente sui parametri del processo di deposizione, quali la pressione, la potenza, la velocità di rotazione e di scansione del substrato. In particolare, si è osservato che l'argento per crescere in forma di film sottile con buone proprietà metalliche necessitava di processi di deposizione molto energetici. Il modo migliore per avere processi energetici era di intervenire sulla pressione di deposizione che doveva essere la più bassa possibile. Con l'impianto in dotazione si è riusciti ad abbassare la pressione ad 1 µbar e ad alzare la tensione di catodo fino a 570 V ottenendo un film sottile d'argento di spessore 10 nm con proprietà metalliche addirittura migliori di quelle di un film spesso d'argento (Figura 166). A titolo di esempio, nella Tabella 56 sono

riportati i parametri di processo utilizzati per realizzare la struttura a doppio strato Ag/AlN con le migliori proprietà metalliche del film sottile d'Ag (struttura identificata dalla sigla "AgAlN_02").

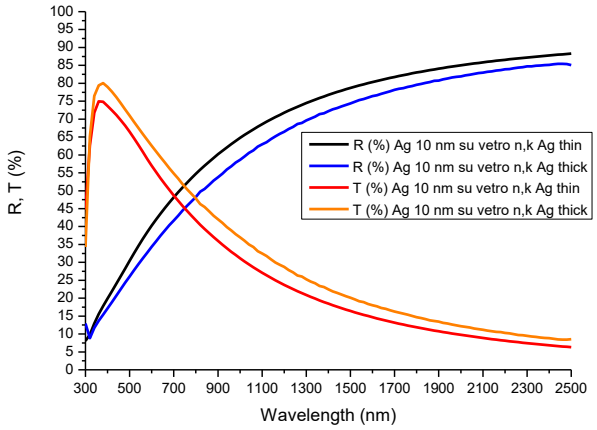


Figura 166. Riflettanza e trasmittanza di un film di 10 nm di Ag su un substrato di vetro calcolate con gli n e k del film d'argento della struttura AgAlN_02 e con gli n e k del campione di riferimento di Ag spesso

Tabella 56. Parametri di processo per la realizzazione della struttura AgAlN_02

Materiale	Flusso di argon (sccm)	Flusso di azoto (sccm)	Pressione (µbar)	Potenza (Watt)	$V_{traslazione}$ (mm/min)	$V_{rotazione}$ (giri/min)	Numero oscillazioni
Ag	50	-	1	800	2000	30	1
AlN	200	60	10	3000	3000	60	60

Il tentativo di dimezzare lo spessore del film sottile d'argento non ha dato buoni risultati, infatti, con molta probabilità, in questo caso non si era ancora raggiunta la formazione di una struttura continua per cui la successiva deposizione di AlN andava a riempire i vuoti lasciati dalla deposizione dell'argento. Il risultato finale erano strati di materiale composito del tipo Ag-AlN i cui parametri ottici erano molto diversi da quelli dell'argento.

L'ultimo film sottile di Ag è stato depositato con uno spessore atteso di 9 nm. Questo film presenta ancora delle eccellenti proprietà metalliche.

L'attività di ricerca ha anche mostrato che la temperatura del substrato è un parametro molto importante da controllare durante la deposizione dell'argento in forma di film sottile. Si è osservato che all'aumentare della temperatura il film sottile tendeva a peggiorare le sue proprietà metalliche. Questo perché la temperatura alta del substrato favoriva la crescita di pochi grani cristallini di grandi dimensioni, ritardando la coalescenza dei grani stessi e, quindi, la formazione di una struttura continua di spessore uniforme. In pratica, è molto probabile che, durante la deposizione dell'argento, non si era ancora raggiunta la formazione di una struttura continua di spessore uniforme per cui, la successiva deposizione dell'AlN dava luogo alla formazione di uno strato d'interfaccia di spessore non trascurabile del tipo Ag-AlN che degradava le prestazioni ottiche del filtro interferometrico multistrato ceramico-metallico. Viceversa a bassa temperatura, la crescita avveniva attraverso la formazione di grani cristallini molto numerosi e di piccole dimensioni, e questa modalità di crescita favoriva la coalescenza dei grani cristallini e, quindi, la formazione di strutture continue di spessori uniformi minori rispetto a quelle realizzabili nel caso di substrati caldi.

I risultati della campagna sperimentale condotta sull'argento hanno confermato che, per determinati materiali, la densificazione di un film metallico molto sottile può essere favorita operando a pressioni di sputtering decisamente più basse rispetto a quelle comunemente impiegate. Risultava, pertanto, di assoluto interesse (anche nell'ottica di ulteriori sviluppi sulla suddetta tematica nel successivo Piano Triennale 2015-2017) esplorare la possibilità di sperimentare tecniche di deposizione di tipo "low-pressure sputtering" propriamente dette ($p < 1$ µbar) che necessitano, in primis, di particolari catodi non facilmente reperibili sul mercato. Con questo scopo è stato effettuato uno studio della letteratura tecnica e scientifica inerente le soluzioni tecnologiche efficaci per la conduzione di processi di sputtering a bassa pressione.

E' emerso che le soluzioni disponibili per conduzione di processi del tipo "low-pressure sputtering" si basano, fondamentalmente, su un più efficace confinamento del plasma e/o su una ionizzazione addizionale del gas di sputtering ("Enhanced Ionization").

Il confinamento del plasma può essere controllato ottimizzando la distribuzione del campo magnetico sulla superficie del target installato sul magnetron; la soluzione tecnologica che realizza efficacemente quanto sopra è costituita dai catodi "Unbalanced Magnetron di Tipo 2" nei quali i magneti disposti sul perimetro esterno del catodo sono rafforzati rispetto al polo centrale: questa costruzione del magnetron consente di operare a livelli di pressione ben al di sotto di 1 µbar mantenendo alte correnti di scarica. Il confinamento del plasma di un sistema magnetron sputtering può essere controllato, oltre che dalla forma delle linee del campo magnetico, anche dall'intensità del campo B al di sopra della superficie del target: catodi con magneti rafforzati (magnetron "High Strength") favoriscono la ionizzazione delle specie presenti in plasma con produzione di un sufficiente numero di elettroni secondari indispensabili per sostenere e stabilizzare la scarica dello sputtering anche in condizioni di bassa pressione.

Per diminuire la pressione minima di estinzione di un plasma di sputtering si può intervenire con sistemi, esterni al magnetron, che forniscano un surplus di ionizzazione del gas di sputtering tramite una scarica ausiliaria che ha l'effetto di intensificare/densificare e stabilizzare il plasma del magnetron; fra le soluzioni tecnologiche con cui viene realizzata la strategia dell'Enhanced Ionization vi è l'utilizzo di un cannone elettronico di tipo HCES (hollow cathode electron source) come fonte di elettroni secondari.

Sulla base dello studio che ha consentito di individuare le soluzioni tecnologiche sinteticamente riportate, si è provveduto alla stesura delle specifiche di massima di un catodo magnetron per processi di deposizione di tipo "low-pressure sputtering" idoneo per essere installato ed efficacemente esercìto sull'impianto prototipale di sputtering dell'ENEA impiegato per le attività di progetto.

La campagna sperimentale, espletata nell'ambito del subtask a.1, è proseguita con la deposizione di un secondo metallo, il molibdeno, in forma di film molto sottile. Il molibdeno potenzialmente potrebbe essere un buon metallo per la realizzazione dei filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico poiché ha una buona riflettanza nell'infrarosso, ma allo stesso tempo ha una riflettanza non eccessivamente alta nel visibile e nel vicino IR favorendo così l'assorbimento della radiazione solare in quest'intervallo spettrale.

Sulla base dell'esperienza acquisita con i film sottili di argento, anche la stima dei parametri ottici dei film sottili di molibdeno è stata fatta ricoprendo questi film con uno strato di AlN in modo da evitare che l'ossigeno e l'acqua o altri vapori presenti nell'atmosfera penetrassero nel film degradandone il comportamento metallico.

La realizzazione di film sottili metallici di molibdeno ha richiesto un lavoro approfondito di sperimentazione per la messa a punto dei parametri di processo. In primo luogo si è visto che, a differenza dell'argento, il molibdeno migliorava le proprietà ottiche quando veniva depositato su un substrato caldo. Pertanto, ogni qualvolta bisognava depositarlo in forma di film sottile, la struttura sottostante veniva sottoposta a un plasma elettronico molto energetico. Si è inoltre osservato che i film sottili di molibdeno non necessitavano per crescere di processi di deposizione molto energetici anzi, all'aumentare dell'energia, le proprietà metalliche del molibdeno peggioravano. In pratica, si è dimostrato che processi di media energia erano sufficienti per realizzare film sottili di molibdeno con buone proprietà metalliche. Questi processi sono stati condotti a pressione di 2 µbar e con una tensione applicata al catodo di 360 V. Due film a differenti spessori sono stati depositati, il primo di spessore 13 nm il secondo di spessore 7 nm, ed entrambi hanno mostrato buone proprietà metalliche.

Il tentativo di ridurre ulteriormente lo spessore del film sottile di molibdeno non ha dato buoni risultati, infatti, con molta probabilità, nel caso di spessori inferiori a 7 nm non si era ancora raggiunta la formazione di una struttura continua per cui la successiva deposizione di AlN andava a riempire i vuoti lasciati dalla deposizione del molibdeno. Il risultato finale erano strati di materiale composito del tipo Mo-AlN i cui parametri ottici erano molto diversi da quelli del molibdeno.

L'attività sperimentale ha anche mostrato che le proprietà metalliche dei film sottili di molibdeno si degradavano una volta che questi film venivano depositati sullo strato ceramico di AlN. Si è ipotizzato che la degradazione fosse dovuta all'interazione degli atomi di molibdeno con gli atomi di azoto dello strato ceramico di AlN. In pratica, essendo il molibdeno molto meno resistente alla nitrurizzazione dell'argento, l'eccesso di azoto all'interfaccia tra la ceramica e il metallo poteva causare il degrado delle proprietà metalliche dei film sottili di molibdeno. Per ridurre l'eccesso di azoto all'interfaccia, è stato innanzitutto depositato l'AlN nella sua forma stechiometrica. Questo primo accorgimento non ha dato i risultati sperati, per cui si è abbassato ulteriormente il contenuto d'azoto all'interfaccia depositando sullo strato di AlN stechiometrico uno strato molto sottile di AlN sub-stechiometrico, cioè povero di azoto. Quest'accorgimento ha contribuito a migliorare le proprietà metalliche dei film sottili. Facendo seguire alla deposizione dello strato di AlN sub-stechiometrico un plasma ionico molto energetico dello stesso strato, si sono ottenute le migliori proprietà metalliche dei film sottili di molibdeno, addirittura migliori di quelle dei film di molibdeno direttamente depositati sul substrato di vetro. E' ipotizzabile che il plasma ionico fosse capace di impoverire ulteriormente l'interfaccia tra la ceramica e il metallo di atomo di

azoto. In verità, bisogna anche dire che tutti gli accorgimenti adottati per migliorare le proprietà metalliche dei film sottili di molibdeno determinavano anche una modifica strutturale dello strato su cui depositare il molibdeno che poteva contribuire a migliorare le proprietà metalliche del film stesso.

A titolo di esempio, in Tabella 57 sono riportati i parametri di processo utilizzati per realizzare la struttura (indentificata dalla sigla "AlNMoAlN_09") con il film di molibdeno di spessore 7 nm; per i motivi precedentemente esposti, prima di depositare lo strato sottile di molibdeno, è stato effettuato un plasma ionico e di seguito un plasma elettronico. La Figura 167 mostra come le proprietà metalliche del film sottile di molibdeno della struttura "AlNMoAlN_09" risultino migliori di quelle del campione di riferimento di molibdeno spesso.

Tabella 57. Parametri di processo per realizzare la struttura AlNMoAlN_09

Materiale	Flusso di argon (sccm)	Intensità riga spettrale dell'azoto (%)	Pressione (µbar)	Potenza (W)	$V_{traslazione}$ (mm/min)	$V_{rotazione}$ (giri/min)	Numero oscillazioni
AlN	200	25,20	10	3000	1000	60	6
AlN	200	12,83	10	3000	3000	60	1
Mo	100	-	2	2000	2000	90	1
AlN	200	25,20	10	3000	1000	60	6

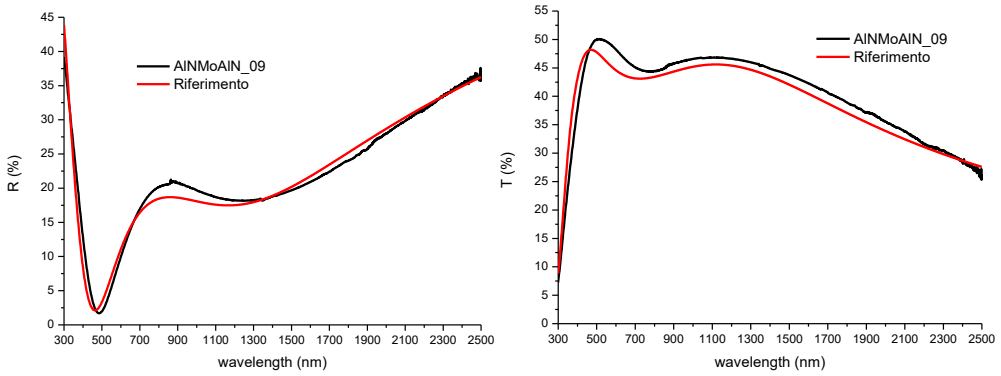


Figura 167. Riflettanza e trasmittanza spettrofotometriche della struttura AlNMoAlN_09 a confronto con la riflettanza e la trasmittanza di riferimento

Si può affermare che i risultati ottenuti, sia per l'argento sia per il molibdeno, sono molto interessanti per il buon comportamento metallico dei materiali realizzati in forma di film sottili. Si può anzi asserire che i materiali depositati hanno eccellenti proprietà metalliche se paragonate con quelle degli omologhi materiali spessi ottenibili mediante processi di sputtering convenzionali.

In conclusione, partendo dal principio fisico-ottico che la chiave di volta per perseguire con successo la realizzazione di filtri solari interferenziali a strati alternati di materiali metallici e ceramici consiste nella fabbricazione di film metallici molto sottili aventi parametri ottici molto prossimi a quelli dei corrispettivi metalli in forma bulk, la mole di lavoro sperimentale testimonia che l'ottimizzazione accurata dei parametri di processo, accoppiata ad alcuni opportuni accorgimenti tecnologici, ha prodotto risultati eccellenti sia su strati sottili di argento (fino allo spessore limite di 9 nm) sia su strati sottili di molibdeno (fino allo spessore limite di 7 nm). Le soluzioni tecnologiche ideate e sperimentate rappresentano sia una "conditio sine qua non" per l'ottenimento di efficaci filtri solari interferenziali sia la base da cui partire per la realizzazione di altre tipologie di filtri interferenziali (ad esempio, vetri basso-emissivi per finestrazione) di grande interesse commerciale.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/110.

a.2 Ottimizzazione, realizzazione e caratterizzazione di filtri solari del tipo interferenziale

L'obiettivo delle attività afferenti al subtask a.2 era quello di realizzare filtri solari interferometrici multistrato ceramico-metallico utilizzando i film metallici sottili di argento e molibdeno messi a punto nell'ambito del subtask a.1.

Per la fabbricazione dei materiali è stato adoperato l'impianto prototipale di sputtering dell'ENEA installato nella hall tecnologica del C.R. di Portici (NA). Il primo filtro solare interferenziale (identificato dalla sigla "ENEA #6L") è stato progettato e realizzato utilizzando come metallo in forma di film sottile il molibdeno e come strati ceramici il nitruro di alluminio e il biossido di silicio. La progettazione ottica di questo filtro è stata effettuata, mediante il

software di simulazione ottica Macleod, imponendo che la curva di riflettanza generata soddisfacesse simultaneamente il requisito di massima assorbanza solare e riflettanza maggiore del 65% a 2500 nm. Il progetto ottico, riportato in Tabella 58, è stato trasformato in una ricetta di deposizione che una volta implementata sull'impianto di sputtering ha consentito di realizzare il filtro solare interferometrico. Il filtro, presentava un'assorbanza solare pari al 93% ed emissività emisferiche del 19,3% a 400 °C e del 22,3% a 580 °C. Nonostante i film sottili di molibdeno avessero proprietà metalliche eccellenti se confrontate con quelle di strati di molibdeno spessi realizzati con processi di sputtering convenzionali, non erano sufficientemente buone per assicurare valori di emissività emisferiche confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con tecnologia cermet. Allo stesso tempo, l'impossibilità di realizzare film sottili di molibdeno con spessori minori di 7 nm con buone proprietà metalliche, non consentiva di realizzare filtri solari interferometrici con assorbanze solari confrontabili con quelle dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.

Tabella 58. Progetto del filtro solare interferenziale ENEA #6L

Strato	Materiale	Spessore (nm)
1	SiO_2	63,69
2	AlN	52,22
3	Mo	7,00
4	AlN	67,20
5	Mo	13,00
6	AlN	89,27
Substrato	acciaio	

Il secondo filtro interferenziale multistrato (identificato dalla sigla "ENEA #8L") è stato progettato e realizzato utilizzando come metalli in forma di film sottile il molibdeno e l'argento, e come strati ceramici il nitruro di alluminio e il biossido di silicio. L'argento è stato inserito nel progetto ottico del filtro solare interferometrico nel tentativo di migliorare la riflettanza del filtro nella regione dell'infrarosso. In questo caso la progettazione ottica è stata effettuata imponendo che la curva di riflettanza generata soddisfacesse simultaneamente il requisito di massima assorbanza solare e riflettanza maggiore del 70% a 2500 nm. Il filtro solare, realizzato in base al progetto ottico riportato in Tabella 59, presentava un'assorbanza solare pari al 92% ed emissività emisferiche del 16,5% a 400°C e del 19,3% a 580°C. Il risultato ottenuto conferma quanto detto in precedenza sulla qualità dei film di molibdeno realizzati con la tecnica dello sputtering. Infatti, anche se l'argento realizzato con la tecnica dello sputtering ha delle proprietà eccellenti anche rispetto all'argento bulk, il comportamento nella regione dell'infrarosso del filtro solare interferometrico dipende essenzialmente dalle proprietà ottiche del primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare. Pertanto, l'argento può migliorare l'emissività emisferica del filtro solare interferometrico ma non in maniera così significativa da renderla paragonabile con quella dei rivestimenti solari realizzati con la tecnologia cermet.

Tabella 59.Progetto del filtro solare interferenziale ENEA #8L

Strato	Materiale	Spessore (nm)
1	SiO_2	59,96
2	AlN	49,71
3	Mo	7,00
4	AlN	52,91
5	Ag	9,00
6	AlN	150,31
7	Mo	7,00
8	AlN	48,68
Substrato	acciaio	

Infine, è stato progettato e realizzato un terzo filtro interferenziale (identificato dalla sigla "ENEA #5L") utilizzando gli stessi materiali del secondo filtro con la differenza che questa volta il primo strato metallico incontrato dalla radiazione solare è l'argento. Nonostante più volte sia stato sottolineato che non è opportuno utilizzare l'argento come primo strato metallico se si vogliono avere assorbanze solari apprezzabili, questa struttura è stata comunque progettata e realizzata con l'obiettivo di valutare quale fosse il miglioramento dell'emissività emisferica e allo stesso tempo valutare quale fosse l'ordine di grandezza dell'assorbanza solare di una struttura di questo tipo. Il progetto ottico è stato condotto tentando solo di massimizzare l'assorbanza solare visto che la riflettanza sarebbe

stata in ogni caso molto alta a causa della presenza dell'argento come primo strato metallico. Il filtro solare realizzato in base al progetto ottico presentava un'assorbanza solare pari all'80% ed emissività emisferiche del 8,9% a 400 °C e del 9,4% a 580 °C. Il risultato conferma che l'emissività solare di questo filtro incomincia ad essere interessante per applicazioni solari. Questo risultato dimostra la grande potenzialità dei filtri interferometrici rispetto ai filtri a base di strati cermet, laddove la riflettanza spettrale evidenzia la possibilità di un comportamento ottico molto più di tipo "a step" con cut-off a risalita veloce e con l'interessante beneficio di emissività emisferiche basse e poco variabili al variare della temperatura di lavoro. Tuttavia, il valore troppo basso dell'assorbanza solare impedisce, allo stato attuale, di annoverare questo filtro tra i rivestimenti solari idonei a ricoprire i tubi ricevitori di impianti solari termodinamici.

Tabella 60. Progetto del filtro solare interferenziale ENEA #5L

Strato	Materiale	Spessore (nm)
1	AlN	54,00
2	Ag	9,00
3	AlN	126,00
5	Mo	7,00
5	AlN	54,00
Substrato	acciaio	

In Figura 168 è riportata la curva di riflettanza del filtro solare "ENEA #5L" nell'intervallo spettrale 300-16000 nm a confronto con quella dei filtri "ENEA #6L" ed "ENEA #8L".

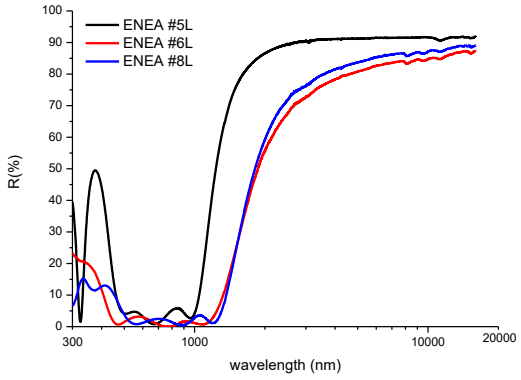


Figura 168. Riflettanza sperimentale del filtro solare interferenziale ENEA #5L, del filtro ENEA #6L e del filtro ENEA #8L in tutta la regione spettrale d'interesse

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/111.

b. Studio di sistemi alternativi di accumulo termico

Le attività hanno riguardato lo studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di nuovi sistemi di accumulo termico. In particolare è stata valutata la possibilità di realizzare un accumulo termico in impianti che utilizzano gas come fluido termovettore e sono stati analizzati nuovi sistemi di accumulo termico a calore sensibile che utilizzano sia materiali inerti (es. cementi speciali) che miscele di materiali a cambiamento di fase PCM (Phase Change Material) con aggiunta di nanoparticelle per migliorare le proprietà termiche.

Le attività sono state condotte presso i laboratori del centro ENEA della Casaccia con il contributo delle Università di Perugia, di Padova e di Trento.

b.1 Sviluppo di un sistema di accumulo per impianti solari ad alta temperatura alimentati con fluido gassoso.

Nell'ambito dello studio della possibilità di utilizzo di un fluido gassoso come fluido termovettore in impianti a collettori parabolici lineari, sono state analizzate le caratteristiche termodinamiche di due moduli di campo solare alimentato con aria compressa, che sono di riferimento per un impianto ibrido ad alta temperatura. In particolare sono stati presi in esame:

- impianto a ciclo chiuso con caldaia ausiliaria, scambiatore di calore rigenerativo e compressore inter-refrigerato;
- stessa configurazione del punto precedente a cui si aggiunge l'espansione frazionata dell'aria in una turbina a doppio stadio.

Per entrambe le configurazioni impiantistiche sono state sviluppate le curve che descrivono le grandezze caratteristiche del modulo del campo solare in funzione della radiazione solare sull'apertura dei collettori, la ANI, (Aperture Normal Irradiance) definita come la componente della radiazione solare diretta (DNI, Direct Normal Irradiance), normale al piano di captazione dei collettori.

La differenza tra i rendimenti termodinamici dei due moduli è dovuta essenzialmente al modo diverso in cui l'aria viene fatta espandere in turbina. Normalmente il rendimento termodinamico di un impianto con turbina a singolo stadio è inferiore rispetto al rendimento di un impianto con turbina a espansione frazionata, perché questa soluzione aumenta l'area del ciclo termodinamico. E' necessario però verificare se l'espansione frazionata con ri-surriscaldamento realizzato sul campo solare, è compatibile con la limitazione imposta dalla massima temperatura di esercizio del coating cermet del tubo ricevitori (≈ 600 °C).

L'obiettivo dell'attività è stato la simulazione del funzionamento dei moduli del campo solare con le due possibili configurazioni d'impianto, per definire quale delle due soluzioni è più efficiente e con maggiore fattore di utilizzazione. L'elemento più importante dell'impianto è il gruppo caldaia-turbina-compressore, e pensando a un impianto di piccola taglia, la soluzione che permetterebbe di ridurre i costi di costruzione, è quella di utilizzare una microturbina commerciale su cui eventualmente realizzare le modifiche necessarie per l'adattamento a un impianto solare.

Un elemento importante per impianti solari a concentrazione è il sistema di accumulo termico, a questo scopo sono state elaborate le caratteristiche di un sistema di accumulo termico a materiale solido (allumina sferoidale), dimensionato per avere circa6 ore di accumulo di energia termica, calcolate prendendo come riferimento la curva annuale della radiazione solare diretta, DNI, del sito dell'impianto Archimede (Priolo Gargallo, SR). Nel calcolo del sistema di accumulo sono state utilizzate le correlazioni di letteratura per quanto riguarda lo scambio termico e la perdite di carico, a questo scopo è stato realizzata una sezione di prova in scala ridotta per valutare questi parametri.

Per determinare quale sia la migliore configurazione di impianto da utilizzare, sono state fatte analisi relative a:

A. un ciclo rigenerativo con compressione inter-refrigerate
B. un ciclo rigenerativo con compressione inter-refrigerate ed espansione frazionata.

Lo schema di impianto e il diagramma qualitativo del ciclo termico relativa alla due configurazioni A e B è riportato nella Figura 169.

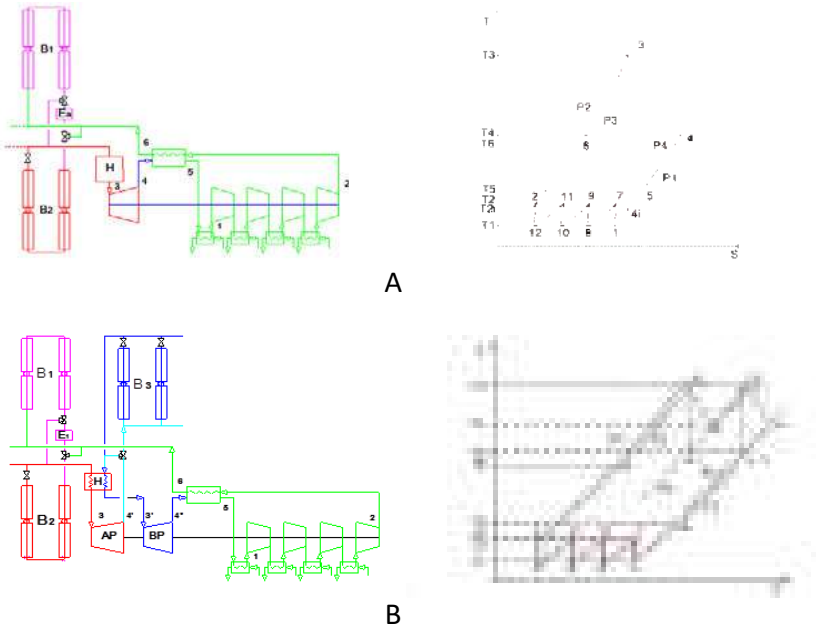


Figura 169. Schema di impianto e il diagramma del ciclo termico delle due configurazioni

Nella configurazione A nel campo solare sono presenti due moduli B1 e B2 costituiti ciascuno da due collettori di lunghezza 100 m e apertura 5,9 m, connessi in serie. Il blocco B1 è dedicato all'accumulo termico, E1, mentre il blocco B2 alla produzione. E' presente una caldaia di integrazione, blocco H, che ha la funzione di aumentare la temperatura del gas da 560 °C di uscita dal campo solare a 750 °C di ingresso alla turbina per migliorare il rendimento del ciclo termico. Nella configurazione B, nel campo solare è presente un'ulteriore blocco il B3, composto da 2 collettori da 100 m connessi in parallelo che riscaldano il gas dopo la prima espansione in turbina. In entrambe le configurazioni il gas opera ad una pressione massima di 100 bar.

Il rendimento totale del ciclo termico della configurazione A è di 0,3688 mentre nella configurazione B è di 0,2921. Ciò è dovuto al fatto che la configurazione A è stata ottimizzata, incrementando, fino a 750 °C, la temperatura T3, del gas in ingresso in turbina utilizzando la caldaia di integrazione, blocco H. Questo non può essere realizzato nella configurazione B per evitare temperature troppo elevate (superiore a 600 °C), degli ultimi tubi ricevitori dei collettori di ri-surriscaldamento, blocco B3 e quindi la temperatura di ingresso in turbina è stata limitata a 560°C. Questa condizione limita quindi l'esercizio della caldaia alla sola funzione di compensare le variazioni della radiazione solare, ossia la caldaia non può contribuire a migliorare il rendimento del ciclo termodinamico.

Dalle considerazioni precedenti risulta che la configurazione ottimale da utilizzare nell'impianto è quella A.

E' stato sviluppato un modello di calcolo mediante il quale è stato effettuato il dimensionamento di un modulo di accumulo termico, blocco E1 di figura 169. Il modulo è costituito da uno scambiatore di calore con 9 tubi a U, in cui sono stivate sfere di allumina di diametro medio circa 6 mm, che accumulano il calore trasferito dall'aria compressa all'interno dei tubi. Il diametro interno dei tubi ad U è 350 mm, la lunghezza è 30 m. Il materiale di riferimento per la fabbricazione è l'acciaio P91 (9% Cr, 1% Mo).

In fase di caricamento l'aria calda sposta il fronte di massima temperatura del materiale ceramico lungo l'asse dei tubi e raggiunge la sezione di uscita in un intervallo di tempo che diminuisce progressivamente, a causa della riduzione di densità e del conseguente aumento di velocità, dovuto al progressivo aumento di temperatura media del materiale ceramico. Il recupero dell'energia termica accumulata si realizza invertendo il verso del flusso dell'aria nei tubi a U, ossia, l'aria a temperatura più bassa rispetto al ceramico, si riscalda attraversando lo scambiatore in verso opposto rispetto al verso di percorrenza che ha avuto durante il processo di accumulo di calore.

La Figura 170 mostra i risultati delle simulazioni di caricamento di energia termica nell'elemento di accumulo in funzione del tempo, considerando una temperatura di ingresso al campo solare di 251 °C e di uscita di 560 °C.

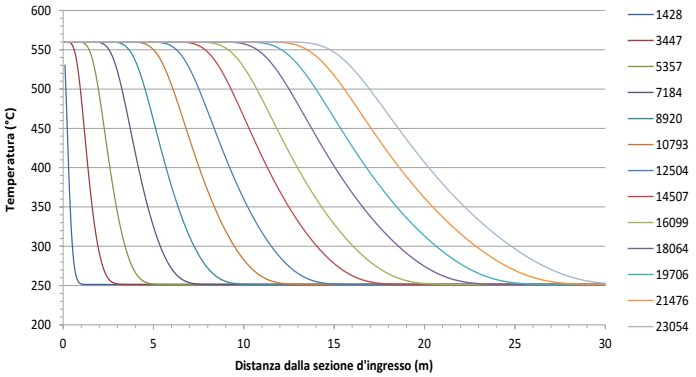


Figura 170. Distribuzione della temperatura nella fase di caricamento

E' necessario interrompere il caricamento quando la temperatura del gas in uscita dal modulo di accumulo, blocco E1, supera 251 °C, dopo circa 6,3 h. Questo per mantenere costante la temperatura di ingresso ai collettori del blocco B2. Quindi come si vede dalla Figura 170 non si riesce ad utilizzare completamente le potenzialità del sistema in quanto si riesce a caricare completamente solo poco più del 50% del materiale presente nel modulo.

La lunghezza di 30 m, dei tubi ad U è stata valutata per tentativi, con l'obiettivo di raggiungere una capacità di accumulo di circa 4 MWh. Con questa configurazione l'elemento di accumulo permette di produrre energia elettrica a una potenza di 200 kWe per circa 6,9 h, che si riducono a 3,4 h, alla massima potenza della turbina (400 kWe).

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda ai rapporti RdS/PAR2014/112 e RdS/PAR2014/113.

b.2 Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di sistemi di accumulo termico a media temperatura

Analisi della durabilità di miscele di nitrati fusi - nanoparticelle. Simulazione del comportamento dei sali fusi e loro interazione con le nanoparticelle

Nell'ambito del PAR 2014 si è proseguita l'attività di ricerca sullo sviluppo e caratterizzazione termica di sistemi elementari di accumulo termico a calore latente (LHTES). Un passo fondamentale per tale attività è quello della selezione, sintesi e caratterizzazione termica di nuovi materiali a cambiamento di fase (PCM) sia a livello sperimentale che tramite simulazioni numeriche. Tale attività, già sviluppata in parte durante le precedenti annualità è proseguita sviluppando le due linee qui di seguito descritte.

Analisi della durabilità di miscele nitrati fusi-nanoparticelle

La prova di durabilità ha lo scopo di verificare la capacità del mezzo di accumulo contenente nanoparticelle disperse (Nano Fluid PCM, NFPCM) di mantenere nel tempo le sue caratteristiche termiche. In particolare, i continui cambi di fase solido-liquido e gli eventuali moti convettivi che si potevano instaurare all'interno del mezzo, avrebbero potuto rompere il legame tra nanoparticella e molecola di sale facendo perdere alla miscela tutti i benefici ottenuti dalla sintesi del NFPCM.

La prova sperimentale accelerata di durabilità è stata condotta utilizzando l'impianto sperimentale ATES realizzato presso l'ENEA Casaccia ed eseguendo 34 cicli di carico e scarico del sistema, equivalente a circa 1,5 mesi di funzionamento di un impianto CSP, secondo lo schema in Figura 171. Tale numero, sebbene non elevato, è comunque sufficiente a comprendere se sia in atto un deterioramento del mezzo di accumulo o se, al contrario, questo rimanda stabile nel tempo.

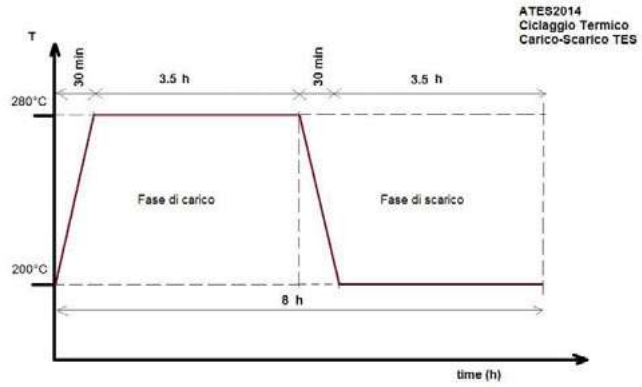


Figura 171. Programmazione della temperatura del termo-criostato relativa ad un ciclo di carico-scarico

I risultati ottenuti non evidenziano, da un punto di vista macroscopico, particolari variazioni nel comportamento del LHTES sia per quanto riguarda gli andamenti di temperatura (Figura 172) che per i bilanci energetici. Sebbene il numero di cicli effettuati non sia stato particolarmente elevato (34), questo è sufficiente a mettere in luce le variazioni di comportamento ipotizzate, che si dovrebbero evidenziare già dopo pochi cicli.

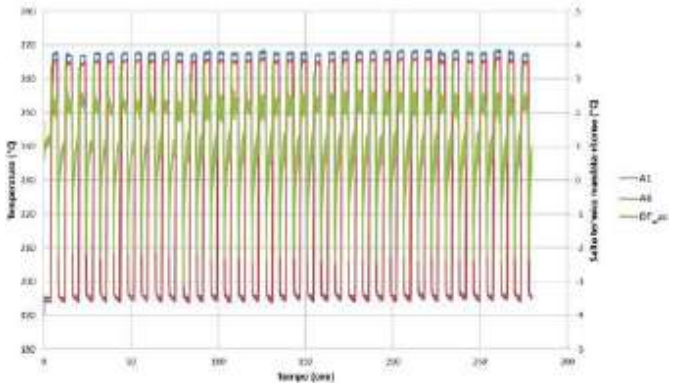


Figura 172. Andamento temperature ingresso (A1) e uscita (A6) dal TES e relativo salto termico

Per una valutazione più approfondita, essendo le temperature misurate influenzate anche dalla massa complessiva di tutti i materiali presenti nel LHTES elementare, è stata eseguita una caratterizzazione del NFPCM al termine della prova, confrontando le sue proprietà con quelle che aveva ad inizio prova.

Le analisi che sono state effettuate sui campioni sono di misura del calore specifico, viscosità e conducibilità termica della fase solida. L'obiettivo di queste misure è quello di essere di supporto all'impianto sperimentale ATES circa i risultati sperimentalmente ottenuti durante i cicli di carica e di scarica del calore tra il mezzo di accumulo ed il fluido di scambio termico. Dall'analisi delle prove sperimentali della fase di carica, relative alla prova con tubo liscio con NFPCM, risulta evidente che il tempo di carica risulta essere superiore (6 ore, circa il 30% in più) al tempo di carica del PCM (mezzo di accumulo non nanocaricato). Questo ritardo è attribuibile alle differenze delle proprietà fisiche, densità e viscosità, dei due diversi mezzi di accumulo del calore. La viscosità quando è alta è responsabile di diminuire gli effetti convettivi del fenomeno di riscaldamento, che comunque sono più lenti ad insorgere.

Le misure di viscosità dei due mezzi di accumulo sono state eseguite con l'uso di un viscosimetro rotazionale nell'intervallo di temperatura 250-500°C e sono messe a confronto, inoltre sono stati effettuati due set di dati a differenti punti di campionamento, al fine di diminuire le oscillazioni della viscosità misurata in funzione della temperatura, le oscillazioni sono molto evidenti per il campione nanocaricato. E' stato inoltre valutato lo scostamento del valore medio delle misure sperimentali effettuate sia di viscosità sia di calore specifico, e quindi dell'errore associato alle misure stesse.

Simulazione del comportamento di nitrati fusi e loro interazione con le nanoparticelle

Il comportamento di nitrati fusi (PCM) e la loro interazione con le nanoparticelle è stata valutata e prevista anche attraverso simulazioni numeriche di dinamica molecolare utilizzando i metodi "ab-initio". Questi permettono di simulare a livello atomico il comportamento di materiali per ricavare le diverse proprietà fisiche e chimiche senza introdurre parametri empirici nelle simulazioni. Essi richiedono però ingenti risorse di calcolo. Le risorse computazionali sono disponibili in ENEA, che dispone del sistema di calcolo CRESCO HPC, utilizzato per eseguire le simulazioni.

Nell'ambito dello studio dei nitrati come fluido termovettore e della possibile aggiunta di nanoparticelle, si è proposto lo studio ab-initio delle proprietà fisiche e chimiche di nitrati fusi, microscopiche (pair distribution function, mobilità degli ioni, presenza di strutture locali) e macroscopiche (densità, stabilità chimica, calore specifico).

Scopo dell'attività è quello di ottenere un modello atomico affidabile dei sali per la simulazione di miscele o altri tipi di nitrati. In seguito è stata considerata l'interazione con nanoparticelle di ossidi metallici inserite nei sali, con particolare attenzione alla stabilità della nanoparticella e ai cambiamenti strutturali indotti dalla presenza dei sali.

Test iniziali sono stati effettuati sulla geometria cristallina, per vedere se il metodo era in grado di riprodurla con sufficiente precisione. Il cristallo $NaNO_3$ ha geometria esagonale e una cella elementare piuttosto complessa, contenente 30 atomi. I risultati sono stati positivi e in linea con quanto ci si poteva aspettare da un calcolo DFT di buona qualità. Si è quindi proceduto alla simulazione del liquido. La densità a 500 °C è risultata 1,745 g/cm^3, in ottimo accordo con il dato sperimentale (1,740 g/cm^3). L'osservazione della struttura (Figura 173) mostra che non vi è alcuna dissociazione dei gruppi NO_3^-, che a 500 °C mantengono la geometria triangolare e planare. Sebbene il campione sia troppo piccolo per dare limiti quantitativi sulla possibile dissociazione, l'integrità e la stabilità di tutti i 54 gruppi NO_3^- indica che a 500 °C la trasformazione di nitrati in nitriti non dovrebbe essere un fenomeno particolarmente rilevante.

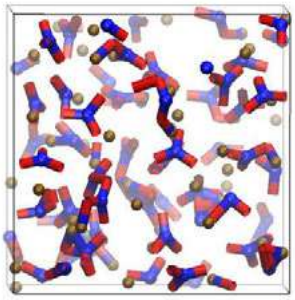


Figura 173. Configurazione atomica nel sale liquido. I gruppi NO_3^- sono i gruppi triangolari (blu/rossi), gli atomi Na sono gli atomi bruni isolati

Successivamente si è messo a punto il modello per lo studio dell'interazione con la nanoparticella di ZrO_2, dopo la termalizzazione (Figura 174). La particella non sembra soffrire di particolare instabilità, anche se la configurazione appare molto lontana dalla struttura cristallina iniziale, comportamento tipico delle nanoparticelle di zirconia. Confrontando la configurazione con quelle trovate in letteratura, sembra anzi che la presenza del sale abbia un effetto stabilizzante. Ciò potrebbe essere dovuto alla saturazione dei legami degli atomi alla superficie della nanoparticella.

In conclusione, è stata dimostrata la possibilità di simulare con metodi ab-initio campioni di sali fusi, sufficienti a ricavarne proprietà microscopiche (strutture locali, numeri di coordinazioni) e utili come base per studi su scala più grande (force-matching). E' stata inoltre mostrata l'utilità di studiare il comportamento di nanoparticelle immerse in sali fusi e la possibilità di ricavare dallo studio informazioni e suggerimenti per il lavoro sperimentale. I metodi possono essere applicati a miscele di sali diversi, previa la disponibilità di adeguate risorse di calcolo.

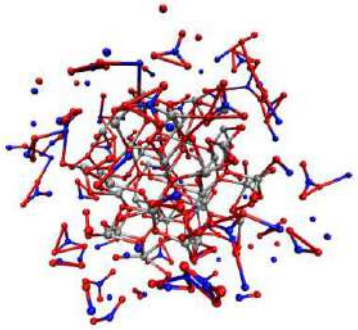


Figura 174. Struttura di un nano-cluster di zirconia ($Zr_{43}O_{86}$) immerso nei sali fusi

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda ai rapporti RdS/PAR2014/114 e RdS/PAR2014/115.

b.3 Prove sperimentali e simulazione del comportamento termo-dinamico di un sistema di accumulo termico a calore latente

Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi elementari di accumulo a calore latente

L'impianto sperimentale ATES (Advanced Thermal Energy Storage), dedicato alla caratterizzazione termica di sistemi elementari di accumulo termico a calore latente, realizzato nella precedente annualità è stato messo a punto ed automatizzato al fine di eseguire una serie di prove sperimentali su alcune tipologie di accumulo termico per impianti solari a concentrazione (CSP). In particolare si sono testati quattro tipi di accumulo elementare a calore latente di tipo "shell & tube" costituiti da un tubo liscio od alettato circondato da un mezzo di accumulo costituito da "sali solari" (PCM base) oppure additivati con nanoparticelle di silica ed allumina (NFPCM). I dati acquisiti sono analizzati, elaborati e messi a confronto tra di loro, per evidenziare il comportamento termodinamico delle differenti tipologie di accumulo termico sperimentate Tabella 61).

Prove sperimentali

Le prove sperimentali sono state eseguite come una successione di quattro fasi distinte ognuna delle quali termina con il raggiungimento di uno stato stazionario del sistema. Quest'ultima condizione è necessaria al fine di valutare l'entità delle perdite associate al sistema di accumulo stesso e, di conseguenza, la quantità di energia effettivamente accumulata.

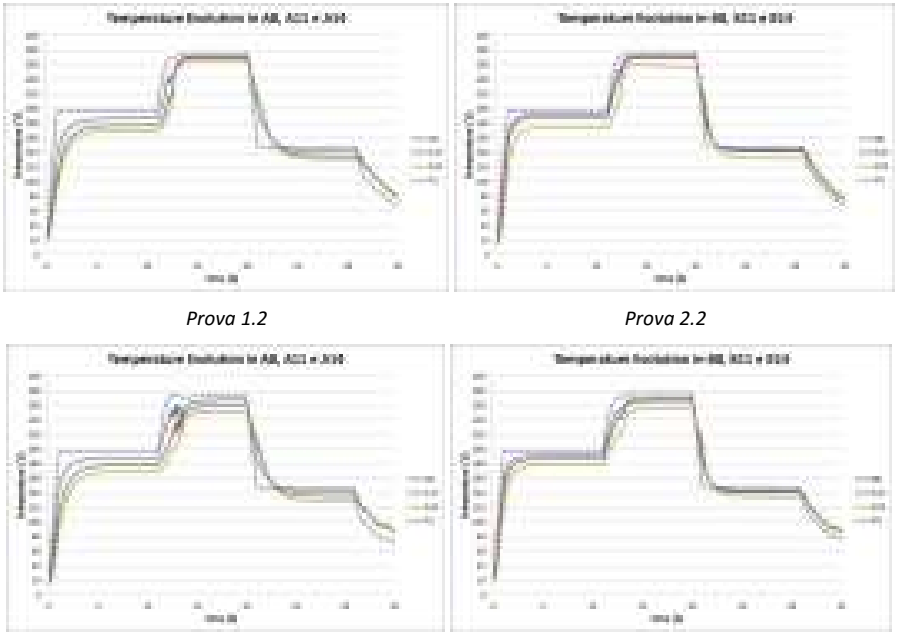
Le temperature acquisite sono: la temperatura ambiente, la temperatura all'esterno del TES, le temperature di ingresso ed uscita dagli accumulatori e dal termo-criostato.

Tabella 61. Prove sperimentali eseguite

ID Prova	ID Test	Mezzo di accumulo	Promotore conducibilità
1	1.1	PCM	No
	1.2		
	1.3		
2	2.1	PCM	Si
	2.2		
	2.3		
3	3.1	NFPCM	No
	3.2		
4	4.1	NFPCM	Si
	4.2		

Sulla linea di mandata è anche presente un misuratore di portata volumetrica. Sono anche presenti 9 termocoppie interne al primo TES elementare di ciascuna linea di prova, disposte su tre piani (uno superiore a 5 cm dal tappo,

uno mediano e l'altro inferiori a 5 cm dal fondo) e in tre posizioni radiali (una interna prossima al tubo, una mediana ed una esterna prossima al vessel). Nella Figura 175 sono riportati gli andamenti nel tempo delle temperature della sezione mediana (A8, A11 e A14, o B8, B11 e B14) all'interno del mezzo di accumulo per le prove 1.2, 2.2, 3.2 e 4.2.



Prova 1.2 *Prova 2.2*

Prova 3.2 *Prova 4.2*

Figura 175. Evoluzione delle temperature nella sezione mediana del mezzo di accumulo per la prova completa

Dalle temperature misurate e dalla misura di portata è possibile valutare la potenza termica assorbita o rilasciata dal sistema di accumulo. Invece, dalle temperature in A0 (temperatura esterna alla coibentazione) e ambiente, sapendo che la superficie esterna del sistema di coibentazione di un accumulatore è di circa 0,735 m^2 (gli accumulatori sono 3) ed ipotizzando un coefficiente di scambio pari a 5 W/(m^2 °C) (aria sostanzialmente ferma), è possibile valutare la potenza termica dispersa da sistema di accumulatori. Se togliamo queste perdite dalla potenza assorbita otteniamo la potenza utile per il riscaldamento del TES. Integrando quest'ultima nel tempo si ottiene l'energia immagazzinata in questa fase.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si possono fare le seguenti considerazioni:

- nella fase di riscaldamento del TES, dove è predominante il ruolo della diffusività termica, i tempi di riscaldamento risultano essere in generale più contenuti negli accumulatori con tubi alettati. In tal caso è evidente il ruolo di promozione della conducibilità termica, e quindi della diffusività, esercitato dalle alette;
- nella fase di carico gli accumulatori con tubi alettati (Prove 2 e 4) hanno tempi di carico sostanzialmente comparabili (3-4 ore), indipendentemente dal mezzo di accumulo. Lo scambio termico è principalmente di tipo conduttivo;
- la fase di carico della prova con tubo liscio e PCM ha tempi confrontabili con quelli dei TES con tubi alettati. In questa fase l'azione promotrice esercitata dalle alette è controbilanciata dall'innesco di moti convettivi nel caso di tubo liscio (Prova1). Lo scambio termico è prevalente di tipo convettivo;
- la fase di carico della prova con tubo liscio e NFPCM (Prova 3) è molto più lenta (6 ore, circa il 30% in più), manifestando un comportamento puramente conduttivo all'interno del liquido, probabilmente dovuto alla maggiore viscosità del mezzo;
- durante la fase di carico il mezzo di accumulo fonde completamente assorbendo, sotto forma di calore latente, circa 270 Wh nel caso di PCM e 315 Wh in quello di NFPCM. Naturalmente, questo calore è completamente restituito durante la fase di scarico;
- nei casi con tubi alettati, la fase di scarico è più rapida in quanto l'azione ritardante (isolante) dovuta alla solidificazione dei sali sulla parete di scambio termico è parzialmente compensata dalla azione delle alette;
- l'azione delle alette è evidente, in tutte le fasi, anche dalla quasi sovrapposizione degli andamenti di temperatura tra termocoppie interne e medie e dalla ridotta differenza con quelle esterne;
- nella fase di riscaldamento le perdite del sistema con tubi alettati sono maggiori proprio a causa del migliore

diffusività termica del mezzo di accumulo ovvero della temperatura media del sistema maggiore. Queste risultano poi essere sostanzialmente confrontabili nella fase di carico e addirittura inferiori in quella di scarico. In quest'ultimo caso è ancora evidente l'effetto della maggiore conducibilità che tende a raffreddare prima la parete esterna del TES;

- l'energia termica rilasciata nella fase di scarico è superiore a quella caricata poiché comprende anche la quota di calore sensibile dovuta alla differenza di temperatura del TES tra inizio della carica (200 °C) e fine della scarica (150 °C). Inoltre, parte di questa energia non è fornita al fluido termovettore ma all'ambiente esterno sotto forma di perdite;
- la maggiore capacità termica, unita ai minori tempi di scarico, consente al sistema alettato di poter fornire una potenza media di progetto maggiore (circa il 10-30%);
- dall'analisi dei dati elaborati, il NFPCM conferma rispetto il PCM: un miglioramento in termini di capacità di accumulo (15-20%); una sostanziale invarianza della diffusività termica (trasporto di calore); un evidente miglioramento della capacità di scambio con materiali esterni (effusività termica).

Simulazioni numeriche

Successivamente, sono stati sviluppati due modelli FEM, uno semplificato (1D) ed uno più complesso (2D), atti a simulare il comportamento termico dei sistemi di accumulo sopra descritti, confrontando i risultati ottenuti con i dati provenienti dalla sperimentazione. Tali modelli si basano sull'ipotesi che il trasferimento di calore avvenga in perfetta simmetria assiale (problema assial simmetrico). Sono inoltre ritenuti trascurabili eventuali fenomeni convettivi del PCM quando questo è in fase liquida. Più in dettaglio, al fine di modellizzare il comportamento termico del sistema di accumulo termico (TES) elementare sperimentato sull'impianto ATES si è sviluppato un primo modello ad elementi finiti (FEM) semplificato. Si tratta di un modello sostanzialmente 1D (in realtà è un 2D a simmetria sia assiale che verticale). In seguito, si è sviluppato un modello FEM più complesso, un modello 2D in simmetria assiale, in cui si sono portati in conto gli effetti termici assiali (geometria TES limitata) e la termodinamica dello scambio olio-tubo.

I calcoli sono stati effettuati utilizzando un codice non commerciale chiamato Cast3M, sviluppato presso il CEA di Saclay (Parigi). Per il calcolo più complesso (2D), le risorse di calcolo ed il relativo supporto tecnico utilizzato sono state messe a disposizione dalla infrastruttura "*CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing*".

Il TES elementare scambia per convezione (caso 1D) o per avvezione (caso 2D) verso il fluido termovettore (HTF) che scorre all'interno del tubo e per convezione con l'aria all'esterno (ambiente). Il fluido termovettore è supposto avere una temperatura variabile nel tempo e pari a quella misurata sperimentalmente all'ingresso del primo elemento (termocoppia A1). Nel caso 2D, tale temperatura sarà quella di ingresso dell'olio mentre quella in uscita varierà in conseguenza dello scambio termico con il TES. L'HTF scambia con la parete in acciaio secondo un coefficiente di scambio dipendente dal mezzo (olio diatermico Therminol66), dalla sua temperatura e dalle condizioni fluidodinamiche (portata). Il relativo coefficiente di scambio termico (in $W/m^2\,^{\circ}C$) è stato valutato durante le prove sperimentali. Anche la temperatura ambiente è stata imposta variabile nel tempo e pari a quella misurata sperimentalmente (termocoppia A2). Il coefficiente di scambio termico tra la parete esterna del TES e l'aria è stato ipotizzato essere costante e pari a 5 W/m^2 °C (aria in quiete). Infine, l'intero TES è stato ipotizzato essere inizialmente alla stessa temperatura dell'ambiente esterno al tempo t=0.

A titolo di esempio in Figura176 è riportata l'evoluzione delle temperature sia calcolate che sperimentali in diversi punti del PCM: uno interno, prossimo al tubo di scambio, uno esterno, prossimo al contenitore, ed uno intermedio (rispettivamente A8, A11 e A14).

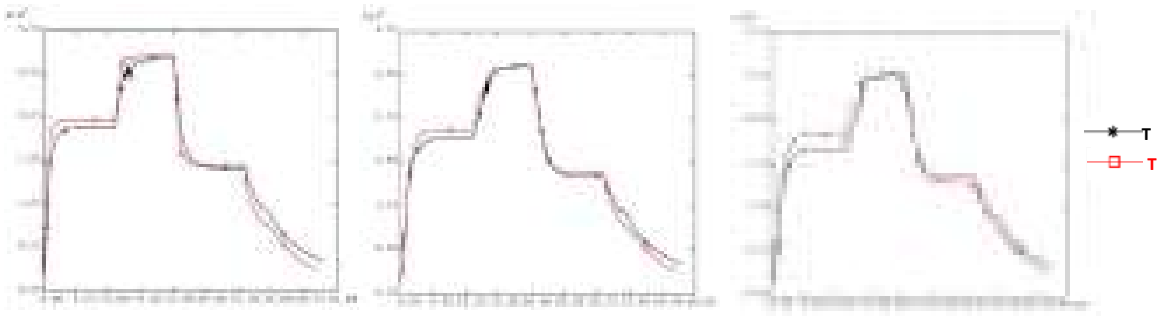


Figura 176. FEM 1D - Confronto numerico-sperimentale della temperatura in diversi punti del PCM

In Tabella 62 e 63 sono riportati i principali risultati ottenuti utilizzando i modelli FEM, per ciascuna tipologia di

sistema TES studiato, e messi a confronto con quelli sperimentali.

Tabella 62. Risultati sperimentali e FEM – Prove 1 e 2

ATES	Prova/unità	1.2	FEM 1D (*)	FEM 2D (*)	2.2	FEM 1D (*)	FEM 2D (*)
Riscaldamento							
Temperatura	*°C*	200	200	200	200	200	200
Tempo di carico/scarico	*h*	5-6	6	6	3	4	4
Potenza persa dal TES	*W*	383	75	101,4	420	81	108,1
Energia caricata/scaricata nel TES	*Wh*	1754	825	891	2306	930	948,6
Carico							
Temperatura	*°C*	280	280	280	280	280	280
Tempo di carico/scarico	*h*	4	7	6	3.5	4	4
Potenza persa dal TES	*W*	705	110	146,4	517	114	155,5
Energia caricata/scaricata nel TES	*Wh*	922	600	627	1260	633	638
Scarico							
Temperatura	*°C*	150	150	150	150	150	150
Tempo di carico/scarico	*h*	6	6	7	4	4	4
Potenza persa dal TES	*W*	537	52,5	72,0	444	57	76,8
Energia caricata/scaricata nel TES	*Wh*	1268	837	882	1144	882	925
Capacità termica di progetto	*Wh*	1268	837	882	1155	882	925
Tempo medio di completo rilascio	*h*	6	6	7	4	4	4
Potenza media di progetto	*W*	215	105.9	127,8	293	226,5	187
Efficienza termica	*96*	137	140	139	91	140	141

(*) essendo la sezione di prova costituita da 3 TES elementari in serie, il risultato del calcolo è stato triplicato

Tabella 63. Risultati sperimentali e FEM – Prove 3 e 4

ATES	Prova/unità	3.2	FEM 1D (*)	FEM 2D (*)	4.2	FEM 1D (*)	FEM 2D (*)
Riscaldamento							
Temperatura	*"C*	200	200	200	200	200	200
Tempo di carico/scarico	*h*	4	6	5	4	4	4
Potenza persa dal TES	*W*	269	77	105	395	79	106
Energia caricata/scaricata nel TES	*Wh*	2023	993	1059	1846	1053	1107
Carico							
Temperatura	*"C*	280	280	280	280	280	280
Tempo di carico/scarico	*h*	6	6	5	4	5	4
Potenza persa dal TES	*W*	535	106	152	678	106	153
Energia caricata/scaricata nel TES	*Wh*	683	714	711	803	760	747
Scarico							
Temperatura	*"C*	150	150	150	150	150	150
Tempo di carico/scarico	*h*	7	5	5	4	4	3,5
Potenza persa dal TES	*W*	491	54	75	250	56	76
Energia caricata/scaricata nel TES	*Wh*	1091	960	1008	1202	993	1032
Capacità termica di progetto	*Wh*	1091	960	1008	1202	993	1032
Tempo medio di completo rilascio	*h*	7	5	5	4	4	3,5
Potenza media di progetto	*W*	158	196	207	308	256	295
Efficienza termica	*%*	160	134	142	149	131	138

(*) essendo la sezione di prova costituita da 3 TES elementari in serie, il risultato del calcolo è stato triplicato

Analizzando i risultati delle simulazioni relative ai due modelli si può dedurre quanto segue:

- le analisi 1D e 2D sono risultate essere sostanzialmente equivalenti in termini di previsione del comportamento termico del TES, anche se la seconda è sicuramente più precisa;
- il primo caso, con tubi lisci e PCM semplice, l'HSM mostra temperature reali più elevate ed una dinamica più rapida rispetto il calcolo. Ciò è probabilmente indice di uno scambio termico governato da fenomeni convettivi invece che dalla pura conduzione come ipotizzato nel modello FEM. Tale comportamento non avviene quando nel mezzo ci sono le nanoparticelle o il tubo è alettato: nel primo caso la viscosità più elevata del HSM ostacola l'innesco dei moti convettivi mentre, nel secondo caso, l'impedimento è di natura fisica (presenza di alette);
- il confronto delle temperature calcolate e sperimentali all'interno del PCM evidenzia in modo inequivocabile che i moti convettivi che si instaurano all'interno della fase liquida del PCM cambiano completamente le caratteristiche di scambio termico;
- le differenze nei bilanci energetici tra calcolo e sperimentazione sono piuttosto evidenti e dovute sia alle perdite verso l'esterno, molto superiori rispetto il modello, sia alle masse in gioco nella sezione sperimentale, anche esse molto superiori;
- la differenza dei tempi di carica e scarica del sistema tra la prova 1.2 e 3.2 è la riprova della maggiore facilità

di trasmissione del calore verso il o dal mezzo di accumulo. Tale comportamento non è naturalmente evidenziato dal modello FEM;

- la presenza delle alette (casi 2.2 e 4.2), promotrici della conducibilità, induce una forte riduzione dei tempi di carica e scarica di un 25-30%. Tale azione risulta essere superiore a quella relativa all'innesco di moti convettivi (caso 1.2) e pressoché identica in entrambi i casi;
- la presenza delle alette evidenzia un indubbio beneficio sia in termini di tempi di carica/scarica che di energia accumulata (incremento di temperatura e, quindi, di calore sensibile);
- la presenza del HSM con nanoparticelle evidenzia una maggiore capacità termica ma non un corrispondente miglioramento della conducibilità;
- per cogliere il comportamento termodinamico evidenziato dalla Prova 1 sarebbe necessario ricorrere ad una modellistica più complessa di tipo fluidodinamico (CFD), facendo debita attenzione alla determinazione di tutti quei parametri che governano l'instaurarsi dei moti convettivi del fluido. Il modello FEM sembra invece applicabile, oltre che alle prove con tubi alettati, alla prova 3, in cui il materiale di accumulo è un PCM additivato con nanoparticelle. Probabilmente, in questo caso, la viscosità del mezzo in fase liquida è notevolmente incrementata rispetto al PCM base e capace di inibire la partenza di moti convettivi importanti. In questo caso, l'ipotesi di scambio termico principalmente di tipo conduttivo rimane sostanzialmente valido.

Conclusioni

In conclusione, lo scopo del lavoro è stato quello di analizzare il comportamento termico e di sviluppare appropriati modelli di simulazione agli elementi finiti di un sistema elementare di LHTES di tipo "shell & tube". Questo sistema è stato analizzato, sia aumentando la superficie di scambio (tramite alette) sia cambiando le proprietà termiche del PCM (aggiunta di nanoparticelle, NFPCM), mediante alcune prove sperimentali condotte su un impianto appositamente realizzato (ATES). Il test mostra, come previsto, che l'aumento della superficie di scambio ha un effetto rilevante sulla promozione della conducibilità nel PCM e che l'uso di NFPCM, così formulati, migliora lo scambio termico verso l'esterno (effusività) e la capacità di stoccaggio ma non mostra vantaggi in termini di diffusività termica. Infatti, il tempo di carica del sistema sembra essere simile nel caso di tubi alettati ma anche nel caso di tubi lisci e PCM. Quest'ultimo dato è effettivamente influenzato da un fenomeno fisico con effetti sorprendenti. Provando un TES con tubo liscio e semplici sali solari, nelle condizioni di prova imposte, abbiamo notato l'innesco di un moto convettivo all'interno della frazione fusa. Questi moti hanno ampiamente migliorato lo scambio termico ed il trasporto di calore del fluido e il loro effetto è risultato essere paragonabile, se non superiore, a quella esercitata dalle alette. Tali moti convettivi, tuttavia, non si verificano nel NFPCM perché, probabilmente, la presenza di nanoparticelle aumenta significativamente la viscosità del fluido e ne inibisce l'innesco.

Per quanto riguarda, invece, la simulazione numerica del comportamento del LHTES, occorre dire che il modello FEM adottato, sia 1D che 2D, essendo puramente conduttivo, non riesce a coglie i fenomeni connessi con l'innesco dei moti convettivi (Prova 1.2), che invece caratterizzano uno scambio termico puramente convettivo. Tale comportamento è sottolineato anche in diversi recenti lavori. Per cogliere questo tipo di comportamento sarebbe necessario ricorrere ad una modellistica più complessa di tipo fluidodinamico (CFD), facendo debita attenzione alla determinazione di tutti quei parametri che governano l'instaurarsi dei moti convettivi del fluido. Il modello FEM sembra invece applicabile alla prova 3.2, in cui il materiale di accumulo è un PCM additivato con nanoparticelle. Probabilmente, in questo caso, la viscosità del mezzo in fase liquida è notevolmente incrementata rispetto al PCM base e capace di inibire la partenza di moti convettivi importanti. In questo caso, l'ipotesi di scambio termico principalmente di tipo conduttivo rimane sostanzialmente valido.

In futuro, per sfruttare i fenomeni qui evidenziati e progettare un sistema LHTES compatto ed efficiente, sarà necessario eseguire delle prove su un prototipo di scala maggiore avendo cura di ridurre le perdite termiche, aumentare il salto di temperatura all'interno del TES ed effettuare una misurazione precisa della temperatura di ingresso e di uscita del sistema. Naturalmente, in fase di progettazione del prototipo, sarà necessario ricorrere all'ausilio di una modellistica CFD opportunamente validata.

Studio di fattibilità di un sistema LHTES di piccola taglia e della sua integrazione in un impianto solare termodinamico

Al fine di valutare le prestazioni del sistema di accumulo integrato in un impianto solare a concentrazione (CSP) è stato necessario sviluppare un modello semplificato dell'accumulo che però tenesse conto dei fenomeni riscontrati durante la fase sperimentale.

Sviluppo di un modello semplificato

Il modello di calcolo che è stato sviluppato è in grado di simulare il comportamento termodinamico di un sistema di accumulo a cambiamento di fase, in particolare è stato modellato il trasferimento del calore ed il trasporto di energia tra il materiale di accumulo termico ed un fluido termovettore con l'obiettivo principale di valutare sia le dimensioni del serbatoio di accumulo che i relativi tempi (di carica e scarica). Il modello fa riferimento ad un accumulo termico di tipo indiretto, con la possibilità di utilizzare materiali a cambiamento di fase (tenendo conto del calore latente).

Sono state utilizzate le equazioni generali per il bilancio dell'energia sia nel materiale solido che in quello fluido. In Figura 177 è rappresentato lo schema di un volume di controllo monodimensionale di un elemento *dz* del materiale di stoccaggio termico al quale fa riferimento il modello.

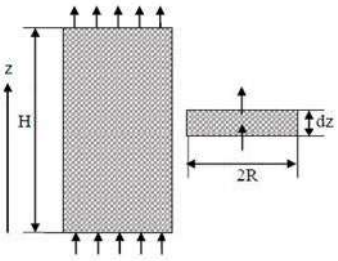


Figura 177. Schema di un elemento di controllo

Detto modello, scritto per un generico filler, è stato particolarizzato per un sistema di scambio a fascio tubiero, modificando le seguenti grandezze: porosità all'interno del serbatoio; il coefficiente di scambio termico; la superficie di scambio termico per unità di lunghezza. In Figura 178 è rappresentata una sezione trasversale del serbatoio di stoccaggio con all'interno il materiale di accumulo termico ed i tubi in cui scorre il fluido termovettore.

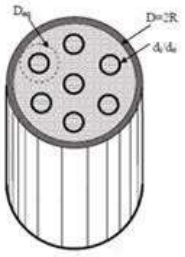


Figura 178. Schema di TES con tubi e loro contorno di materiale di accumulo termico

Nel caso di utilizzo di materiali in cambiamento di fase, il modello utilizza le classiche equazioni di bilancio tra i due fluidi (di scambio termico e di accumulo), finché il cambiamento di fase ancora non è iniziato o si è già concluso mentre, durante la fase di fusione, le equazioni sono state modificate per tener conto nel bilancio energetico del calore di fusione. Il sistema di equazioni, ridotto in forma adimensionale, è risolto numericamente attraverso l'uso del metodo delle caratteristiche (Figura 179). Tale metodo consente una soluzione diretta delle equazioni discretizzate (senza iterazioni) ed elimina completamente qualsiasi sovra costo computazionale.

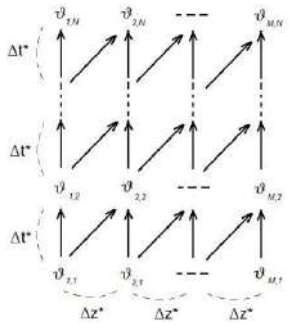


Figura 179. Diagramma della matrice soluzione derivante dal metodo delle caratteristiche

Validazione del modello semplificato

Il modello semplificato sviluppato è stato validato sulla base dei risultati sperimentali ottenuti durante le prove sperimentali condotte in ENEA su degli elementi di accumulo LHTES installati sull'impianto ATES. In particolare, si sono confrontati gli andamenti di temperatura calcolati e sperimentali in ingresso ed uscita dal sistema di accumulo e quelli nel PCM.

Il modello ha evidenziato un'ottima capacità predittiva sia in termini di temperature raggiunte sia di dinamica temporale (tempi di carico e scarico del sistema), mettendo altresì in luce l'importanza di alcuni parametri di scambio termico sui risultati finali.

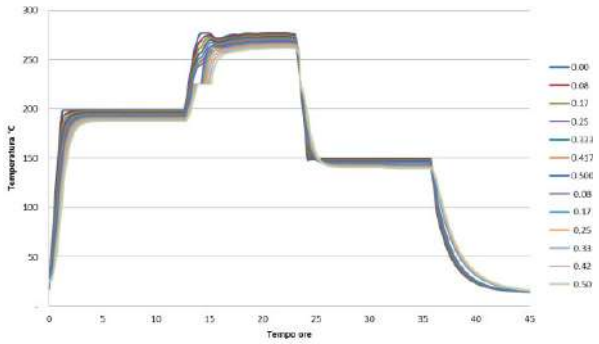


Figura 180. Evoluzione delle temperature a diverse quote (in m)

Su tali basi, il modello sviluppato è risultato applicabile per predire il comportamento termodinamico di sistemi di accumulo a calore latente più complessi. Confrontando i risultati del modello con i dati sperimentali si ottiene un buon accordo (Figura 181).

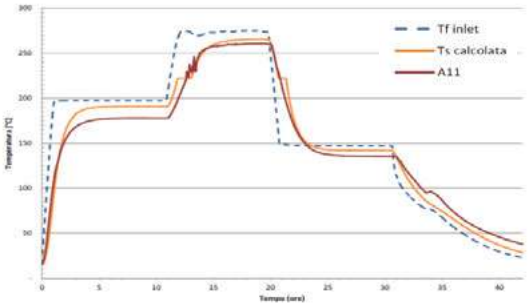


Figura 181. Andamento delle temperature nella zona centrale del sistema di accumulo

Studio di fattibilità di un LHTES

Utilizzando il modello semplificato precedentemente sviluppato, si è quindi proceduto ad analizzare il comportamento termodinamico di un sistema di accumulo termico a calore latente più complesso, con capacità di circa 30 MWh da poter utilizzare in un impianto solare di piccola taglia. In particolare si sono confrontate le prestazioni di un sistema LHTES con un sistema di stessa capacità a calore sensibile basato sull'uso di particolari cementi, valutandone i vantaggi e gli svantaggi. Di seguito l'andamento delle temperature del fluido termovettore (Figura 182, linee tratteggiate) e del PCM durante la fase di carica e di successiva scarica.

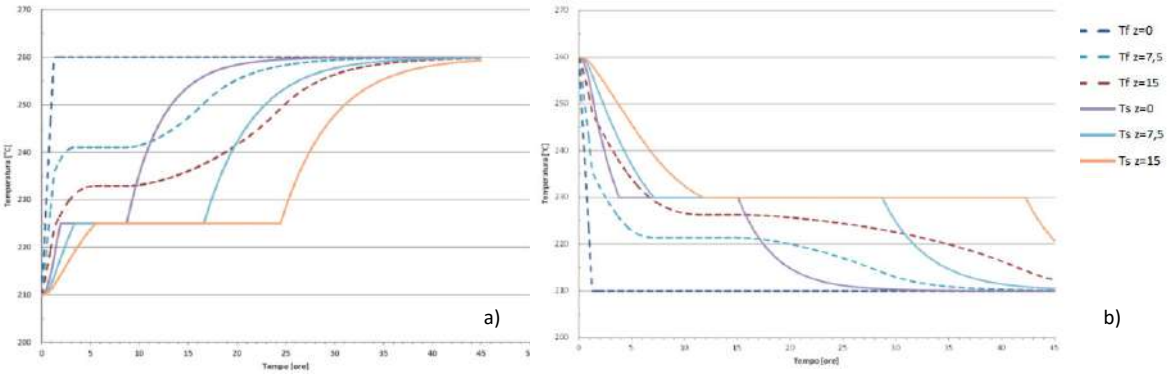


Figura 182. Andamento della temperatura in fase di carica (a) e di scarica (b) del fluido termoconvettore e del PCM

Di seguito l'andamento delle temperature del fluido termovettore (Figura 183, linee tratteggiate) e del cemento

come materiale di accumulo termico durante la fase di carica e di successiva scarica sempre in tre diverse sezioni del serbatoio (ingresso, centro, uscita).

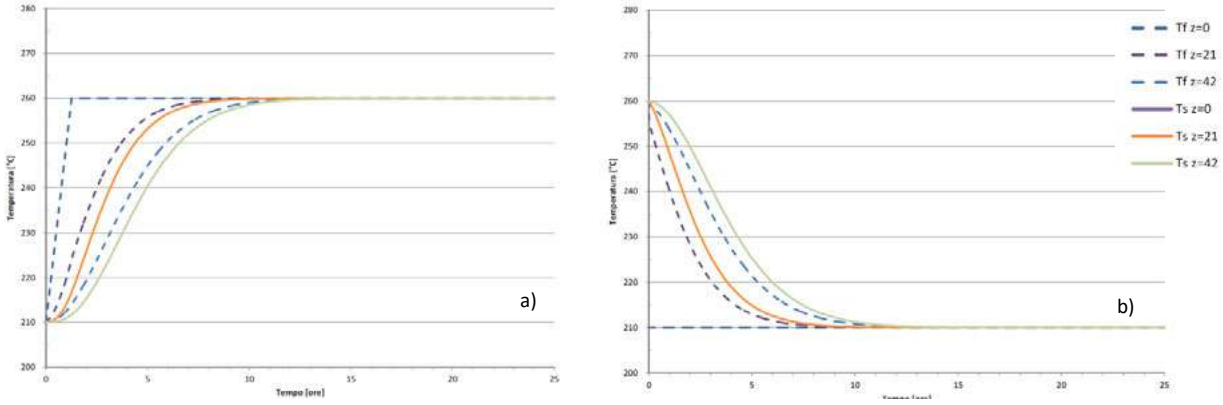


Figura 183. Andamento delle temperature in fase di carica (a) e scarica (b) del fluido termoconvettore e del cemento

A questo punto sono stati inseriti i due sistemi di accumulo all'interno di un impianto solare a collettori parabolici lineari composto da 2 stringhe da 4 collettori ciascuna e si è fatta l'ipotesi che tutta l'energia raccolta dal campo solare venga utilizzata esclusivamente per caricare l'accumulo.

Di seguito l'andamento delle temperature dell'accumulo in corrispondenza di differenti sezioni orizzontali (curve piene) e della temperatura del fluido termovettore in ingresso al sistema di accumulo, sia nel caso di materiali a cambiamento di fase che nel caso del cemento (Figura 184).

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda ai rapporti RdS/PAR2014/116 e RdS/PAR2015/117.

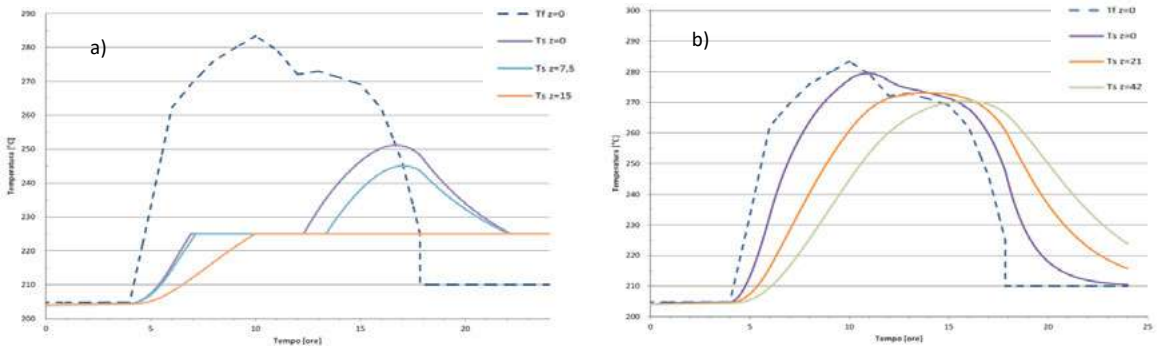


Figura 184. Profilo di temperatura nell'arco di una giornata per accumulo a PCM (a) e accumulo con cemento (b)

b.4 Prove sperimentali e simulazione del comportamento termodinamico di un sistema di accumulo termico a calore sensibile in cemento

Obiettivo principale del presente lavoro è stata la verifica sperimentale del comportamento termodinamico di diversi tipi di materiali cementizi utilizzati come sistemi di accumulo a calore sensibile. In particolare sono stati realizzati due moduli impiegando per ciascuno miscele differenti di calcestruzzo, uno sviluppato dall'Università di Trento [rapporto RdS/PAR2014/119] nell'annualità precedente, l'altro sviluppato dall'Italcementi [rapporto RdS/PAR2014/120] in precedenti proprie attività di ricerca. I due moduli hanno stesse dimensioni geometriche ed identico layout delle tubazioni che sono state inserite all'interno della matrice cementizia e che fungono da scambiatore per il trasferimento del calore nella fase di caricamento e per la sua asportazione nella fase di scaricamento.

Ogni blocco cementizio è un parallelepipedo avente una sezione quadrata (200x200 mm) ed una lunghezza di 3 m. I blocchi di calcestruzzo (Figura 185) sono stati ricoperti di materiale isolante, lana ceramica+lana di roccia, in modo da limitare le perdite di calore. Il coibente è stato poi rivestito di alluminio per evitare spargimenti di coibente nell'ambiente.



Figura 185. Particolare del sistema di accumulo, nel quale si vedono i materiali cementizi, nudi e coperti da lamierino, in fase operativa

Per la sperimentazione è stato realizzato un apposito circuito, denominato Solteca3, in grado di operare alle temperature attese, completo dei sistemi necessari alla circolazione, al riscaldamento ed alla refrigerazione del fluido termo-vettore con potenza termica massima di circa 25 kW.

Tutta l'attività sperimentale è stata effettuata dai tecnici ENEA presso i laboratori del C.R. Casaccia. Essa è stata altresì affiancata da un'attività di simulazione numerica, svolta prevalentemente dall'Università di Padova (RdS/PAR2014/120), mediante la quale sono stati messi a punto opportuni modelli di calcolo al fine di analizzare il comportamento termico del modulo e di evidenziare eventuali criticità e degrado funzionale e/o strutturale dei moduli stessi.

Allo scopo di riscaldare l'elemento di accumulo in fase di caricamento e di raffreddarlo in fase di scaricamento è stato scelto come fluido termovettore un olio il Paratherm NF, per le sue caratteristiche: ampio range operativo (36-316 °C, con temperatura di ebollizione a 371 °C), bassa viscosità alle temperature di interesse (44 cP a temperatura ambiente, 3 cP a 100 °C, 1,6 cP a 300 °C), bassa tensione di vapore (0,11 bar a 300 °C , trascurabile sotto i 200 °C), scarsa tossicità (è utilizzato nell'industria alimentare). In Figura 186 una foto dell'impianto Solteca3.



Figura 186. Particolare dell'impianto Solteca3, nel quale sono visibili le valvole con attuatore elettrico e i tubi di collegamento con il sistema di accumulo

Nel circuito sono presenti 4 valvole con attuatore elettrico in grado di variare la direzione del flusso dell'olio all'utenza in modo da simulare le diverse fasi operative.

Il sistema di acquisizione, sviluppato in ambiente LabView, prevede la possibilità di comandare in remoto e visualizzare la portata del fluido termico, del sistema di raffreddamento e delle 4 valvole ad attuatore elettrico appena descritte. Il sistema permette altresì di visualizzare e registrare le temperature rilevate dalle 22 termocoppie poste nei vari punti del sistema per poter calcolare in maniera opportuna gli scambi termici che avvengono durante la sperimentazione. In particolare queste rilevano la temperatura in ingresso, nella mezzeria e

all'uscita del circuito di accumulo e nella sezione iniziale, mediana e finale del blocco cementizio andando ad analizzare le temperature in superficie, mediane ed interne del modulo stesso oltre che la temperatura ambiente

I due campioni sono stati sottoposti, senza coibentazione, ad un riscaldamento controllato in grado di togliere, il più possibile l'acqua libera residua, cioè non idratata, dall'interno del materiale stesso. Ciò va fatto per evitare che l'acqua libera, sottoposta alle temperature spinte delle prove e in presenza di coibentazione, possa vaporizzare e far salire la pressione interna al calcestruzzo, a causa della ridotta permeabilità del calcestruzzo, col rischio rompere il materiale cementizio anche in forma esplosiva, invalidando le prove e danneggiando seriamente il sistema di accumulo. Tenuto conto delle caratteristiche del circuito, del circolatore e del fluido si è stimata portata media volumica di 10,1 L/min, a cui corrisponde una velocità di 1,1 m/s, all'interno del tubo di scambio.

In Figura 187 a titolo di esempio, si riporta l'andamento temporale di alcune temperature significative nei due blocchi cementizi.

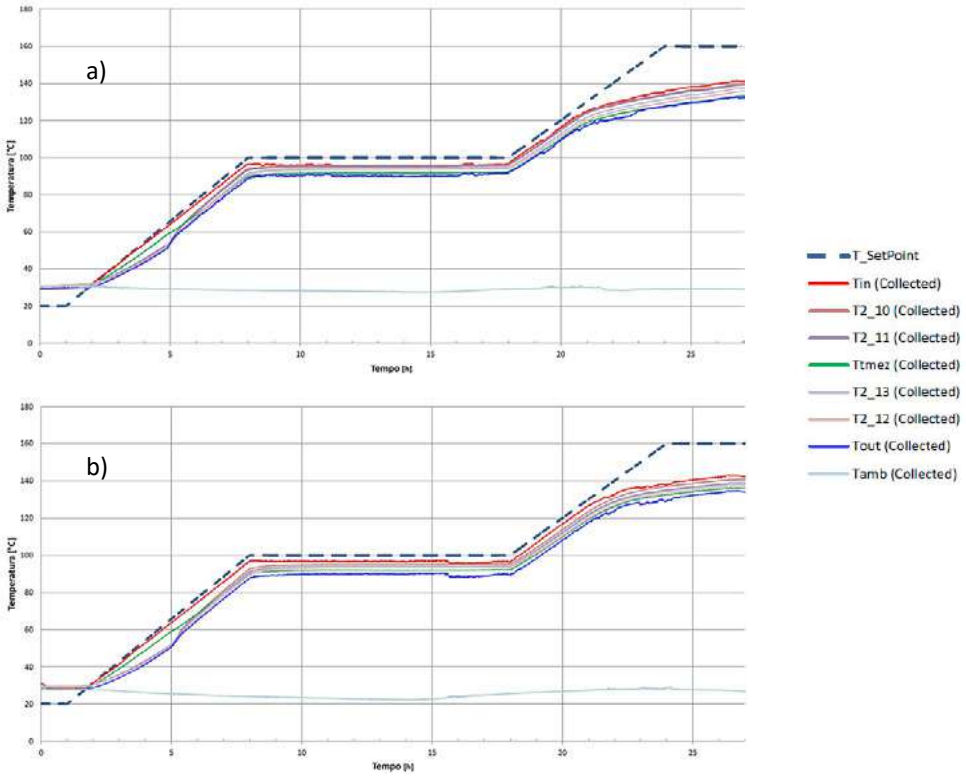


Figura 187. Andamento temporale delle temperature lungo il tubo di scambio nel test di degasaggio dei moduli realizzati rispettivamente da Italcementi-Università di Padova (a) e da Università di Trento (b)

Le sperimentazioni (riguardanti il degasaggio) non evidenziano scostamenti significativi nelle temperature rilevate dalle termocoppie T_{in} e T_{out} (Figura 188).

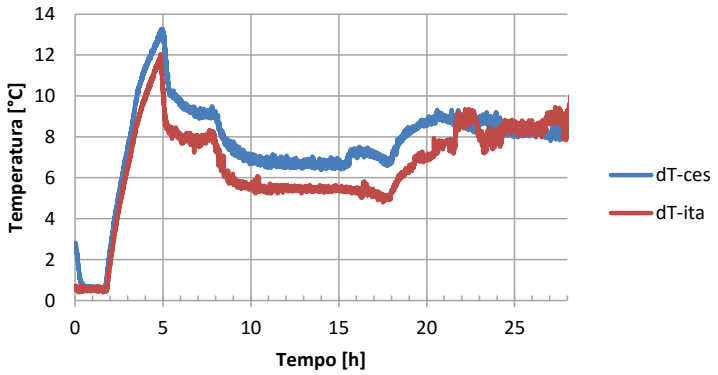


Figura 188. Confronto andamento del salto di temperatura ingresso uscita (T_{in}-T_{out})

Solo intorno alla 21-esima ora le temperature rilevate sul modulo UNIPD-Italcementi risultano più basse e ciò in concomitanza con l'incremento del gocciolamento. Intorno alla quinta ora in entrambi i test si nota una variazione di pendenza nell'andamento della T_{out} dovuto alla variazione di viscosità dell'olio. Fra le 10 e le 15 ore corrispondenti allo stazionario con il set-point dell'olio a 100 il modulo UNITN-Cestaro presenta un dT maggiore. Assumendo che in entrambe i casi la portata massica sia eguale ciò è indice di una maggior dispersione.

Si sono valutate le caratteristiche meccaniche dei due elementi di accumulo, mediante l'impiego degli ultrasuoni, (Figura 189) I test sono stati condotti con l'utilizzo di un apparecchio ultrasonoro Siro RP 5000 CSD sul materiale vergine e trattato termicamente.



Figura 189. Misura delle caratteristiche meccaniche con tecnica ad ultrasuoni dopo lo scassero dei moduli e dopo ciclo di degasaggio

In Figura 190 si riporta, a titolo di esempio, un ciclo della durata di circa 64 h di lento riscaldamento e raffreddamento per testare l'olio ed il materiali del modulo realizzato dall'Università di Trento, con coibentazione.

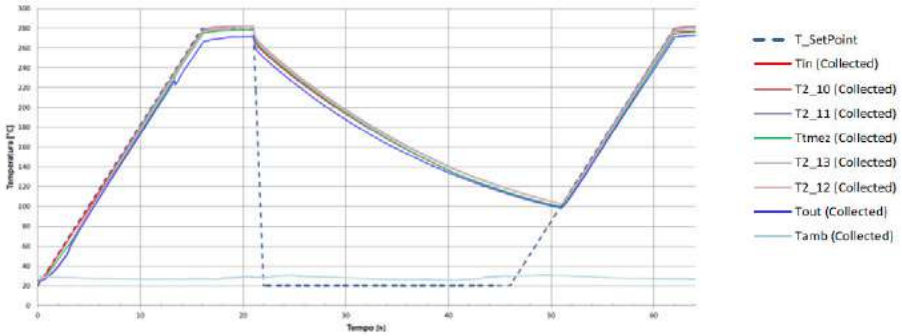


Figura 190. Andamento temporale delle temperature lungo il tubo di scambio nel test di lento riscaldamento e raffreddamento del modulo realizzato da UNITN

In Figura 191 è mostrato il confronto degli andamenti della temperature centrale dei due moduli. Nella fase di raffreddamento il modulo UNIPD-Italcementi mostra un transitorio più rapido dovuto alla minor inerzia termica (ρc_p) di quest'ultimo (1752 contro 1968 kJ/m^3 K).

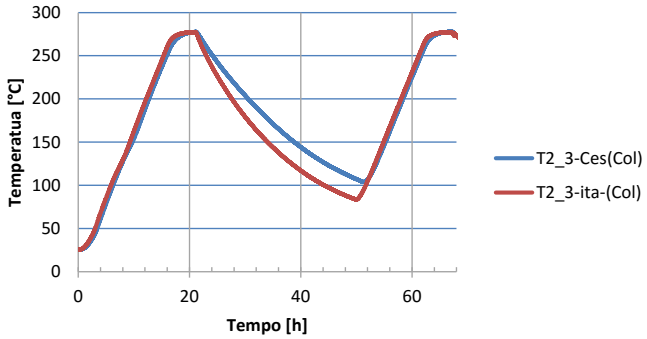


Figura 191. Confronto andamenti temperatura del calcestruzzo nel punto centrale della sezione di mezzeria

Allo stato attuale è stata completata la sperimentazione relativamente alla fase di degasaggio e sono state effettuate le prove preliminari per le fasi di caricamento e scaricamento ad alta temperatura. In ogni caso la sperimentazione effettuata ha fornito risultati sufficienti a verificare le caratteristiche principali sia del materiale di accumulo che del fluido termico utilizzato e sono state di ausilio all'Università di Padova per realizzare la messa a punto dei modelli di simulazione [RdS/PAR2014/120]. Il comportamento termico-meccanico di entrambi i moduli si è rivelato più che soddisfacente confrontato con quanto sperimentato in altre ricerche a livello internazionale. La mescola prodotta da UNITN presenta una maggior capacità termica e resistenza meccanica. La mescola realizzata da CTG-Italcementi Group, anche se ottenuta modificando un prodotto commerciale, finalizzato alla realizzazione di massetti per pavimenti radianti, ha mostrato nella sua attuale formulazione buone caratteristiche che con piccole modifiche mirate possono essere ulteriormente incrementate. Non si può tuttavia ritenere esaustiva la campagna sperimentale svolta, che andrebbe completata in modo da ottenere le informazioni sulle prestazioni e della durabilità del componente sottoposto ad un numero adeguato di ciclaggi, necessarie per la futura industrializzazione del prodotto.

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda ai rapporti RdS/PAR2014/118, RdS/2014/119 e RdS/2014/120.

c. Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia

Le attività hanno riguardato, nel caso di applicazioni del solare termodinamico ad impianti co-generativi di piccola taglia (< 1 MWe), lo studio, la progettazione e la caratterizzazione di sistemi per la generazione di energia elettrica di piccole dimensioni basati sull'esclusivo uso di energia da prelevare dal sistema di accumulo termico. Sono state analizzate diverse soluzioni impiantistiche, ed è stata scelta la migliore dal punto di vista tecnologico e dimostrativo nel rispetto del budget, ed è stato realizzato il progetto preliminare. Per le analisi sperimentali è stato utilizzato come sistema di accumulo il serbatoio a sali fusi dell'impianto PCS.

c.1 Installazione e prove preliminari di caratterizzazione del sistema cogenerativo innovativo con microturbina a vapore

Lo scopo dell'attività di ricerca è la progettazione, realizzazione e test sperimentale, di un sistema di produzione di energia elettrica basato su moduli standardizzati, che sia affidabile, richieda poca manutenzione e sia facilmente integrabile in un impianto solare con accumulo a sali fusi. I componenti principali di questi sistemi sono un generatore di vapore di caratteristiche innovative e una turbina a vapore che si caratterizza per i bassi costi di acquisto, elevata disponibilità e facile manutenzione.

L'attività di sviluppo condotta nei precedenti PAR (2012 e 2013) ha permesso di raggiungere i seguenti obiettivi:

- caratterizzazione termica di un serbatoio di accumulo di un impianto solare termodinamico a sali fusi, al fine di dimensionare e provare i sistemi cogenerativi che si intende sviluppare. Per lo sviluppo sperimentale è stato utilizzato il serbatoio di accumulo di energia termica dell'Impianto sperimentale PC ;
- individuazione di una turbina di bassa potenza, e basso costo, per una produzione dimostrativa di energia elettrica (max 2 kW elettrici). In collaborazione con l'Università Roma Tre, si è scelto di acquisire una turbina da 1,5 kWe della Turney Turbines LTD;
- definizione del progetto termo-fluidodinamico di un generatore di vapore che utilizza il calore ad alta temperatura disponibile nel serbatoio dell'Impianto PCS;
- definizione del P&ID di base del circuito acqua/vapore.

Nel PAR 2014 doveva essere installato l'impianto cogenerativo con microturbina a vapore, e dovevano essere realizzate le prove preliminari di caratterizzazione del sistema. Tutti i componenti sono stati acquisiti, non è stata possibile l'installazione a causa di un ritardo nell'assegnazione della gara di appalto della manutenzione ordinaria dell'impianto PCS. La gara non rientra nell'ambito del PAR, ma la mancanza di una ditta specializzata ha portato ad un ritardo nell'inizio dei lavori e si pensa di concludere entro il mese di novembre. L'attività verrà quindi completata nel corso del nuovo Piano Triennale.

L'attività effettuata nell'ambito del PAR 2014 ha riguardato la progettazione e la realizzazione delle principali attrezzature sperimentali. In particolare è stato effettuato il progetto esecutivo e la realizzazione del generatore di vapore di nuova concezione, che oltre ad essere di facile integrazione nel serbatoio di accumulo a sali fusi, è caratterizzato da bassi costi di realizzazione ed elevata affidabilità di esercizio. Per raggiungere questi obiettivi è stato ideato un generatore di vapore (GV), a circolazione forzata di tipo "once through" detto "a pozzo", costituito da un tubo elicoidale in cui si realizza il preriscaldamento e l'evaporazione dell'acqua di alimento e il surriscaldamento del vapore. Il tubo elicoidale è immerso in un contenitore cilindrico di acciaio contenente una miscela quaternaria di sali fusi, che in condizioni di esercizio è completamente immerso nella miscela binaria (60%

$NaNO_3$, 40% KNO_3), utilizzata sia come fluido termovettore sia come materiale di accumulo di energia termica nel serbatoio dell'Impianto PCS. La miscela quaternaria ha una temperatura di solidificazione inferiore a 100 °C, quindi il sale a contatto con la parete esterna del tubo elicoidale non riesce a solidificare. Questa scelta progettuale permette di eliminare il circuito di preriscaldamento e di alimentare direttamente il tubo elicoidale con acqua a temperatura ambiente. Il GV a pozzo è stato progettato per la produzione di vapore leggermente surriscaldato a pressione massima 12 bar e temperatura 200 °C necessaria per l'alimentazione della turbina a vapore. La fabbricazione è stata eseguita dalla Ditta Nuova STEIM di Narni, conformemente al disegno di progettazione meccanica elaborato da ENEA e riportato in Figura 192 insieme a foto del fascio tubiero elicoidale.

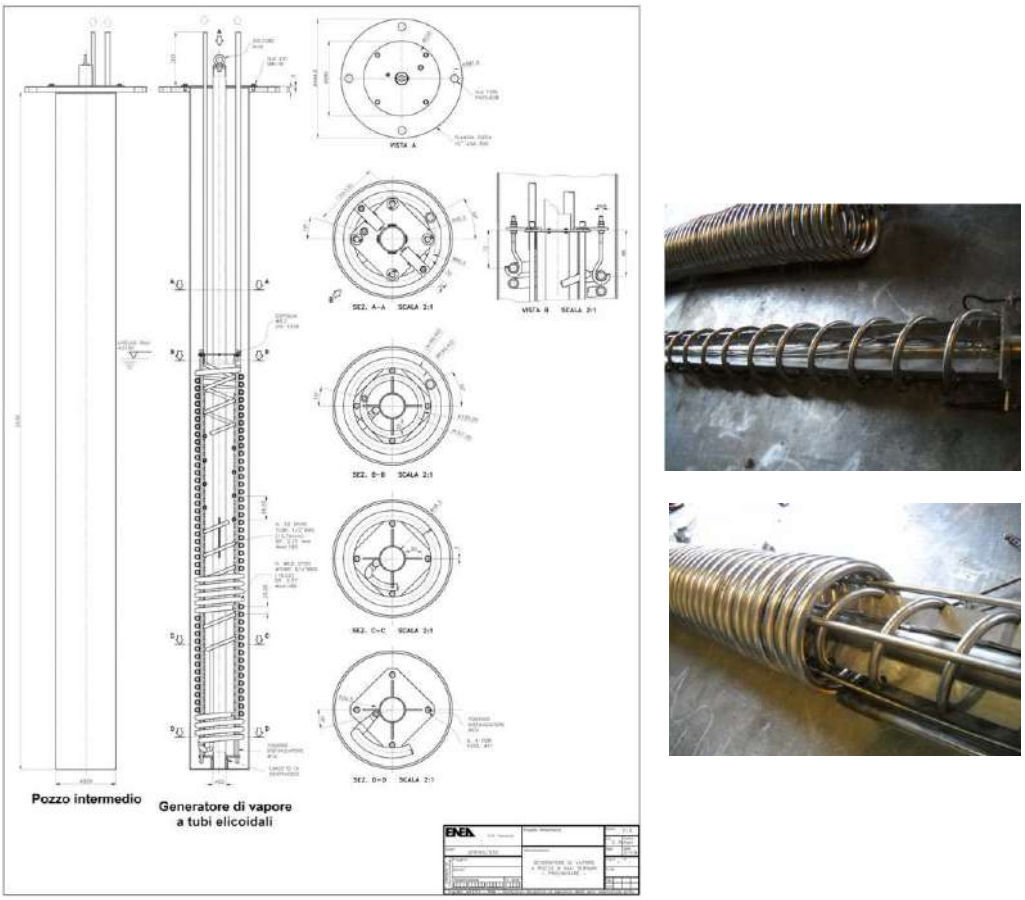


Figura 192. Disegno costruttivo del generatore di vapore

Per quanto riguarda la microturbina "Turney Turbines LTD" da 1,5 kWe è stato previsto un intervento di manutenzione straordinaria per il controllo dello stato dei materiali, dei livelli dei lubrificanti, del funzionamento dei cuscinetti, di ricondizionamento degli ugelli e infine la messa a norma secondo le vigenti leggi che regolano l'uso di queste macchina nel nostro Paese.

La manutenzione è stata affidata alla Nuova STEIM (la stessa che ha fabbricato il GV), che ha effettuato i lavori di revisione presso le sue officine di Narni, verificando la completa operatività di esercizio della macchina.

E' stato realizzato il P&ID del circuito acqua/vapore, definiti e acquisiti i relativi materiali (tubazioni, raccordi valvole) e la relativa strumentazione per il controllo dei parametri di funzionamento (termocoppie, misuratori di pressione e portata, misuratore di livello, pressostati, etc.).

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda ai rapporto RdS/PAR2014/122.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati, supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali

I risultati delle attività svolte nell'ambito del progetto sono diffuse agli utilizzatori e alla comunità scientifica tramite pubblicazioni su riviste scientifiche e partecipazioni a convegni nazionali ed internazionali. Questo

consente di confrontarsi con altri esperti del settore e di tenersi aggiornati sugli sviluppi più recenti delle tecnologie considerate; ai Ministeri competenti, alle pubbliche amministrazioni e all'industria nazionale tramite i documenti ufficiali prodotti e resi disponibili sul sito web ENEA.

Il 27 maggio 2015 è stato organizzato presso la sede ENEA di Roma, uno specifico workshop sulle attività di ricerca relative alla produzione di elettricità da solare termodinamico sviluppate nell'ambito dell'Accordo di Programma. All'evento hanno partecipato i principali soggetti coinvolti direttamente nello svolgimento delle attività, e sono stati invitati vari interlocutori del settore sia in ambito scientifico che industriale. L'obiettivo è stato quello di fare il punto sullo stato dell'arte del settore ed evidenziare possibili aree specifiche di interesse. Nel corso dell'evento sono state illustrate le principali attività svolte anche durante le precedenti annualità e gli obiettivi di quelle attualmente previste. Tutti i documenti che descrivono in dettaglio le attività svolte ed i risultati ottenuti sono resi pubblici tramite il sito web ENEA nella sezione dedicata alla Ricerca di Sistema Elettrico.

Nell'ambito delle attività relative allo studio e sviluppo di sistemi innovativi di accumulo termico l'attività di diffusione dei risultati nel corso del PAR 2014 ha comportato la presentazione di memorie ed articoli a congressi e la stesura di tesi di laurea.

ENEA svolge azioni di supporto tecnico-scientifico ai Ministeri per la definizione di un quadro nazionale di riferimento, che guidi gli operatori coinvolti nel settore del solare termodinamico, in linea con quanto previsto dalla Strategia Energetica Nazionale, che individua questa tecnologia come una delle più promettenti per sviluppi industriali nel medio temine.

ENEA partecipa inoltre alle collaborazioni in corso nel settore, sia a livello europeo che internazionale, essenziali per indirizzare le attività di ricerca, stabilire sinergie con i principali attori non nazionali e acquisire risorse nell'ambito dei progetti europei. In particolare, tale partecipazione riguarda i gruppi di lavoro dell'European Energy Research Alliance (EERA), l'Implementing Agreement dell'IEA SolarPACES e la European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA).

La partecipazione dell'ENEA all'Implementing Agreement dell'IEA SolarPACES riguarda specificamente la tecnologia solare termodinamica e la produzione di combustibili di origine solare per via termica. SolarPACES riunisce esperti di 20 paesi e comprende 6 Task operativi ((Impianti, Chimica Solare, Tecnologia dei componenti, Calore di processo, Risorse solari, Dissalazione solare). Il Comitato esecutivo (ExCo) di SolarPACES si riunisce due volte l'anno, una delle quali in occasione della Conferenza annuale che è l'evento più importante sul piano scientifico. I task sono a loro volta suddivisi in un numero variabile di gruppi di lavoro (WG) su temi specifici.

Tramite la partecipazione a SolarPACES anche altre realtà operative nazionali nel campo della ricerca sul solare termodinamico a concentrazione hanno la possibilità di partecipare (a proprie spese) alle attività dei Task; in particolare quest'anno la società Archimede Solar Energy (ASE).

La partecipazione ai gruppi di lavoro ha particolare importanza soprattutto per mantenere l'aggiornamento e poter influire sulla predisposizione delle linee guida e degli standard normativi, che vengono poi normalmente recepiti in sede di normativa internazionale (IEC e AENOR).

L'ENEA partecipa attivamente con propri ricercatori nei Task I (impianti), II (Chimica solare), III (componenti) e VI (applicazione a processi termici quali la dissalazione dell'acqua).

Sintesi delle attività 2014/2015

L'attività SolarPACES nel periodo ottobre 2014/settembre 2015 ha comportato:

- l'organizzazione del Comitato esecutivo (ExCo) di SolarPACES in Italia;
- il contributo ai lavori del Task I (Impianti), Task II (Chimica solare) e Task III (guidelines su misure di riflettanza, misura della qualità ottica dei collettori e misura delle prestazioni dei prototipi di sistemi di accumulo).

Di seguito una breve sintesi del contributo ENEA e del meeting del Comitato Esecutivo.

- *Task I* - Sono proseguiti contatti con il costituendo gruppo per la realizzazione di uno studio, finanziato con fondi SolarPACES dal titolo "The value of Concentrated Solar Power in electricity markets with variable energy sources". La Germania, tramite l'Università di Aachen, ha proposto di realizzare con il proprio codice "ESYS" una simulazione di alcuni scenari di rete in cui sia presente una quota significativa di impianti solari a concentrazione. Fra i paesi candidati su cui applicare le simulazioni il coordinatore NREL ha per ora selezionato Spagna e Sud Africa; Italia e Australia hanno espresso interesse a far parte attiva dello studio, la questione sarà discussa a ottobre a Cape Town.
- *Task II* - Sono proseguite le attività sulla chimica solare in ambito STAGE-STE.

- *Task III* - Sono proseguite le attività nel campo delle misure sull'ottica degli specchi concentratori, sulle misure termiche sui ricevitori lineari e sui sistemi di accumulo.

Meeting del Comitato esecutivo

Il meeting primaverile del Comitato esecutivo (ExCo) è stato organizzato in Italia, a Roma, dal 24 al 26 marzo 2015. Due giornate del meeting sono state dedicate, come di consueto, alle presentazioni nazionali e agli aspetti generali e organizzativi. Nella mattinata del 26 si è svolta la visita ai laboratori ENEA della Casaccia; sono stati visitati gli impianti MOSE, con le sezioni di prova che afferiscono ai progetti Comethy e Hysol, finanziati dall'Unione Europea, e l'impianto prova Collettori Solari, PCS.

Nel pomeriggio del 26 marzo si è svolta la visita agli stabilimenti di Archimede Solar Energy (ASE) di Massa Martana, dove è stato possibile assistere al funzionamento del circuito sperimentale a sali fusi, con 6 collettori parabolici da 100 m ciascuno, e visitare la fabbrica di tubi ricevitori,.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Perugia è inserita nel Subtask b.2 "Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di sistemi di accumulo termico a media temperatura", ed è relativa allo studio, alla produzione e alla caratterizzazione di materiali a cambiamento di fase a media temperatura (200-250°C) con proprietà termiche incrementate [rapporto RdS/PAR2014/115]. Nella prima parte del lavoro, si è cercato di produrre un nanoPCM con maggior calore specifico ma soprattutto con incrementate conducibilità e diffusività termiche utilizzando nanoparticelle a base di carbonio. Nella seconda parte sono stati invece sviluppati materiali cementizi innovativi (aggiungendo diversi additivi tra cui anche materiali a cambiamento di fase in capsule e non) con lo scopo di incrementarne la conducibilità termica ed essere utilizzati come materiali di accumulo termico a calore sensibile.

Studio, sviluppo e caratterizzazione di una miscela di PCM e nanoparticelle metalliche e nanotubi con temperatura di fusione di circa 220°C

Sulla base dei risultati della sperimentazione svolta nella precedente annualità [rapporto RdS/PAR2013/227] si è deciso di sviluppare nuovi nanoPCM in soluzione acquosa utilizzando come PCM sempre la miscela di sali $NaNO_3$-KNO_3 con rapporto 60:40 (T_m=220 °C) ma aggiungendo delle nanoparticelle a base di carbonio. Sono state aggiunte nanoparticelle a base di carbonio (nanotubi e nanoplacchette di grafene) all'0,2-0,5-1,0% in peso e sono stati prodotti diversi nanoPCM, utilizzando la metodologia messa a punto nel PAR precedente.

I valori medi del calore specifico dei nanoPCM con nanotubi diminuiscono quasi tutti allo stato liquido mentre aumentano tutti allo stato solido. L'unico nanoPCM per il quale è stato riscontrato un miglioramento di capacità termica sia allo stato solido che liquido è stato quello costituito dall'1,0% di nanotubi di carbonio (CNT) con un incremento del 12,5% e 17,3% rispettivamente. Il massimo calore specifico in fase solida (67,2%) invece è stato ottenuto con l'1,0% di CNT con 1.0% di disperdente (sodio lauril solfato, SLS). Per i nanoPCM prodotti con nanoplacchette di grafene (GNP) il migliore nanoPCM è risultato quello con lo 0,5% di GNP per il quale l'incremento di calore specifico è stato del 54,6% in fase solida e 6,7 % in fase liquida. La conducibilità e diffusività termiche dei nanoPCM con CNTs diminuiscono quasi tutte. L'unica eccezione è data dal nanofluido costituito da sali con l'aggiunta dello 0,2% di CNTs (senza disperdente) per i quali è aumentata notevolmente sia la conducibilità termica che la diffusività termica. La presenza del surfattante SLS produce solo un aumento del calore specifico in fase solida mentre la conducibilità termica degli stessi campioni diminuisce a discapito anche della diffusività. Questo, è stato un fattore determinante nell'esclusione delle miscele con SLS, come potenziali soluzioni. Anche per i nanofluidi con GNP la conducibilità e la diffusività sono risultate inferiori rispetto al PCM di base. Ciò potrebbe essere dovuto alla bassa percentuale di GNP aggiunta. Dall'analisi morfologica con SEM, infine, si è visto come nei campioni di miscela che presentano un valore alto di conducibilità termica sono presenti agglomerati visibili di nanoparticelle, mentre in quelli che presentano un basso valore di conducibilità termica, a favore di un più elevato calore specifico allo stato solido, la dispersione delle nanoparticelle è più uniforme. Dalla letteratura è noto che gli agglomerati di nanoparticelle se da un lato impediscono un aumento del calore specifico rispetto a una dispersione più uniforme delle nanoparticelle, dall'altro lato si è stato riscontrato che se questi agglomerati vanno a completare dei percorsi tra le particelle del sale si ha un aumento del trasferimento di calore, quindi della conducibilità termica. Si può concludere quindi che dalla caratterizzazione dei nanofluidi ha portato a stabilire

come miglior nanofluido quello costituito da sali con l'aggiunta dello 0,2% di CNTs (senza disperdente) per i quali è aumentata notevolmente la conducibilità termica (46,3%) e la diffusività termica (35,8%) e il calore specifico allo stato solido (8,6%), rispetto al sale base. Per questo motivo può essere considerata la percentuale ottimale di nanoparticelle.

Studio, sviluppo e caratterizzazione di un cemento con capsule di PCM come mezzo di accumulo termico

I sistemi di accumulo termico che possono essere installati in impianti ad energia solare utilizzanti la tecnologia CSP) possono essere anche di tipo indiretto (Indirect Thermal Energy Storage). In questo caso il fluido termovettore cede calore ad un diverso mezzo di accumulo. Se si utilizzano materiali solidi ad esempio l'accumulo sarà a calore sensibile. A tale scopo è possibile utilizzare materiali quali il calcestruzzo (si parla in questo caso di concrete storage). Il calcestruzzo come materiale per il Thermal Energy Storage (TES) ha diversi vantaggi quali il basso costo e la facile reperibilità dei componenti, facilità di produzione. Nel presente lavoro per incrementare la capacità di accumulo termico a medie temperature dei cementi è stato ipotizzato l'uso di particolari malte cementizie in cui inserire diversi tipi di additivi in grado di aumentare le proprietà termiche quali la diffusività termica e la conducibilità termica. Tra questi sono stati utilizzati anche materiali PCM che assorbono calore latente durante le trasformazioni di fase in modo da aumentare il calore complessivamente accumulato. In questo caso quindi si utilizzerebbe sia il calore sensibile che il calore latente. Al fine di migliorare le proprietà termiche di cementi tradizionali sono state quindi ideate e sviluppate delle malte cementizie innovative ottenute con diverse formulazioni. Sono state analizzate le caratteristiche termiche e meccaniche di malte ottenute con l'aggiunta di diversi materiali sia in polvere che sotto forma di capsule. I risultati ottenuti dai test sono stati poi confrontati con gli stessi ricavati da prove effettuate su provini in malta non additivata. In particolare le microcapsule da inserire nel cemento dovevano avere delle dimensioni di circa 2-10 mm. Si tratta quindi di capsule di dimensioni tali da poter essere prodotte con metodi più diretti rispetti a quelli che prevedono la produzione di nano capsule. La malta base considerata è una malta a basso contenuto d'acqua (rapporto a/c=0,45) in quanto l'acqua contenuta nella malta è influenzata dai cicli di riscaldamento a cui il cemento come sistema di accumulo è sottoposto durante il suo utilizzo.

Nel presente lavoro è stato quindi considerato l'effetto della temperatura sul contenuto d'acqua e sulle caratteristiche termiche e meccaniche delle malte cementizie sviluppate. La malta base è costituita da cemento Portland di tipo 42.5, sabbia 0-4 mm e acqua. I materiali aggiunti alla malta base sono: PCM in polvere, PCM in polvere e PVAc, aggregati di PCM, PCM in capsule, PCM e diatomite. È stata tentata anche l'aggiunta di idrotalcite ma non ha portato a nessun miglioramento. Come PCM è stata usata la miscela di sali composta da 40% di nitrato di potassio e 60 % di nitrato di sodio, utilizzati ad una temperatura superiore alla temperatura di fusione. La scelta è stata fatta sulla base della loro potenziale capacità di incrementarne le caratteristiche di capacità e diffusività termiche. Inoltre è un materiale già ampiamente testato dall'ENEA e pertanto si è pensato di utilizzarlo come PCM per incrementare le capacità di accumulo della malta. In primo luogo si è pensato di utilizzare questa miscela direttamente in polvere all'interno dell'impasto. Successivamente è stata testata una malta con aggiunta di sali miscelati con acetato di polivinile come disperdente. Gli aggregati di sali invece sono stati ottenuti dalla miscela di sali solidificata, schiacciata e setacciata fino a raggiungere un diametro di circa 2÷10 mm. Dagli stessi aggregati sono state poi ottenute le capsule di PCM: essi infatti sono stati incapsulati da uno strato di PVAc in modo da formare un guscio protettivo e lasciati indurire prima di mescolarli con gli altri ingredienti della malta (gli aggregati di sale sono stati immersi uno ad uno nel PVAc lasciandoli asciugare all'aria un giorno). Le capsule così ottenute risultano ricoperte da una pellicola solida e compatta. Lo scopo è di mantenere il PCM confinato all'interno del guscio di PVAc una volta portato a fusione in modo da non fuoriuscire all'interno della malta. I PCM anziché incapsulati sono stati inseriti in strutture di supporto e fatti assorbire da un'argilla. In questo lavoro è stata scelta la diatomite che è una farina fossile che osservata al microscopio a scansione elettronica (SEM) mostra un'ampia varietà di diatomee (radiolari, cilindriche, aghiformi, ecc.) che presentano delle cavità. Nel nostro caso si è cercato di impregnare la diatomite facendo inserire il PCM all'interno di queste cavità. Dopo diversi tentativi l'impregnazione migliore è stata ottenuta miscelando sali e diatomite in polvere (80:20) e poi portandoli a 300 °C per 5 ore. In questo caso si è notata subito una maggiore impregnazione della diatomite e anche più uniforme. In Figura 193 sono riportati alcuni dei materiali aggiunti alle malte cementizie.

Tutte le malte sono state sottoposte a prove di flessione e compressione, e a test di conducibilità termica e diffusività termica per valutarne le caratteristiche dopo 28 giorni di maturazione. Inoltre, dato che il materiale destinato ad essere usato come accumulatore di calore sarà sottoposto ad elevate temperature è importante analizzare l'effetto di queste temperature su ogni miscela cementizia. Gli stessi provini prodotti per la conducibilità termica dopo i 28 giorni sono stati pesati e sottoposti a ciclaggio termico in forno (riscaldamento da 25 a 105 °C ad una velocità di 12 °C/ora, poi mantenimento a 105 °C per 48 ore, riscaldamento fino a 150 °C e mantenimento a 150 °C per 16 ore, seguito da un riscaldamento a 200 °C, mantenimento a 200 °C per 16 ore, riscaldamento fino a

250 °C e mantenimento a 250 °C per 16 ore). La velocità di riscaldamento è stata tenuta volutamente molto bassa (12 °C/ora) in modo da non creare delle cricche nei materiali. I campioni una volta raffreddati sono stati pesati e sottoposti a test di conducibilità e diffusività termica.



a) b) c) d)

Figura 193. Aggregati di sali (a), capsule di sali (b), diatomite (c), sali/diatomite (d)

La maggiore resistenza a flessione si ha per la malta con sali/diatomite con un incremento di circa l'80% mentre si può notare che l'aggiunta di PVAc ai sali in polvere sembra indebolire la malta rendendola troppo "plastica" facendone diminuire la resistenza di circa il 22%.

Per le malte con sali in polvere e con capsule di sali (con e senza PVAc) la resistenza a compressione diminuisce. In particolare la diminuzione di resistenza meccanica delle malte con capsule di PCM può essere attribuita al fatto che il volume delle capsule è considerato come un vuoto ossia una mancanza di inerte nell'impasto. Anche in questo caso si riscontra un peggioramento della resistenza a compressione per le malte con aggiunta di sali in polvere e PVAc (-60,4%) e un incremento del 30% con sali e diatomite.

Le miscele cementizie che hanno mostrato la più alta conducibilità termica (pari a circa 1,6 W/mK) sono quelle con i sali in polvere e con i sali miscelati a diatomite con un incremento massimo del 18% con i sali in polvere. Per quanto riguarda la diffusività i risultati migliori sono stati ottenuti con l'aggiunta di sali in polvere che portano ad un incremento del 14%. Buoni risultati sono stati raggiunti anche con sali e diatomite e con sali in capsule. I sali in polvere miscelati con il PVAc hanno invece un effetto deleterio sulla diffusività termica. Per quanto riguarda il ciclaggio termico, alla fine di ogni ciclo i provini sono stati osservati e si è notato che in nessun caso c'è stata una fuoriuscita del componente aggiunto (i sali nelle varie forme in cui sono stati inseriti o idrotalcite). la conducibilità termica delle malte cementizie (additivate e non) diminuisce all'aumentare della temperatura ma la malta a cui è stata aggiunto il 2% di sali/diatomite è quella con più alto valore di conducibilità anche dopo 250 °C. In generale, sia la conducibilità che la diffusività diminuiscono maggiormente dopo i 105 C. Per le altre temperature i valori sono sostanzialmente costanti. Per quanto riguarda la diffusività i valori più elevati sono sempre dovuti all'aggiunta del 2% di sali in polvere o di sali con diatomite o sali in capsule. Al termine del ciclaggio termico si rileva una perdita di peso che in generale aumenta con l'aumentare della temperatura ma la perdita più evidente si ha tra la temperatura ambiente e i 105 °C. I campioni di malte cementizie che hanno subito il ciclo termico infatti subiscono dapprima una disidratazione (a 105 °C) che comporta una diminuzione di peso dovuta all'acqua libera che evapora. Successivamente perdono l'acqua legata ancora presente nelle malte. Tra tutte le miscele prodotte, quella con malta e sali in polvere sembra risentire di più del ciclaggio termico in termini di peso. Probabilmente ciò è dovuto alla presenza di umidità assorbita dai sali che sono notoriamente molto igroscopici.

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Padova è inserita nel Subtask b.4 "Prove sperimentali e simulazione del comportamento termo-dinamico di un sistema di accumulo termico a calore sensibile in cemento", e ha riguardato la progettazione termomeccanica di un elemento di accumulo, la sua realizzazione con mescola sviluppata da CTG Italcementi Group, e lo sviluppo di modelli di simulazione con i quali analizzare il comportamento termomeccanico del modulo sottoposto a ripetuti ciclaggi termici utilizzando i risultati della sperimentazione effettuata dall'ENEA presso i propri laboratori.

In particolare l'attività effettuata dall'Università di Padova [rapporto RdS/PAR2014/120], ha comportato la progettazione di un elemento di accumulo, con lo scopo di effettuare una sperimentazione atta a caratterizzare un corretto mix design del calcestruzzo per massimizzare lo stoccaggio del calore, per un suo utilizzo come sistema di accumulo termico in un impianto solare a concentrazione a media temperatura.

Sono stati inoltre sviluppati modelli ad elementi finiti tridimensionali in grado di simulate il funzionamento dell'elemento di accumulo durante i cicli transitori dell'impianto. Il modello è in grado di simulare il processo di

scambio termico tra il fluido termovettore e l'elemento di accumulo sia in fase di carica (assorbimento di calore da parte dell'elemento di accumulo grazie alla presenza del fluido termovettore caldo circolante al suo interno) che in fase di scarica (fluido freddo e cessione di calore da parte dell'elemento di accumulo) avendo come dati di input la velocità del fluido e la sua temperatura in ingresso. Le analisi condotte sono state di tipo transitorie non lineari tenendo in considerazione, oltre all'effetto di conduzione del calore tra gli elementi solidi e liquidi, anche l'effetto di convezione termica generato dalla presenza di un fluido in movimento. Il modello è stato inoltre verificato utilizzando la sperimentazione effettuata presso i laboratori ENEA, con un ottimo accordo con i risultati sperimentali.

L'elemento di accumulo è realizzato in calcestruzzo armato di lunghezza 3000 mm e sezione trasversale 200 mm × 200 mm (Figura 194). All'interno dell'elemento in calcestruzzo è stato annegato il tubo di scambio termico in acciaio, di diametro esterno D_e = 16 mm e diametro interno D_i=14 mm. L'elemento non ha scopi strutturali, ma dovrà resistere alle operazioni di messa in opera.

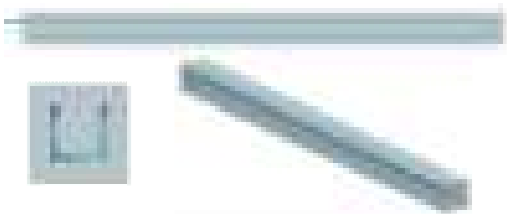


Figura 194. Schema elemento di accumulo

Il progetto dell'armatura è stato eseguito per una condizione termica "a freddo" (una generica condizione ambientale con T < 100°C); non viene quindi considerata la condizione "a caldo" (temperature superiori ai 100°C), presente durante le fasi di utilizzo del provino nell'impianto test. L'elemento dovrà quindi resistere al solo peso proprio durante le fasi di movimentazione.

E' stata effettuata un'analisi dei carichi e delle sollecitazioni cui è sottoposto l'elemento e sono state effettuate verifiche a flessione, a fessurazione (SLE), a taglio ed è stata valutata la freccia massima.

Per la realizzazione degli elementi di accumulo, sono stati presi in esame due differenti mix design di calcestruzzo. Il primo è stato fornito da CTG Italcementi Group ed è denominato UNIPD-Italcementi; la seconda miscela di calcestruzzo è stata invece fornita dall'Università di Trento, denominata UNITN-Cestaro. La realizzazione del tubo accumulatore per entrambi i provini è stata eseguita impiegando un acciaio di tipo AISI 316; in questa indagine sperimentale si è inoltre impiegato come fluido termovettore olio diatermico (Oil), in grado di raggiungere le temperature massime previste (300 °C). In Tabella 64 sono stare riassunte le principali caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali impiegati.

Tabella 64. Caratteristiche fisiche dei materiali impiegati

	UNIPD-Italcementi		UNITN-Cestaro		AISI 316	Oil
	T>100C	T ≤ 100C	T>100C	T ≤ 100C		
ρ [kg/m^3]	1837	1955	2400	2450	8341	760
c_p [J/kgC]	930,	954,0	820,0	830,0	378,0	280,5
k [W/mC]	1,80	2,50	2,21	2,68	20,00	0,10
E [MPa]	8000		41000		210000	-
f_{ck} [MPa]	8,0		36,0		280,0	-

Si può osservare come i materiali cementizi impiegati presentino migliori caratteristiche termiche rispetto a materiali cementizi tradizionali**.**

La realizzazione del modulo è stata effettuata presso lo stabilimento di Calusco d'Adda. Il cassero è stato prodotto tenendo conto delle seguenti esigenze: facilità di estrazione del modulo, riusabilità, rispetto delle specifiche geometriche e salvaguardia del getto durante le operazioni di movimentazione e trasporto. Le armature di rinforzo, rispetto a quanto previsto da valutazioni condotte per un calcestruzzo di caratteristiche meccaniche ordinarie, sono state realizzate con bare ad aderenza migliorata Ø8 invece di Ø6; il conglomerato in oggetto, infatti, ha resistenze, tipiche dei massetti per pavimentazione e non di un utilizzo prevalentemente strutturale. Ciò ha comportato alcune difficoltà nel posizionamento del tubo di scambio all'interno dell'armatura.

I test sperimentali sono stati condotti dall'ENEA, utilizzando un apposito circuito, facendo scorrere all'interno di un tubo di scambio immerso nel calcestruzzo un fluido termovettore (in questo caso olio diatermico) a velocità e temperatura controllata. L'olio caldo, scorrendo all'interno del tubo, inizialmente cede calore al calcestruzzo che incrementa la sua temperatura immagazzinando calore. Successivamente il ciclo è stato invertito facendo raffreddare il sistema o per convezione naturale o facendo circolare olio freddo, riscaldato dal calcestruzzo caldo, durante la circolazione.



Figura 195. Posizionamento del tubo di scambio nel cassero e per la realizzazione del getto

Sono stati eseguiti due tipologie di test: di degassaggio con temperature massime di 140 °C, e di riscaldamento e graduale raffreddamento con temperatura massima pari a 300 °C. Il degassaggio ha lo scopo di togliere l'acqua libera presente all'interno del calcestruzzo per impedire o limitare il più possibile che vaporizzi quando il calcestruzzo supera la temperatura di ebollizione. La vaporizzazione dell'acqua all'interno della matrice cementizia comporterebbe un incremento della pressione interna del materiale che potrebbe portare al suo danneggiamento o nei casi più gravi a fenomeni di spalling esplosivi. Questa procedura deve garantire all'acqua la possibilità di poter fuoriuscire dal materiale che quindi non può essere coibentato.

Il test consiste nel far salire molto lentamente la temperatura fino a 100 °C (per un tempo di 7 ore). Successivamente la temperatura è stata mantenuta per le successive 10 ore. Per monitorare se il degassaggio fosse avvenuto correttamente è stato effettuato un incremento di temperatura fino a 160 °C in 6 ore ed una fase di mantenimento di altre 4 ore. Alla fine dell'ultima fase di mantenimento è stato spento l'impianto e il suo raffreddamento è stato effettuato per convenzione naturale.

La temperatura nel provino è stata monitorata mediante l'utilizzo di termocoppie applicate sia sulle facce esterne che annegate internamente al getto di calcestruzzo; ciò ha permesso di avere notevoli informazioni sulla distribuzione tridimensionale della temperatura nel sistema di accumulo. E' stato sviluppato un modello matematico semplificato del modulo di accumulo che impone nota la velocità del fluido, assunta costante su tutta la sezione del tubo scambiatore. Con questa semplificazione è stato possibile impiegare le classiche analisi transitorie termiche senza sviluppare modelli più complessi di tipo fluidodinamici a vantaggio delle tempistiche di elaborazione e potendo sfruttare solutori di tipo implicito. I modelli numerici, realizzati con il codice commerciale ad elementi finiti ABAQUS, considerano una geometria tridimensionale per la rappresentazione del comportamento termico del calcestruzzo, del tubo in acciaio e del fluido termovettore (Figura 196).

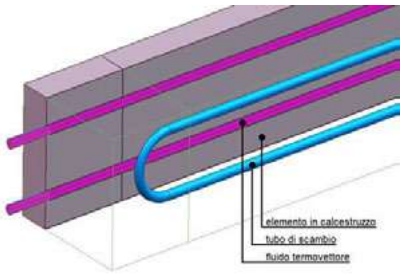


Figura 196. Sezione modello 3D

Le analisi hanno avuto lo scopo di simulare le prove riguardanti i cicli di degassaggio, effettuate nei provini descritti precedentemente. È stato eseguito un primo riscaldamento del fluido in moto con una velocità di 1,1 m/s, partendo dalla temperatura ambiente di circa 30 °C fino a circa 100 °C in 8 ore. Questo primo step di carico è stato poi mantenuto per altre 8 ore per effettuare il degassaggio del calcestruzzo. Successivamente il fluido termovettore è stato portato ad una temperatura massima pari a circa 140 °C in circa 12 ore e l'impianto è stato poi bloccato portando a zero la velocità del fluido; imponendo così un raffreddamento naturale per i due moduli di accumulo.

Nel campione UNIPD-Italcementi, è stato riscontrato un elevato quadro fessurativo durante le fasi di riscaldamento, dovuto alla variazione di deformazione termica tra le barre in acciaio e il tubo accumulatore immersi nel getto e la bassissima resistenza a trazione di questa miscela di calcestruzzo. Si è inoltre osservato un notevole trasferimento di massa (fuoriuscita di acqua dal provino durante le fasi di degassaggio). Questi effetti hanno presumibilmente comportato una variazione sia della conducibilità termica del materiale che del coefficiente di scambio tra calcestruzzo e ambiente, che possono essere evidenziati dal confronto della temperatura superficiale del calcestruzzo nella sezione centrale (Figura 197).

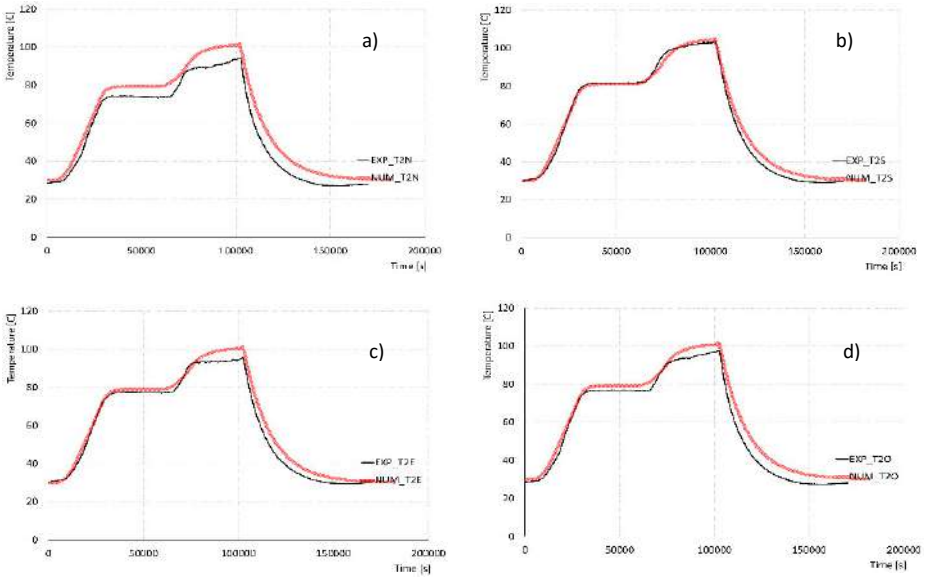


Figura 197. Provino UNIPD-Italcementi. Confronto della temperatura sul perimetro esterno nella sezione di mezzeria del provino in corrispondenza dei punti: a) Nord, b) Sud, c) Est, d) Ovest

Analoghe analisi sono state fatte per il provino UNITN-Cestaro (Figura 198).

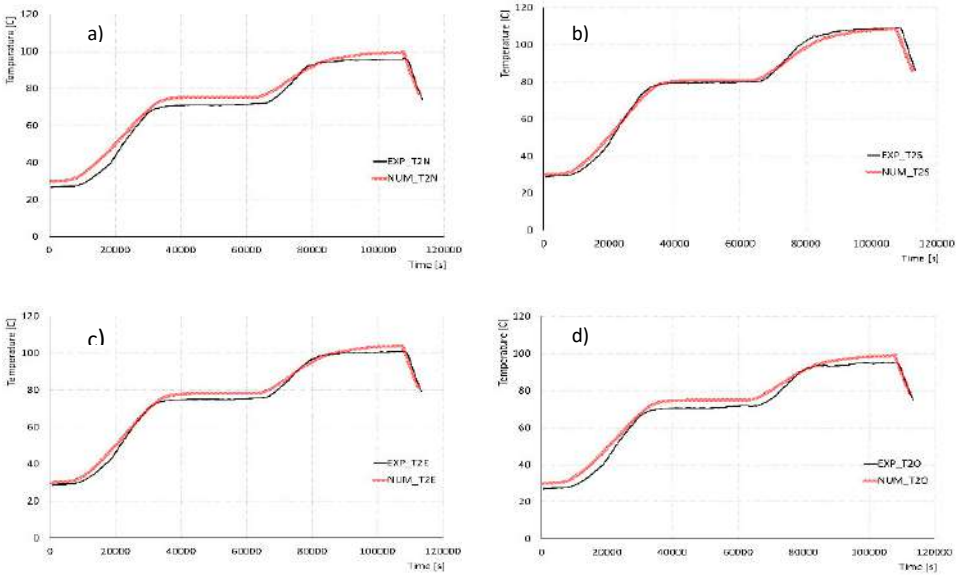


Figura 198. Provino UNITN-Cestaro. Confronto della temperatura sul perimetro esterno nella sezione di mezzeria del provino in corrispondenza dei punti: a) Nord, b) Sud, c) Est, d) Ovest

Ad ogni modo anche per questo campione le variazioni di temperatura tra risultati numerici e quelli sperimentali sono risultate piuttosto contenute (attorno al 3%) e ciò permette di dire che il modello numerico è in grado di simulare correttamente l'accumulo di temperatura del modulo studiato sia durante i processi transitori che durante le fasi stazionarie.

Dalle analisi eseguite si è potuto constatare che i modelli numerici sviluppati sono stati in grado di cogliere, in modo sufficientemente corretto, il comportamento termico del sistema osservato sperimentalmente. Le simulazioni condotte hanno però considerato solo il problema da un punto di vista termico, trascurando alcuni effetti quali: il trasferimento di massa intesa come fuoruscita di acqua dal calcestruzzo durante le fasi di riscaldamento ed accentuati quadri fessurativi riscontrati sperimentalmente. Questi effetti hanno comportato una variazione dello scambio termico del provino con l'ambiente ed una variazione di conducibilità termica locale del materiale, considerate qui solo tramite variazioni delle condizioni al contorno del problema.

Per una miglior comprensione di questi effetti sul sistema di accumulo sia nel breve che nel lungo periodo (durante i ripetuti cicli termici che un impianto solare è soggetto), la presente attività di ricerca dovrebbe proseguire andando a sviluppare modelli di simulazione termo-igro-meccanici in grado di considerare sia il comportamento dell'acqua all'interno dell'elemento di accumulo durante le fasi di riscaldamento nonché dell'interazione tra effetti termici e danneggiamento (fessurazioni) dello scheletro solido.

Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Trento [rapporto RdS/PAR2014/119] è inserita nel Subtask b.4. "Prove sperimentali e simulazione del comportamento termo-dinamico di un sistema di accumulo termico a calore sensibile in cemento", ed è stata relativa allo studio e sviluppo di nuove mescole di calcestruzzo per utilizzo come sistema di accumulo a media temperatura (250-300°C), e nella produzione di moduli base di accumulo per la sperimentazione in un apposito circuito messo a punto presso i laboratori dall'ENEA.

Lo scopo di questo lavoro è stato la produzione e la caratterizzazione di un prototipo di modulo di accumulo di calore, impiegando come mezzo di raccolta, un calcestruzzo innovativo, sviluppato nella precedente campagna di ricerca. È stato realizzato un prototipo su scala di laboratorio più complesso dei precedenti: la tubazione (piping) immersa nella matrice cementizia ha una geometria più complessa del semplice tubo con ingresso e uscita. Essa convoglierà un fluido termovettore adatto a temperature di esercizio variabili tra 150 - 300 °C.

La scelta del calcestruzzo come materiale per il Thermal Energy Storage (TES) nasce da una somma di considerazioni: è un materiale a basso costo, facilmente reperibile, facile da produrre, durevole, i suoi ingredienti principali sono disponibili ovunque, e i suoi componenti non pongono problemi critici dal punto di vista ambientale. Inoltre grazie al suo calore specifico, alle proprietà meccaniche, quali la resistenza a compressione e un coefficiente di espansione termica simile a quello dei tubi d'acciaio dello scambiatore, garantisce un'elevata resistenza meccanica alle sollecitazioni termiche cicliche già nella formulazione ordinaria.

A tal proposito è stato valutato con un'accurata analisi microstrutturale, il danneggiamento di un modulo di accumulo, prodotto con una precedente mescola, testato attraverso ciclaggio termico presso i laboratori ENEA. Si è concluso che le cricche presenti in superficie si propagano anche verso l'interno, rimanendo sempre ortogonali all'asse principale dell'elemento non modificando i processi di trasporto dell'energia termica. Il calcestruzzo rimane adeso alla tubazione in acciaio grazie ai simili coefficienti di dilatazione termica lineare. L'innovazione principale è stata quella di utilizzare cariche metalliche. Quest'ultimo aspetto ha grande interesse per il miglioramento delle proprietà termiche del calcestruzzo che ne è conseguito.

L'attività di ricerca ha comportato la preparazione della nuova mescola con caratteristiche ottimizzate per il funzionamento di un modulo di accumulo termico, ossia con maggiori conducibilità termica e calore specifico. Nella preparazione della miscela la valutazione degli aspetti economici e degli aspetti tecnici per un'eventuale industrializzazione per processo produttivo è stata sempre tenuta in gran considerazione ed il calcestruzzo realizzato è di sicuro interesse dal punto di vista commerciale. Le modifiche introdotte nella miscela scelta si sono adattate perfettamente al processo produttivo.

L'utilizzo delle fibre di nylon ha confermato un limitato ritiro igrometrico, e l'aggiunta della carica metallica ha incrementato le proprietà termiche del materiale, non complicando la procedura di produzione del calcestruzzo. Le analisi al microscopio elettronico hanno mostrato una buona compatibilità delle fibre di nylon e quelle metalliche con il calcestruzzo e non mostrano rilevanti segni di degrado dopo un trattamento termico a 350°C.

Nell'ottica della preparazione di un modulo di accumulo in calcestruzzo fibro-rinforzato e l'identificazione delle sue proprietà termomeccaniche, è stato prima di tutto necessario considerare i parametri che determinano la lavorabilità, la facilità della messa in opera, per adattare tutto a una realtà industriale, necessaria per passare da una dimensione laboratorio ad una più grande. Nella progettazione delle miscele si sono tenuti in considerazione gli standard delle norme Europee EN.197-1 e EN 206-1. Per la produzione dei provini di varia forma (cilindrica, cubica e a travetto), da impiegare nelle caratterizzazioni meccaniche, si è applicato quanto prescritto della seguenti norme UNI: ritiro igrometrico UNI 11307:2008, resistenza a compressione UNI EN 12390-3:2003, modulo elastico UNI 6556:1976.

Dopo 28 giorni di stagionatura sono state eseguite le seguenti caratterizzazioni: misure di capacità termica mediante calorimetria differenziale a scansione, di coefficiente di dilatazione termica tramite test dilatometrico ed infine conducibilità termica. Sono state inoltre eseguite indagini volte a valutare la stabilità del calcestruzzo in temperatura con misure di perdita di massa con misure termo-gravimetriche. La morfologia dei campioni prima e dopo il ciclaggio termico è stata indagata tramite microscopia elettronica a scansione.

Con la miscela selezionata è stato prodotto un elemento di accumulo completo di tubazione e termocoppie, che

verrà sottoposto ad una campagna sperimentale di ciclaggio termico presso i laboratori dell'ENEA.

Il presente lavoro è stato diviso nelle seguenti fasi:

- progettazione della miscela da impiegare e relativi adeguamenti per incrementare la lavorabilità al getto;
- recupero e completamento delle caratteristiche termo-fisiche necessarie alla progettazione strutturale e alle simulazioni numeriche;
- predisposizione dei casseri e delle armature di rinforzo secondo quanto definito da UNIPD;
- realizzazione del getto e stagionatura;
- rilievo del grado di danneggiamento di provini ed elementi di accumulo trattati termicamente.

Partendo da una miscela di riferimento (mescola A) di adeguate caratteristiche meccaniche già sviluppata dall'Università di Trento nel PAR 2013, si è operato modificando il mix-design al fine di trasferire quanto studiato in laboratorio all'impianto industriale. Al fine di ridurre i tempi dei cicli di carico e scarico termico si è fatto uso di una carica metallica nell'impasto, e di fibre di nylon per ridurre o eliminare lo spalling. Con quest'ultima mescola (tipo B) è stato realizzato l'elemento di accumulo con il supporto di una realtà industriale del panorama italiano, attiva nel settore delle tubazioni in calcestruzzo: Cav. Cestaro Gustavo s.r.l. Manufatti in Cemento, Preganziol Treviso.

E' stato preparato un modulo strumentato lungo 3 m e di sezione quadrata di lato 20 cm, contenente la tubazione. Il prototipo è stato dotato di una piccola armatura di rinforzo necessaria a garantire una minima resistenza per la movimentazione. In Figura 199 sono riportate alcune immagini del modulo con lo schema dell'armatura, realizzata con tondini di acciaio di diametro 6 mm.



Figura 199. Elemento di accumulo

In Tabella 65 è riportato il mix design della miscela B selezionata.

Tabella 65. Mix design della mescola B

	Mescola B
Acqua (kg/m^3)	120
Cemento (kg/m^3)	340
Ghiaino (7-15) (kg/m^3)	780
Ghiaino (4-8) (kg/m^3)	390
Sabbia (0-4) (kg/m^3)	780
Fibre Nylon (kg/m^3)	5
Carica metallica (kg/m^3)	77
Rapporto a/c	0,35

Gli aggregati sono stati utilizzati in condizione satura superficie asciutta (SSD)

L'aggregato è stato scelto di dimensione massima di 15 mm in base alla disponibilità dell'impianto e in base alle dimensioni dell'armatura del prototipo. Tenendo conto anche dell'industrializzazione, il cemento usato è del tipo II, sebbene sempre al calcare (CEM II/A-LL 42.5). Per quanto riguarda la carica metallica, sono polveri residue di acciaio con un leggero quantitativo di manganese. La lunghezza dei trucioli metallici varia tra 10 e 30 mm, mentre la sezione è compresa tra 0,1 e 0,2 mm^2. Le fibre utilizzate sono di poliammide (Nylon 66), (lunghezza 8 ± 3 mm, diametro 38-41 μm) e provenienti dallo smaltimento dei rifiuti dell'industria delle moquette.

Dopo 28 giorni di stagionatura umida la resistenza su cilindro risulta essere di 36 MPa ed il modulo elastico di 41 GPa. La densità è di 2449 kg/m^3, mentre la conducibilità termica a 25 °C è di 2,68 W/m K e di 2,21 W/m K dopo un trattamento termico a 300 °C per 4 ore. Il calore specifico è 0,80 J/g K dopo un ciclaggio termico fino a 350,°C.

Partendo dai risultati ottenuti nel precedente PAR 2013, è stato messo a punto un nuovo calcestruzzo innovativo con il fine di aumentare le caratteristiche principali per il funzionamento di un modulo di accumulo termico: conducibilità termica e calore specifico. La scelta di usare componenti semplici, economici, di facile reperibilità sul territorio e di nessuna pericolosità candida questa miscela a trovare un'applicazione industriale. E' stato ottenuto un ottimo calcestruzzo con un rapporto a/c = 0,35 utilizzando cemento portland al calcare (CEM II 42.5 R – A/LL), aggregato di tipo dolomitico, fibre di nylon e una carica metallica.

L'utilizzo di quest'ultima, polveri residue della lavorazione dell'acciaio, ha portato molteplici benefici. Le proprietà meccaniche, resistenza a compressione e modulo elastico, non sono minori di quelle di un calcestruzzo strutturale. In più, le proprietà termiche sono migliorate rispetto a quelle di un normale calcestruzzo proprio nella direzione auspicata dalla collaborazione con ENEA.

Grazie ai risultati ottenuti, è stato possibile realizzare un prototipo di elemento di accumulo termico (TES), del volume di 0,12 m^3, grazie alla tecnologia produttiva esistente presso l'impianto industriale della Cav. Cestaro S.r.l in provincia di Treviso, attiva da anni nella produzione di manufatti in calcestruzzo.

L'utilizzo delle fibre di nylon ha confermato l'effetto di limitare il ritiro igrometrico nella fase post-produzione e di eliminare lo spalling ad alta temperatura. L'aggiunta della carica metallica ha contribuito ad aumentare le proprietà termiche del materiale anche se con qualche complicazione della procedura di produzione del calcestruzzo. Le analisi al microscopio elettronico hanno mostrato una buona compatibilità delle aggiunte di nylon e metallo con il calcestruzzo, non mostrando segni di degrado dopo il trattamento termico a 350 °C.

Infine è stato valutato il grado di danneggiamento di un modulo di accumulo, prodotto con la mescola di riferimento A e già testato ciclicamente presso ENEA a temperature di circa 240 °C. Le cricche presenti in superficie si propagano anche verso l'interno, ma rimanendo sempre ortogonali all'asse principale dell'elemento, non modificano negativamente i processi di trasporto dell'energia termica. Il calcestruzzo rimane adeso alla tubazione in acciaio, grazie ai simili coefficienti di dilatazione termica lineare tra i due materiali.

Il successivo sviluppo della ricerca andrà nella direzione di aumentare ancora la capacità di accumulo termico ad esempio introducendo fasi nuove (PCM), che assorbano calore in intervalli di temperature di interesse in tale studio e compatibili sia con l'ambiente basico della miscela di calcestruzzo che con le moderne tecnologie di produzione industriali.

Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Lo sviluppo delle tecnologie per la conversione delle onde e delle maree in energia elettrica ha compiuto notevoli progressi negli ultimi anni soprattutto nell'area europea. L'industria che affianca lo sviluppo di questa energia rinnovabile è attualmente impegnata nella sperimentazione di prototipi per valutarne il funzionamento in ambiente reale e l'affidabilità su scale di tempo medio-lunghe. Tra i Paesi maggiormente impegnati nell'area mediterranea nella ricerca e sviluppo di prototipi per la conversione del moto ondoso in energia elettrica l'Italia riveste un ruolo di primaria importanza.

Studi ENEA condotti nell'ambito dei precedenti PAR, hanno dimostrato che i mari italiani possiedono un importate livello di energia associata al moto ondoso paragonabile a quello presente sulle coste baltiche del nord Europa. L'Italia, con i suoi 8000 km di costa, si colloca quindi tra i Paesi euro-mediterranei che possono trarre i maggiori benefici dallo sfruttamento di questa forma di potenziale energetico marino. I vantaggi che si possono ricavare dallo sfruttamento del moto ondoso sono enormi:

- una maggiore diffusione e densità di energia rispetto ad altre fonti rinnovabili come il vento, le maree;
- la variabilità oraria e giornaliera minore rispetto a quelle di altre risorse rinnovabili, come il vento, il sole o le correnti oceaniche;
- la favorevole variazione stagionale che segue il trend del consumo di energia elettrica nell'Europa occidentale;
- la grande affidabilità con la quale i livelli ondosi, in una specifica località, possano essere previsti con largo anticipo;
- la possibilità di sfruttare ampie superfici oceaniche di molti chilometri quadrati;
- la possibile integrazione all'energia eolica, in quanto in presenza di vento si ha la contemporanea azione delle turbine eoliche e della generazione delle onde marine sulla superficie libera. Inoltre l'onda generata da una raffica di vento dura più a lungo nel tempo rispetto alla raffica di vento stessa;
- il basso impatto ambientale e visivo che ha la maggior parte dei dispositivi per la trasformazione di energia da onda rispetto ad esempio alle turbine eoliche; infatti dispositivi di conversione di energia ondosa sono quasi invisibili sopra la linea dell'orizzonte, a differenza delle turbine eoliche che, sviluppandosi in altezza, hanno un impatto visivo più marcato.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'ENEA, in collaborazione con le principali realtà accademiche nazionali, si colloca tra i principali attori sulla scena nazionale per la valutazione della risorsa e lo sviluppo di prototipi innovativi particolarmente adatti ai mari italiani. Le attività di ricerca e sviluppo del presente progetto sono divise in due linee di attività: una prima linea dedicata alla risorsa e una seconda linea dedicata allo sviluppo di dispositivi di conversione del moto ondoso. La prima linea di attività ha come scopo quello di descrivere nel modo più completo possibile la risorsa presente in alcuni punti particolarmente promettenti delle coste italiane, anche in termini di impatto ambientale. La seconda linea di attività è stata invece dedicata allo sviluppo di due tipi di convertitori particolarmente promettenti, uno di tipo *near -shore* e uno *off-shore*.

L'ENEA sta seguendo la realizzazione di due dispositivi di conversione: uno di tipo costiero e uno di tipo *off-shore*. Il dispositivo costiero è realizzato in collaborazione con l'Università di Reggio Calabria (UniRC), ed è del tipo a colonna d'acqua oscillante (OWC). Il sistema è molto simile al prototipo REWEC3, ma con alcune differenze negli elementi geometrici che ne costituiscono l'ossatura interna (REWEV3-GV). Il dispositivo REWEC3-GV è stato progettato, realizzato in scala 1:8, e installato su una diga in cemento armato presente nello stretto di Messina presso il laboratorio NOEL di UniRC. Il REWEC3-GV è stato testato attraverso una serie di sperimentazioni in situ atte a verificarne il funzionamento in ambiente reale nel corso del seguente progetto.

Nel panorama dei WEC i dispositivi di tipo *point-absorber* rivestono un'importanza particolare per le loro interessanti peculiarità. Un *point-absorber* è un WEC con ridotte dimensioni rispetto all'onda in ingresso ma, grazie alle azioni di radiazione, in grado di assorbire energia da un fronte d'onda ben più ampio della sua larghezza fisica. Per questa caratteristica solitamente hanno un impatto ambientale ridotto a fronte di una capacità notevole

di assorbire potenza. Se il *point absorber* inoltre è dotato di sistemi di conversione dell'energia di tipo inerziale (giroscopio, massa rotante/traslante, ...) la sua affidabilità aumenta notevolmente in quanto grazie a tali sistemi è possibile contenere all'interno dello scafo tutti gli organi in movimento necessari alla produzione di energia elettrica. Tali organi sono quindi protetti dall'ambiente marino aggressivo e oltre ad avere una vita operativa maggiore anche la loro manutenzione ne è facilitata.

Tipicamente i *point absorber* inerziali hanno ancoraggi poco invasivi sul fondale marino, non necessitando di scambiare azioni rilevanti con il fondale per la produzione di energia elettrica. Inoltre la dispersione di inquinanti nell'ambiente a causa di possibili guasti è molto improbabile, essendo tutto l'apparato di potenza protetto all'interno dello scafo. Queste caratteristiche ne riducono ulteriormente l'impatto ambientale. Il dispositivo PEWEC che ENEA sta studiando in collaborazione con il Politecnico di Torino è un tipico esempio di *point absorber* dotato di sistemi di conversione dell'energia di tipo inerziale. Le sue caratteristiche costruttive lo rendono particolarmente versatile (di semplice generalizzazione a qualunque stato di mare), e di semplice installazione e manutenzione. Nel corso della precedente annualità PEWEC è stato realizzato in scala 1:45, mentre nel corso del presente progetto, grazie ai dati acquisiti durante le sperimentazioni condotte in precedenza, PEWEC è stato progettato e realizzato in una scala 1:12.

Le attività di ricerca del progetto sono state articolate nei seguenti obiettivi:

a. Analisi climatologica dell'energia nelle diverse componenti del moto ondoso e previsioni operative
b. Monitoraggio e mappatura degli ecosistemi costieri interessati dall'installazione di impianti di produzione di energia dal mare
c. Esecuzione di prove sperimentali e numeriche CFD su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante REWEC3-GV
d. Studio di un sistema PTO per REWEC basato su elastomeri elettroattivi
e. Progettazione ed esecuzione delle prove su di un prototipo in scala di dispositivo point absorber "passivo" per il recupero di energia da moto ondoso
f. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Analisi climatologica dell'energia nelle diverse componenti del moto ondoso e previsioni operative

Nell'ambito dell'Accordo di Programma, l'ENEA sta svolgendo una attività di modellistica del moto ondoso con lo scopo sia di fornire una caratterizzazione della risorsa energetica per i mari italiani, che un supporto nelle fasi di sperimentazione in campo e di gestione di impianti di conversione. Per questo motivo è stato realizzato, nelle scorse annualità, un sistema per la previsione dello stato del mare e dell'energia associata che è in funzione in modalità operativa a partire dal giugno 2013. Il sistema è composto da un modello di onde per l'intero Mediterraneo per il quale è stato utilizzato il modello WAM alla risoluzione spaziale di 1/32° e da una serie di modelli per sottobacini dei mari italiani, alla risoluzione di 1/128°. In questo caso le simulazioni si basano sul modello SWAN più adatto alle situazioni di mare poco profondo. Nel corso di quest'annualità ai dieci sottobacini iniziali è stato aggiunto un ulteriore sottobacino, nella zona dello stretto di Messina, allo scopo di fornire un supporto alle attività sperimentali effettuate in collaborazione con l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Nella Figura 200 è mostrata l'area su cui viene applicato il modello, insieme alla batimetria utilizzata.

I dati delle principali grandezze rappresentative delle onde sono stati quotidianamente memorizzati, a partire dall'entrata in funzione del sistema, su tutto il dominio di calcolo di ciascun modello. Le previsioni coprono un intervallo temporale di cinque giorni, le uscite dei modelli vengono fornite alla risoluzione temporale di un'ora.

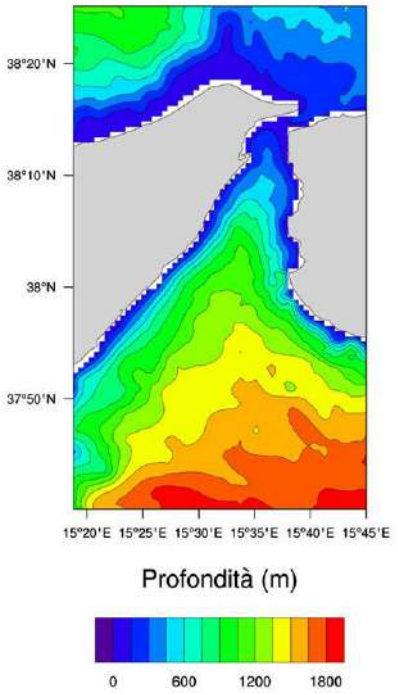


Figura 200. Batimetria del modello utilizzato per la zona dello stretto di Messina

Nella presente annualità i risultati delle simulazioni ottenute nel corso del periodo di esercizio sono stati validati rispetto ai dati di altezza d'onda ricavati dai sensori dei satelliti Jason-2 e Saral/Altika. Inoltre è stata effettuata una validazione sia dell'altezza significativa che della direzione di provenienza delle onde rispetto ai valori registrati

dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale in funzione nel periodo in esame.

Il confronto eseguito separatamente sui dati relativi ai primi tre giorni della simulazione ricavati su tutto il bacino con il modello WAM hanno mostrato un ragionevole accordo con le misure da satellite, in particolare si è osservato che la qualità dei risultati non varia in maniera significativa all'aumentare della distanza dall'inizio della simulazione (Tabella 66).

Tabella 66. Statistiche relative al confronto tra l'altezza significativa del modello e quella misurata dai satelliti per l'intero bacino Mediterraneo

Satellite	Previsione	Numero campioni	Bias (m)	Rmse (m)	si	slope	d
Jason-2	giorno 1	100399	-0,20	0,40	0,34	0,83	0,93
	giorno 2	101036	-0,22	0,44	0,37	0,81	0,92
	giorno 3	99386	-0,24	0,50	0,42	0,78	0,89
Saral/Altika	giorno 1	74709	-0,19	0,38	0,36	0,82	0,93
	giorno 2	74896	-0,20	0,42	0,39	0,80	0,91
	giorno 3	74691	-0,21	0,46	0,44	0,78	0,89

Il confronto effettuato rispetto alle misure ricavate dalle boe della rete RON ha mostrato in generale un buon accordo delle simulazioni anche rispetto alla direzione di propagazione delle onde. Da entrambi i confronti risulta una buona correlazione ma una leggera sottostima dei valori delle ampiezze, soprattutto relativamente ai valori più bassi di altezza delle onde.

In corrispondenza delle boe dove era possibile disporre anche delle simulazioni ad alta risoluzione è stato effettuato il confronto anche con le uscite del modello corrispondenti (Tabella 67). I risultati ottenuti non si discostano da quelli della simulazione effettuata con il codice WAM, questo risultato deriva dal fatto che le boe sono collocate a profondità superiori ai 100 m, e quindi non è necessario tenere conto degli specifici fenomeni di interazioni delle onde inclusi nel modello SWAN.

Tabella 67. Statistiche relative al confronto delle altezze significative ricavate dal modello WAM del sistema operativo, per il primo giorno di previsione, con i dati misurati dalle boe della rete RON

Boa	Numero campioni	Bias	Rmse	Slope	Si	d
Alghero	7788	-0,33	0,46	0,79	0,50	0,95
Ancona	2857	-0,19	0,40	0,82	0,49	0,93
Cagliari	9975	-0,23	0,32	0,66	0,86	0,89
Catania	8272	-0,25	0,33	0,63	0,96	0,86
Crotone	12342	-0,16	0,3	0,79	0,56	0,93
Cetraro	13114	-0,19	0,3	0,72	0,72	0,91
Civitavecchia	11850	-0,09	0,26	0,86	0,47	0,93
La Spezia	10566	-0,23	0,35	0,75	0,62	0,92
Mazara	5816	-0,11	0,27	0,87	0,37	0,94
Monopoli	12466	-0,15	0,31	0,79	0,60	0,89
Venezia	11783	-0,06	0,30	0,86	0,66	0,88

Tabella 68. Statistiche relative al confronto delle direzioni di propagazione ricavate dal modello WAM del sistema operativo, per il primo giorno di previsione, con i dati misurati dalle boe della rete RON

Boa	Bias	var
Alghero	3,82	0,13
Ancona	12,16	0,27
Cagliari	-1,65	0,16
Catania	11,84	0,24
Crotone	19,62	0,29
Cetraro	4,54	0,17
Civitavecchia	9,36	0,17
La Spezia	-1,42	0,23
Mazara	-0,11	0,27
Monopoli	-0,33	0,17
Venezia	1,98	0,40

I risultati fin qui descritti sono riportati in forma estesa nel rapporto RdS/PAR2014/238.

Una seconda attività è stata rivolta a migliorare la caratterizzazione della risorsa ondosa. Nelle precedenti annualità era stata prodotta una climatologia del moto ondoso per l'intero mar Mediterraneo alla risoluzione di 1/32°. Oltre alla memorizzazione dei campi delle grandezze integrate erano stati memorizzati gli interi spettri bidimensionali di densità di energia funzione di frequenza e direzione delle onde, per 20 siti distribuiti lungo le coste del Mediterraneo, le cui posizioni sono riportate in Figura 201.

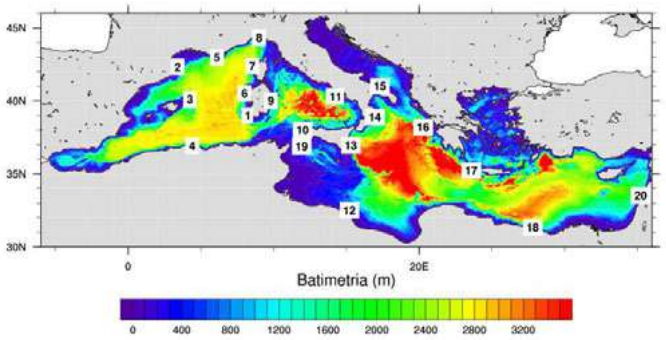


Figura 201. Le posizioni dei siti per i quali è stato memorizzato lo spettro bidimensionale sono mostrate sulla batimetria utilizzata per la simulazione con il modello WAM

Nel corso di questa annualità è stata effettuata una analisi dettagliata degli spettri, per tutto il periodo di 15 anni dal 1990 al 2004, utilizzando una tecnica per scomporre lo spettro nelle diverse componenti d'onda. Gli spettri, infatti, possono riguardare la presenza di una sola onda o, più frequentemente, la presenza simultanea di onde di diversa ampiezza, direzione e frequenza. La tecnica del *partizionamento*, che è stata applicata ai risultati della simulazione climatologica, è stata quindi utilizzata al fine di separare le varie componenti, in particolare le componenti di onde generate localmente dal vento da quelle che si propagano a distanza dall'area di generazione (onde di *swell*). Le statistiche relative possono essere particolarmente utili alla caratterizzazione dei siti per la definizione delle caratteristiche dei convertitori di energia dal moto ondoso da utilizzare.

In Tabella 69 sono mostrate le percentuali di casi in cui si presentano le diverse condizioni di mare, costituite da onde singole o da sovrapposizioni di onde.

Tabella 69. Statistiche relative alla percentuale di occorrenza dei possibili casi di separazione dello spettro in onde di vento e onde di swell per ciascuno dei siti

Numero sito	Casi con presenza di onde di vento	Solo onde di vento	Solo onde di swell	Calma	Casi con più onde simultanee
1	46,14	24,41	29,07	0,09	46,43
2	59,74	39,73	26,66	0,18	33,43
3	44,83	21,62	31,96	0,16	46,26
4	25,89	9,88	42,47	0,08	47,57
5	50,89	35,23	36,11	0,89	27,77
6	36,00	18,08	39,40	0,49	42,02
7	20,97	12,13	54,78	1,55	31,54
8	28,26	14,82	51,72	2,55	30,91
9	39,75	22,61	43,70	1,79	31,90
10	56,82	24,13	15,39	0,15	60,33
11	49,39	26,15	27,60	1,63	44,61
12	45,87	20,34	25,27	0,03	54,36
13	34,10	18,50	48,22	1,33	31,96
14	49,20	30,56	37,90	6,06	25,48
15	58,50	45,54	30,87	5,72	17,87
16	38,72	22,37	41,50	0,40	35,72
17	50,86	28,48	38,87	0,47	32,17
18	47,84	18,60	24,41	0,00	56,99
19	64,84	31,66	15,80	0,19	52,36
20	18,01	7,16	63,73	0,01	29,09

Relativamente ai siti nell'area italiana sono stati mostrati, separatamente per i due tipi di onda (onde di vento e di *swell*) grafici che riportano la distribuzione degli eventi in funzione rispettivamente di altezza significativa dell'onda e periodo e altezza significativa e direzione di propagazione. Nelle Figure 202 e 203 sono riportati per esempio il caso del sito posto nella regione meridionale della Sardegna (sito 10).

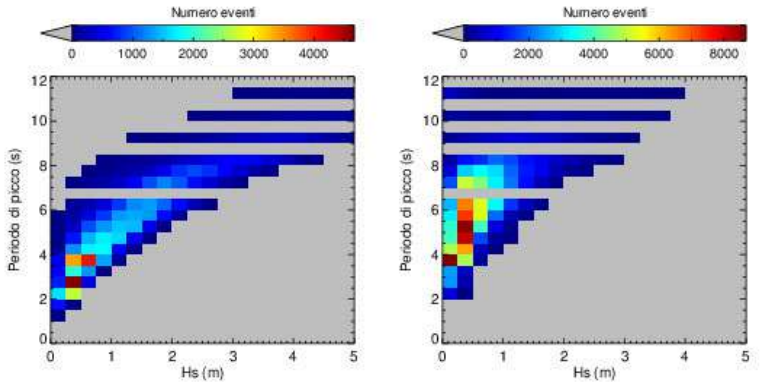


Figura 202. Numero di eventi per intervallo di altezza e di periodo. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0,25 m, quelli di periodo a 0,5 s, (a) nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 10

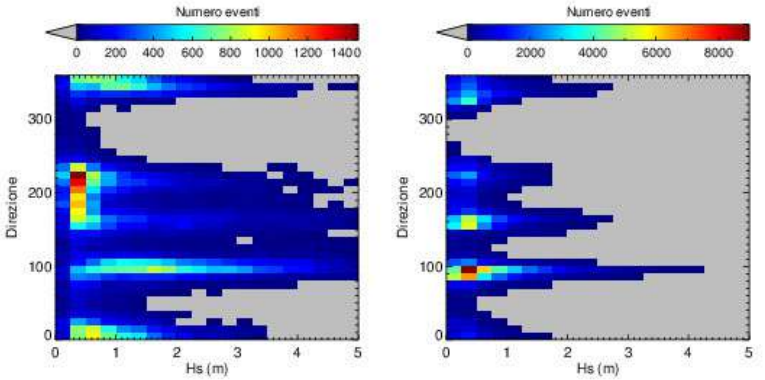


Figura 203. Numero di eventi per intervallo di altezza e di direzione di propagazione. Gli intervalli di altezza corrispondono a 0,25 m, quelli di direzione a 10°, nel pannello a sinistra sono state usate le partizioni di onde di vento e in quello a destra le partizioni di onde di *swell*. Figura relativa al sito 10

Sono inoltre state calcolate per tutti i siti disponibili le grandezze medie separate per tipo di onda e per stagione. La Tabella 70 riporta i risultati relativi alla stagione invernale, caratterizzata nel mar Mediterraneo, dai valori di energia più elevati. I risultati sono riportati in dettaglio nel report RdS/PAR2014/239.

Tabella 70. Valori medi calcolati per ciascun sito separatamente per la partizione di vento e per la partizione di swell. Dati relativi al trimestre invernale

Numero sito	Onde di vento			Onde di swell		
	Hs	Tp	Direzione	Hs	Tp	Direzione
1	1,89	6,58	179,70	0,92	7,33	152,40
2	1,72	5,50	186,40	0,69	6,35	211,90
3	1,77	6,17	169,10	0,87	6,68	208,60
4	1,21	5,36	112,30	0,95	7,51	187,30
5	1,25	5,87	159,40	0,69	6,72	136,70
6	1,81	6,34	146,10	0,97	7,01	121,60
7	1,47	6,09	112,70	0,99	6,88	95,90
8	0,66	3,70	190,50	0,74	6,82	136,20
9	1,00	4,60	174,60	0,59	6,02	253,20
10	1,81	6,32	154,00	0,74	6,88	166,60
11	1,27	4,93	179,90	0,68	6,70	108,80
12	1,77	6,34	183,80	0,86	7,31	201,40
13	0,84	4,36	122,50	0,69	6,89	225,90
14	0,73	3,80	149,00	0,60	6,65	203,50
15	0,96	4,50	176,60	0,47	4,94	204,00
16	1,48	5,76	149,90	0,79	6,51	114,50
17	1,14	5,09	159,20	0,92	7,24	135,80
18	1,63	6,36	150,10	0,88	7,43	165,60
19	1,76	6,29	146,60	0,64	7,28	184,00
20	1,17	4,87	168,80	0,97	7,23	112,10

b. Monitoraggio e mappatura degli ecosistemi costieri interessati dall'installazione di impianti di produzione di energia dal mare

Nel Mediterraneo, le praterie di Posidonia oceanica (PO), rappresentano uno dei più importanti ecosistemi non solo per la complessità e l'estensione ma anche per gli essenziali servizi ecologici che svolge, intrappolando i sedimenti in sospensione favorisce la trasparenza dell'acqua e la riduzione dell'erosione costiera, rappresenta la base della catena trofica marina nonché il riparo e l'habitat per una varietà di flora e fauna, costituisce inoltre un sensibile bio-indicatore di impatto da attività antropiche e dei cambiamenti climatici. Pertanto, al fine di supportare adeguatamente la loro gestione sostenibile e la valutazione efficace della qualità ambientale delle acque poco profonde e di habitat importanti per la biodiversità nelle politiche commerciali e di sviluppo, è necessario integrare diverse tecnologie innovative per il monitoraggio efficace delle praterie di PO alle varie scale spazio-temporali, in particolare, per ottenere stime affidabili, veloci, aggiornate ed efficaci dei parametri biofisici d'interesse della PO legati anche allo stato di stress derivante dal clima e/o fattori antropici. In questo contesto quindi l'utilizzo delle tecniche di telerilevamento aerospaziale più recenti integrate con quelle di rilievo in sito, rappresenta una soluzione vantaggiosa ed efficace in grado di dare un contributo determinante a supporto della gestione sostenibile degli ambienti costieri dei bassi fondali sui quali risulta d'interesse testare preliminarmente le potenzialità e le migliorate funzionalità dei sistemi satellitari ed aerei di ultima generazione anche per supportare la valutazione effettiva dello stato ecologico degli habitat di PO.

In questo quadro sono qui presentate le attività relative alla messa a punto di una metodologia innovativa per monitorare a scale spazio-temporali adeguate l'ecosistema costiero, in particolare la Posidonia oceanica, nei siti d'interesse del progetto, utilizzando un approccio basato sulle tecniche di telerilevamento (RS) e GIS (Geographical Information System) più recenti, integrate da metodi avanzati per il campionamento a mare, misure in situ e di laboratorio. L'area d'interesse delle attività è quella dell'isola di Pantelleria, caratterizzata da elevata trasparenza delle acque costiere e dove recentemente è stato installato l'innovativo sistema ISWEC per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso a basso impatto ambientale. La metodologia da implementare è basata sul reperimento, omogeneizzazione, integrazione e produzione d'informazioni spazialmente georiferite sotto forma di "layer" (strati) in proiezione cartografica e congruenti, conservati in un geodatabase appositamente configurato e gestito con modalità informatiche tramite procedure appositamente sviluppate. Questo sistema sviluppato ed aggiornato durante il progetto costituirà poi uno strumento DSS (Decision Support System) a supporto della gestione operativa del sistema. In questa fase del lavoro sono state avviate e portate avanti varie attività che hanno incluso una parte iniziale in cui sono stati reperiti e pre-processati una serie di strati vettoriali di base che sono stati inseriti nel geodatabase.

Sono state quindi acquisite alcune riprese satellitari multispettrali Landsat 8 OLI, sulle quali è stata messa a punto una prima versione della procedura di preprocessing geometrico e radiometrico propedeutica al loro utilizzo successivo per la produzione dei tematismi d'interesse (Figura 204).

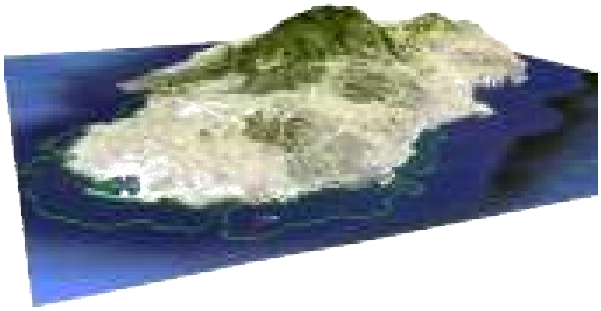


Figura 204. Restituzione 3-D dell'isola di Pantelleria ottenuta utilizzando il modello altimetrico e la combinazione RGB derivante dai rilievi Landsat 8 OLI del 08-08-2014. Oltre alle aree di localizzazione delle praterie di PO con puntinatura verde è riportata la posizione del sistema ISWEC con simbolo in rosso

Utilizzando i tool messi a disposizione dall'ambiente GIS e le informazioni del geodatabase è stata quindi progettata una prima campagna di misura sulle praterie di PO in corrispondenza del sito d'installazione del prototipo con un metodo di campionamento innovativo. Tale campagna è stata condotta nella seconda meta dello mese di agosto 2015 mentre le analisi di laboratorio sui campioni raccolti e l'elaborazione dei dati rilevati sono in corso. Contemporaneamente sono state selezionate e sono in corso di acquisizione ulteriori immagini multispettrali Landsat 8 OLI rilevate nel periodo estivo scorso da calibrare con i rilievi acquisiti in sito.

Per approfondimenti su queste attività si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/224.

c. Esecuzione di prove sperimentali e numeriche CFD su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d'acqua oscillante REWEC3-GV

Le attività sperimentali sono state eseguite utilizzando il cassone U-OWC a geometria variabile, denominato REWEC3-GV, installato presso il NOEL nel corso della precedente annualità (Figura 205). Il cassone è stato realizzato con pannelli interni alla camera di assorbimento rimuovibili, in modo da potere modificare la larghezza della camera stessa. La configurazione iniziale, con tutti i setti interni montati, prevede tre celle indipendenti da 1,27 m. La seconda configurazione prevede lo smontaggio di un setto interno, al fine di avere una camera più grande, con due celle comunicanti: il monitoraggio viene eseguito sulla cella di 2,54 m. La terza configurazione prevede un'unica cella, smontando i setti interni, avente lunghezza di 3,8 m.



Figura 205. Diga in cemento armato, presso il NOEL di Reggio Calabria, con i due cassoni REWEC3

Le analisi sperimentali sono state finalizzate sia a validare il comportamento del sistema REWEC3-GV per l'assorbimento dell'energia ondosa e la produzione di energia elettrica, sia a validare il modello CFD implementato da ENEA con la collaborazione della Università Mediterranea di Reggio Calabria. In Figura 206 e 207 sono mostrati elementi di dettaglio del cassone REWEC3-GV.

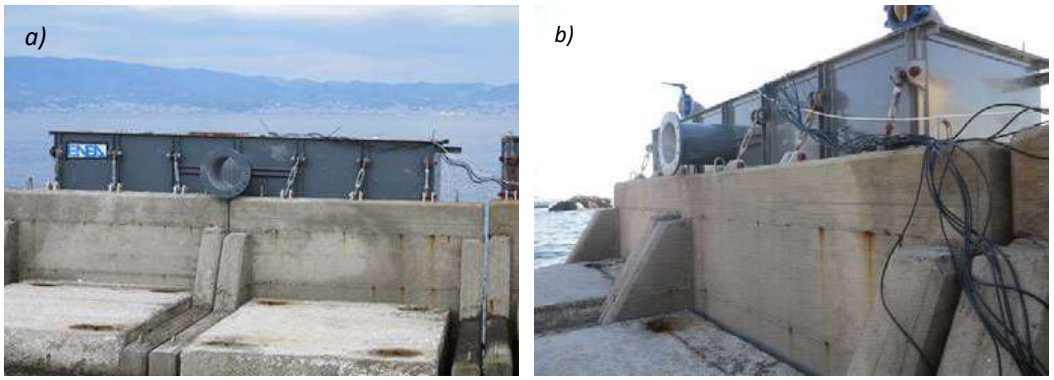


Figura 206. Particolare del cassone REWEC3-GV (a) e REWEC3-GV con i coperchi e le valvole a farfalla (b), lo sfiato è relativo alla camera centrale



Figura 207. REWEC3-GV: particolare della valvola a farfalla nella camera nord

In vicinanza del cassone REWEC3-GV sono state eseguite le misure di campo indisturbato, utilizzando due ultrasuoni e due trasduttori di pressione montati su due pali. Tali misure forniscono lo spettro delle onde incidenti e quindi consentono di calcolare l'energia incidente.

I cassoni U-OWC sono stati equipaggiati con trasduttori di pressione all'interno della camera di assorbimento ed all'esterno e con sonde ultrasoniche per le misure di livello. In dettaglio, sulla copertura della camera di assorbimento sono stati montati ultrasuoni per le misure dell'elevazione dell'acqua nelle camere; trasduttori di

pressione sono stati posti a diverse quote, uno sul fondo ed altri posizionati sia sotto il livello medio del mare sia al di sopra. Un traduttore sulla sommità della camera misura la pressione dell'aria. Sull'imbocco del condotto verticale è stato infine sistemato un trasduttore di pressione per misurare la pressione dovuta all'onda. Tale pressione rappresenta la forzante del nostro sistema consente di eseguire le opportune analisi dinamiche. Sono state eseguite prove sperimentali in tre differenti configurazioni:

1) configurazione con tre celle indipendenti (celle non sono comunicanti tra loro);
2) cassone con due celle comunicanti tra di loro;
3) cassone con le tre celle comunicanti tra di loro e cioè con una cella singola.

In ciascuna configurazione sperimentale si è proceduto ad analizzare il coefficiente di assorbimento dell'impianto. Tale coefficiente consente di determinare l'energia assorbita dall'impianto in quanto esso rappresenta appunto il rapporto tra l'energia assorbita e l'energia ondosa incidente. Trasduttori di pressione hanno poi consentito di determinare le sollecitazioni che le onde producono sulle pareti della struttura. Tali sollecitazioni risultano fondamentali per la progettazione strutturale. Esse rappresentano, infatti, l'azione che le onde nel corso di mareggiate producono sulla struttura in condizioni estreme. Sono state infine eseguite alcune prove sperimentali finalizzate al confronto con prove numeriche e ad ottimizzare le prestazioni idrodinamiche dell'impianto. Tali misurazioni sono state seguite nelle differenti configurazioni. I risultati sono stati utilizzati per implementare e tarare un nuovo modello CFD del sistema in oggetto ottimizzato dal punto di vista computazionale.

Si riporta la procedura seguita per analizzare il singolo record di uno stato di mare. L'analisi è distinta in due fasi: descrizione del campo di moto incidente; descrizione della risposta dell'impianto U-OWC. La prima fase permette di stimare le caratteristiche salienti del campo di moto propagato da largo verso riva e permette di inquadrare le caratteristiche più importanti in termini di periodo caratteristico delle onde, energia media per unità di superficie e distribuzione dell'energia delle onde nel dominio delle frequenze. La seconda fase permette di valutare la risposta dinamica dell'impianto e di giudicare le performance dell'impianto in termini di capacità di assorbimento.

La registrazione analizzata in dettaglio. la n.77; è stata scelta in quanto è tra le più severe dell'intero database formato a valle delle campagne di misura.

Fase 1: campo di moto incidente

I record di campo indisturbato sono acquisiti tramite due sonde ultrasoniche e due trasduttori di pressione posti lontano dalle strutture, dove non risente delle influenze dovute a modifiche del campo di moto. Prima di elaborare le misure, è effettuata una fase di pre-processing dei dati in cui sono filtrati rumori in alta frequenza dei segnali ed eliminati eventuali spikes dovuti a locali alterazioni del segnale. Tale fase è condotta direttamente in ambiente Matlab®.

Di seguito, sono rappresentate le storie temporali relative alla registrazione n.77 (Figura 208). La qualità del segnale fornito dalla sonda ultrasonica è marcatamente inferiore a quella del trasduttore di pressione. A tal riguardo, si sottolinea che ai fini delle valutazioni prestazionali si è preferito utilizzare i dati da trasduttore proprio in virtù della loro maggiore affidabilità. I parametri descrittivi fondamentali sono:

Altezza significativa del moto ondoso: H_s = 0,51 m
Periodo di picco: T_p = 3,10 s
Periodo medio: T_m = 3,72 s
Direzione media di propagazione: ϑ_m = - 0,30°
Parametro di strettezza dello spettro: ψ^* = 0,7.

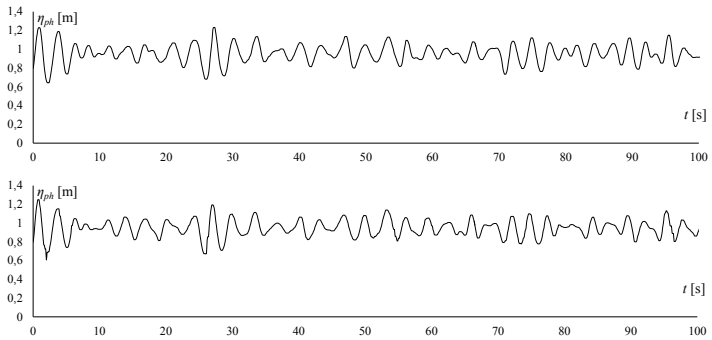


Figura 208. Storia temporale della fluttuazione di pressione registrata, rispettivamente, dallo strumento a Nord e a Sud

Accanto a tali parametri, si rappresentano le distribuzione dell'energia delle onde nel dominio delle frequenze. In particolare, lo spettro di frequenza del carico di pressione è riportato in Figura 209. Questa particolare distribuzione è rappresentativa di uno stato di mare generato da onde pure di vento. Infatti, è dotato di un singolo picco dello spettro e di una rapida fase di decadimento in alta frequenza. Accanto a tale rappresentazione, si stima la funzione di autocovarianza dello spettro (Figura 210). Essa è utilizzata per fornire stime quantitative circa la natura degli stati di mare in esame. In particolare, permette di discriminare con parametri oggettivi stati di mare generati dal vento da swell. Inoltre, esso permette di valutare quanto uno stato di mare sia ben rappresentativo di una data forma spettrale. A tal fine, è utilizzato il già citato parametro di strettezza dello spettro, calcolato come il rapporto, in valore assoluto, tra il minimo ed il massimo della funzione di autocovarianza. Nel caso in esame, essendo tale parametro pari a 0,7, si evince che lo stato di mare possiede uno spettro di frequenza ben rappresentato da uno spettro JONSWAP medio.

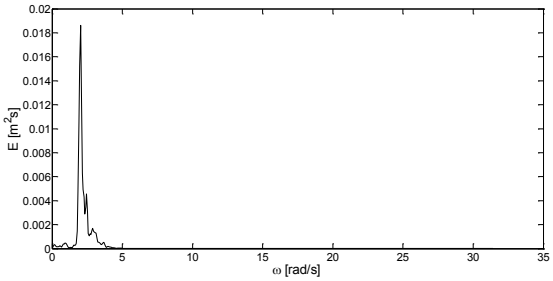


Figura 209. Spettro di frequenza del carico di pressione

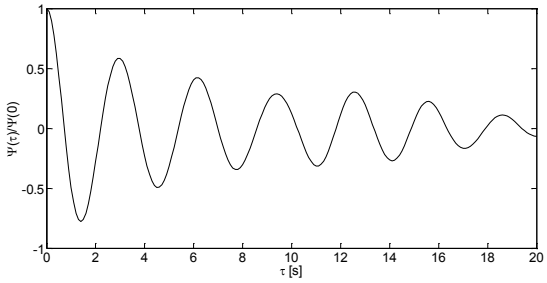


Figura 210. Funzione di autocovarianza fluttuazione di pressione

Fase 2: registrazioni degli strumenti installati sul REWEC3

Il cassone REWEC3 è stato equipaggiato con trasduttori di pressione. Tali strumenti sono stati posizionati in modo tale da fornire informazioni circa le capacità di assorbimento dell'impianto e le condizioni di risonanza dello stesso con le onde incidenti. Di seguito si riportano le storie temporali dei carichi di pressione misurati in corrispondenza dell'imboccatura e in tre punti distinti della colonna d'acqua oscillante (Figure 211-215). Queste quantità permettono di descrivere la dinamica della colonna d'acqua e di stimare la potenza media assorbita dall'impianto. Inoltre, i tre trasduttori sono impiegati per la misura indiretta dell'oscillazione della superficie libera della colonna d'acqua.

Si riportano poi misurazioni al fondo del cassone e nella camera pneumatica. La prima registrazione è utilizzata per la valutazione prestazionale del modello numerico proposto nell'ambito del progetto. La seconda quantità entra in gioco nella descrizione globale dell'impianto. In questo contesto, è interessante osservare la maggiore rumorosità del segnale. Tale rumorosità è legata alla complessità dei fenomeni che si verificano all'interno della camera d'aria. Infatti, vortici e flussi in entrata/uscita condizionano non solo l'entità della misura, ma anche la qualità della stessa. Tuttavia, tale rumorosità non inficia le valutazioni energetiche poiché essa viene mediata per mezzo di numerose misure fornite da altri strumenti all'interno dell'impianto.

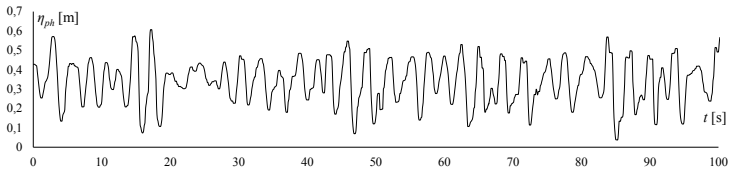


Figura 211. Storia temporale della fluttuazione di pressione all'imboccatura

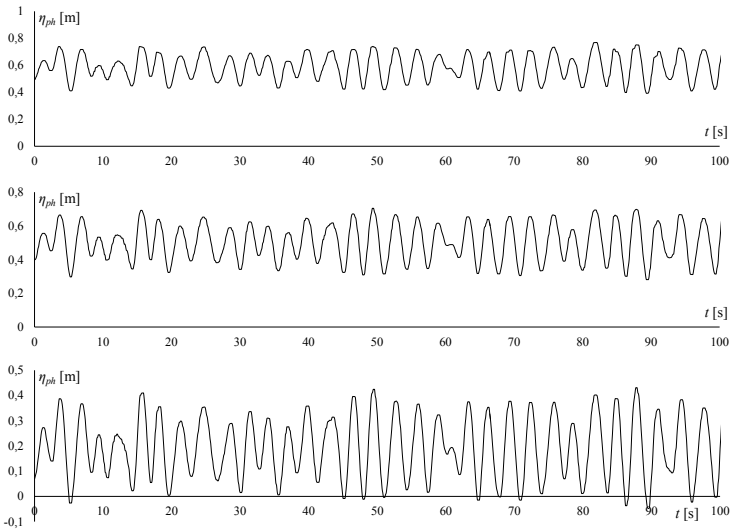


Figura 212. Storia temporale della fluttuazione di pressione nella colonna d'acqua oscillante

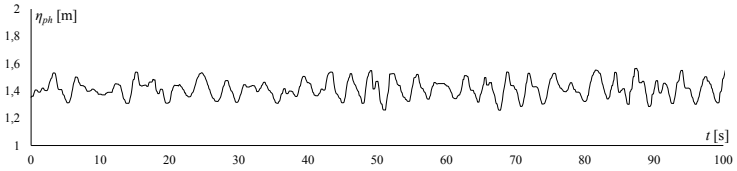


Figura 213. Storia temporale del carico al fondo del REWEC3

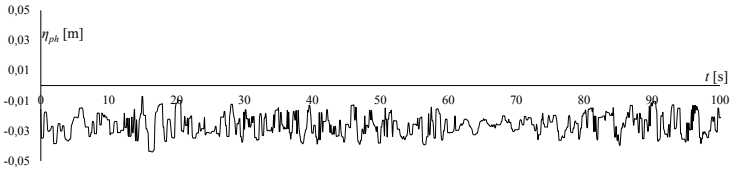


Figura 214. Storia temporale del carico della camera pneumatica

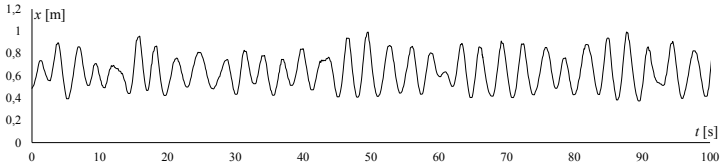


Figura 215. Elevazione della superficie libera della colonna oscillante misurata rispetto al trasduttore (2)

Il coefficiente di assorbimento è C_a = 46%.

La descrizione approfondita delle misure effettuate in situ è riportata nel rapporto tecnico RdS/PAR2014/225.

Per quanto riguarda il lavoro relativo alla modellazione CFD, questo è stato diviso in due fasi: la prima fase consiste nella realizzazione di un modello CFD del sistema REWEC3-GV in due differenti configurazioni. La prima corrisponde al sistema con il cassone senza le paratie interne e la seconda con tutte e due le paratie montate. La seconda fase ha previsto il confronto tra i risultati delle simulazioni e le misure sperimentali eseguite presso il laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria.

Di seguito si riassume il lavoro svolto nella prima fase, quella relativa alla realizzazione dei modelli CFD. Per le analisi fluidodinamiche (CFD), si è utilizzato il codice di calcolo OpenFOAM - The open source CFD toolbox - versione 2.2.1. In particolare è stato impiegato il solutore interFoam, specifico per flussi bifase isotermici caratterizzati da fluidi immiscibili ed incomprimibili che utilizza come modello bifase il VOF (volume of fluids). Visto

il notevole peso computazionale, le simulazioni sono state fatte girare sulle macchine appartenenti al sistema di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO. Per queste prime simulazioni numeriche sono state prese in considerazione due forzanti, con andamento approssimato di tipo sinusoidale, corrispondenti a due tipologie di onde realistiche, per ampiezza e frequenza, per il sito nel quale è stato realizzato l'apparato sperimentale.

Il modello geometrico è stato quindi realizzato basandosi sulla geometria definitiva fornita dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Nella Figura 216a è riportato il primo modello geometrico utilizzato per le simulazioni, cassone completamente aperto all'interno, mentre in Figura 216b è riportato il secondo modello, ossia il cassone con le paratie interne montate, in questo caso si è simulata solamente la camera interna, quella dalla quale fuoriesce il tubo di collegamento con la turbina.

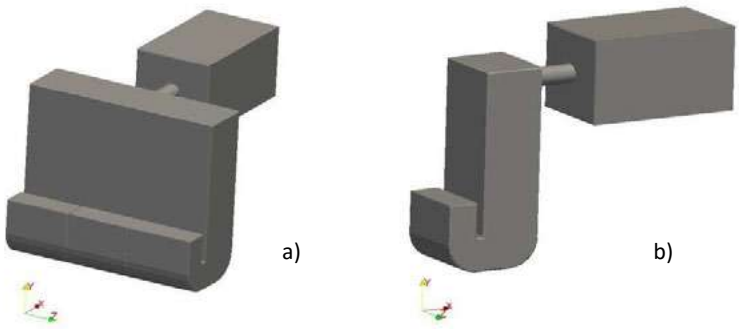


Figura 216. Modello geometrico con (a) camera interna completa (a), (b) con camera interna ridotta

Nell'applicazione delle condizioni iniziali ed al contorno per la pressione, anche in questi nuovi modelli, si è assegnato al posto della pressione assoluta p la pressione decurtata della componente idrostatica p-rgh.

In Figura 217 e 218 sono riportate le superfici alle quali vengono applicate le condizioni di ingresso/uscita acqua (colore blu) ed ingresso/uscita aria (colore celeste) per i due modelli.

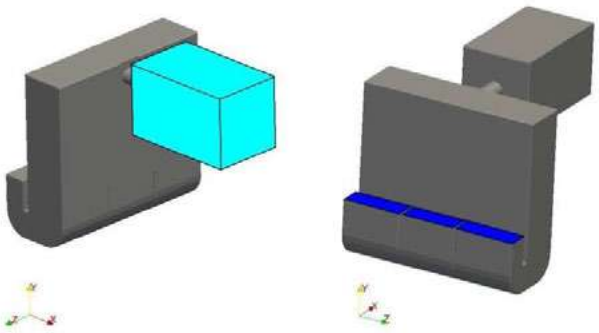


Figura 217. Primo modello geometrico – Condizioni al contorno

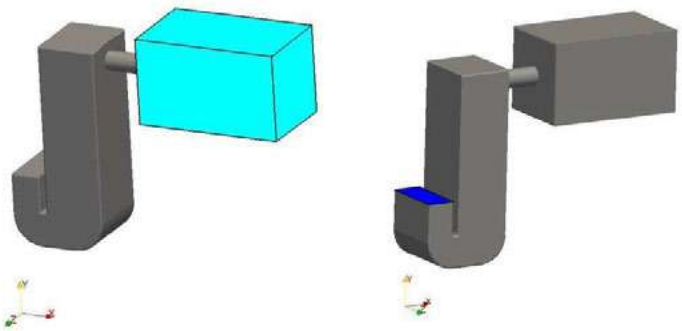


Figura 218. Secondo modello geometrico – Condizioni al contorno

Per la discretizzazione spaziale dei nuovi modelli valgono le stesse considerazioni fatte a suo tempo per la realizzazione della mesh dei modelli degli anni precedenti. In Figura 219 è riportato, per entrambi i modelli, un particolare della mesh nella zona di collegamento tra la camera ed il tubo turbina.

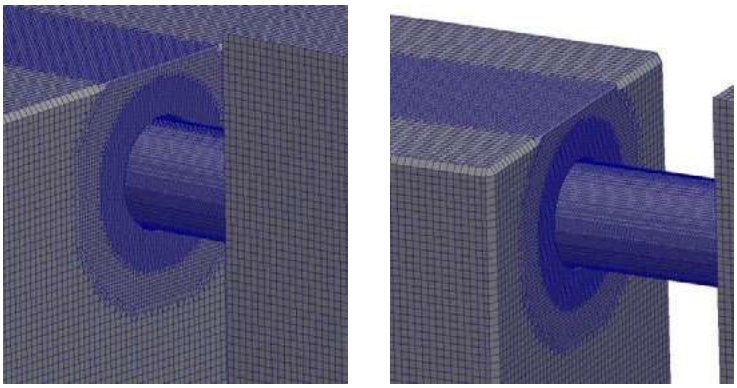


Figura 219. Mesh zona di collegamento camera-tubo turbina nei due modelli

In questa prima fase sono state quindi svolte quattro simulazioni:

- Modello completo con forzante 1 incidente normalmente al sistema (parallela all'asse x);
- Modello completo con forzante 1 incidente con un'inclinazione di 45° rispetto alla normale al sistema (asse x);
- Modello completo con forzante 2 incidente normalmente al sistema (parallela all'asse x);
- Modello ridotto con forzante 1 incidente normalmente al sistema (parallela all'asse x).

In Figura 220 è riportato il confronto tra il livello dell'onda corrispondente alla condizione di input imposta ed il livello dell'acqua all'interno del sistema e l'andamento della velocità dell'aria in una sezione orizzontale passante per l'asse del tubo turbina nel caso della prima simulazione.

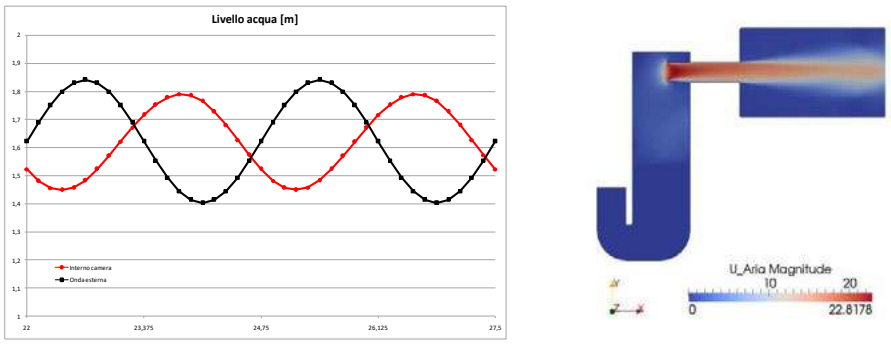


Figura 220. Confronto livello onda e livello acqua all'interno della camera ed andamento della velocità dell'aria al tempo t = 25,85 s

In Figura 221 è riportato il confronto tra il livello dell'onda corrispondente alla condizione di input imposta ed il livello dell'acqua all'interno del sistema nelle tre camere e l'andamento della velocità dell'aria in una sezione orizzontale passante per l'asse del tubo turbina nel caso della seconda simulazione.

In Figura 222 e 223 è riportato il confronto tra il livello dell'onda corrispondente alla condizione di input imposta ed il livello dell'acqua all'interno del sistema e l'andamento della velocità dell'aria in una sezione orizzontale passante per l'asse del tubo turbina rispettivamente nel caso della terza e della quarta simulazione.

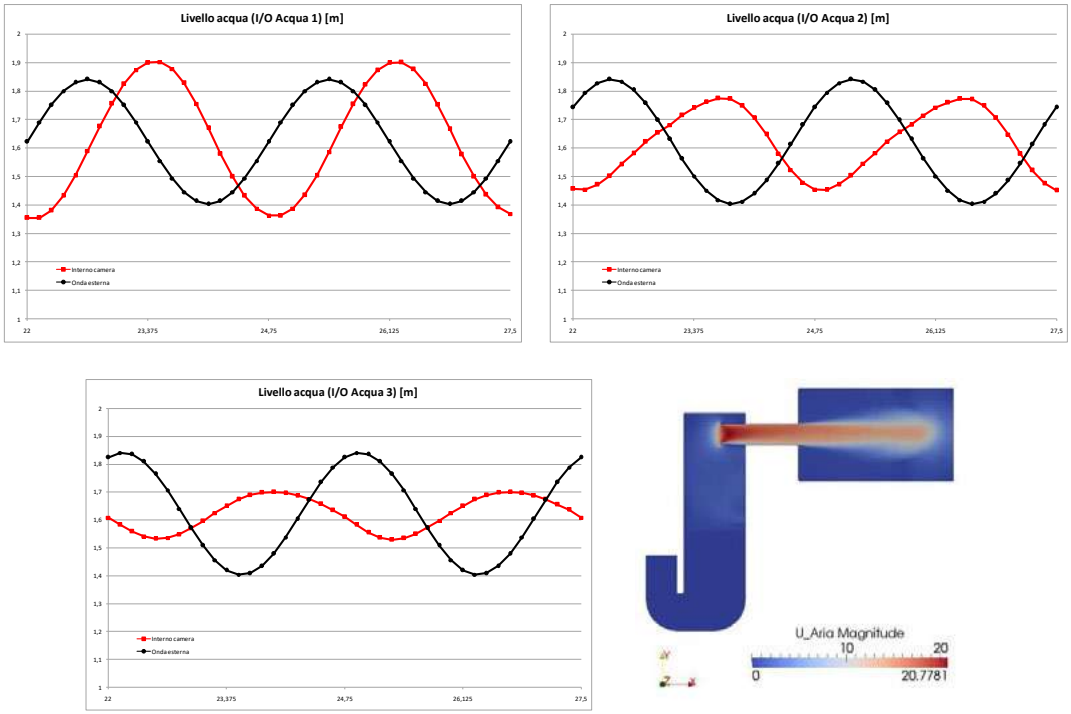


Figura 221. Confronto livello onda e livello acqua all'interno delle tre camere ed andamento della velocità dell'aria al tempo t = 25,575 s

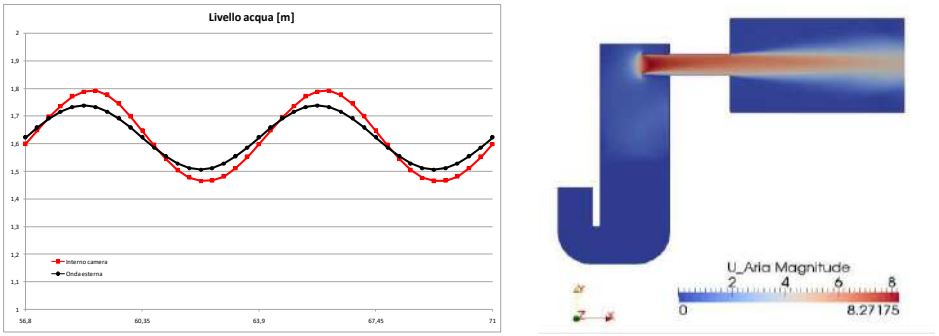


Figura 222. Confronto livello onda e livello acqua all'interno della camera ed andamento della velocità dell'aria al tempo t = 64,2555 s

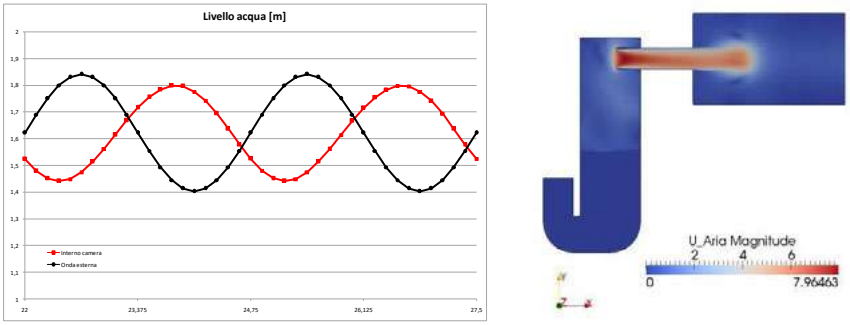


Figura 223. Confronto livello onda e livello acqua all'interno della camera ed andamento della velocità dell'aria al tempo t = 25,9875 s

Infine, nella seconda fase del progetto, è stato fatto un confronto tra i dati sperimentali ottenuti dall'Università di Reggio Calabria ed quelli ottenuti da una simulazione CFD corrispondente alle condizioni sperimentali.

Nella Figura 224 sono riportate le evoluzioni del livello dell'acqua all'interno della camera, quella ricavata sperimentalmente, in colore nero, e quella calcolata numericamente, in colore rosso, nell'intervallo temporale che va da 90 a 100 s, corrispondente agli ultimi 10 s di prova.

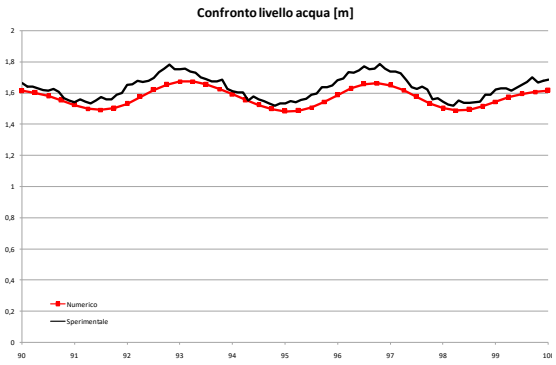


Figura 224. Confronto tra l'andamento nel tempo del livello dell'acqua all'interno della camera, calcolato numericamente (rosso), ed il corrispondente andamento valutato sperimentalmente (nero), nell'intervallo di tempo da 90s a 100s

Da una prima analisi si può affermare che esiste un buon accordo tra i dati sperimentali ed i dati ottenuti dai calcoli CFD. I risultati relativi all'implementazione e validazione dei modelli CFD sono riportati nel rapporto tecnico RdS/PAR2014/237.

d. Studio di un sistema PTO per OWC del tipo REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi

I dispositivi a colonna d'acqua oscillante sono la tipologia di convertitore di energia dalle onde del mare tra le più studiate e meglio sviluppate. I problemi principali che stanno limitando l'impiego di questi impianti in applicazioni reali sono intrinseci al sistema di estrazione (detto "power take-off", o più brevemente PTO) attualmente impiegato che si basa su turbogeneratore. I principi fluidodinamici ed elettrodinamici che governano il funzionamento delle turbine e delle macchine elettriche mostrano, infatti, che PTO di questo tipo sono poco adatti a convertire in maniera efficiente flussi d'aria di tipo alternato e, inoltre, caratterizzati da ampiezze e frequenze di oscillazione variabili. In aggiunta, a causa della complessità di fabbricazione, assemblaggio e d'installazione, e la limitata resistenza agli urti e alla corrosione, i turbogeneratori ad oggi disponibili sono una soluzione troppo costosa, tale da rendere lo sfruttamento dell'energia dalle onde del mare meno conveniente rispetto a quello di altre fonti rinnovabili.

Recentemente, è stato sviluppato un nuovo sistema di PTO che consente di trasformare la variazione periodica d'energia pneumatica in elettricità. Identificato con l'acronimo ICD-DEG (Inflatable Circular Diaphragm - Dielectric Elastomer Generator), questo sistema di estrazione è un capacitore elettrico deformabile, completamente realizzato in materiale elastomerico, che funziona mediante un principio puramente elettrostatico. Caratterizzato da una buona efficienza di conversione, pressoché indipendente dall'ampiezza e dalla frequenza dell'oscillazione, l'ICD-DEG è candidato ad essere un ottimo sistema di PTO per dispositivi a colonna d'acqua oscillante, grazie anche all'intrinseca semplicità architetturale, al basso costo di fabbricazione e d'installazione, oltre che per l'elevata resistenza agli urti e alla corrosione.

La fattibilità tecnica di impianti a colonna d'acqua oscillante equipaggiati con sistemi PTO del tipo ICD-DEG (il cui funzionamento è schematizzato in Figura 225) è stata verificata in attività di ricerca precedenti mediante simulazioni numeriche e test sperimentali in vasca effettuati su prototipi in scala ridotta (da 1:40 a 1:70). In tali studi però, gli effetti dissipativi dell'ICD-DEG che, a seconda del materiale impiegato, sono responsabili di riduzioni dell'efficienza di conversione nell'ordine del 10-40%, sono stati considerati solo parzialmente.

In questo contesto, il presente studio ha messo a punto un nuovo modello elettro-elastico che consente di effettuare la stima dell'efficienza di conversione degli ICD-DEG in maniera molto accurata. Il modello sviluppato si basa su risultanze sperimentali, ottenute mediante banchi di prova appositamente predisposti per la caratterizzazione elettromeccanica dei materiali impiegati, ed è stato verificato mediante dati sul comportamento globale dell'ICD-DEG che erano stati ottenuti in ricerche precedenti. Successivamente, il modello così ottenuto è

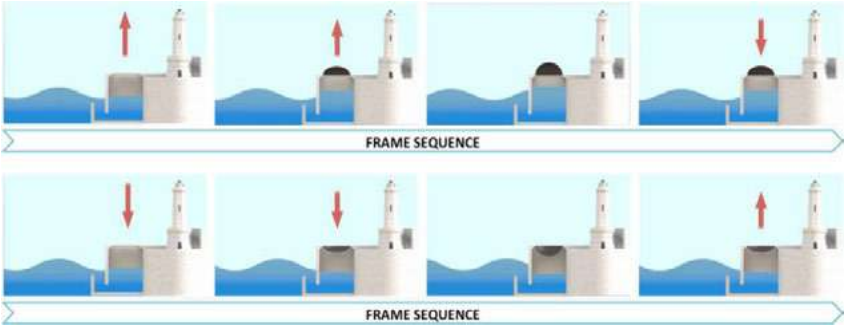


Figura 225. Impianto REWEC-GV equipaggiato con un ICD-DEG PTO

stato accoppiato ad un modello idrodinamico, che ha consentito di ottenere uno strumento per la simulazione delle prestazioni complessive (da onda del mare a rete elettrica) di impianti a colonna d'acqua oscillante equipaggiati da ICD-DEG PTO. Infine, a valle dell'identificazione dei parametri del modello idrodinamico, è stata condotta una campagna di simulazioni numeriche per effettuare il dimensionamento e per valutare la fattibilità di un ICD-DEG PTO per il cassone REWEC-GV che è installato presso il laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria. I risultati dell'indagine confermano la piena validità tecnica della soluzione proposta.

Nell'ambito del presente obiettivo è stata inoltre condotta una campagna di test sperimentali su un banco-prova costituito da un prototipo in scala ridotta di un Power Take Off (PTO) innovativo per un sistema di conversione di energia dal moto ondoso. Il PTO in esame è costituito da elastomeri dielettrici, ovvero materiali polimerici altamente deformabili utilizzati per costituire generatori elettrostatici che sfruttano variazioni di capacità elettrica per convertire lavoro meccanico in energia elettrica. Il convertitore di energia dalle onde considerato è il dispositivo di tipo Oscillating Water Column (OWC) REWEC sviluppato dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Scopo del lavoro è stato quello di verificare la fattibilità preliminare dell'installazione di un PTO a diaframma circolare basato su elastomeri dielettrici (Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generator, CD-DEG) sull'impianto pilota REWEC di Reggio Calabria.

Nel corso del progetto, sono stati sviluppati gli algoritmi di controllo per un sistema di simulazione di tipo Hardware-in-the-Loop (HIL), che sfrutta un prototipo fisico di PTO in piccola scala ottenuto attraverso una customizzazione di un banco-prova disponibile presso i laboratori della Scuola Sant'Anna di Pisa (Figura 226).

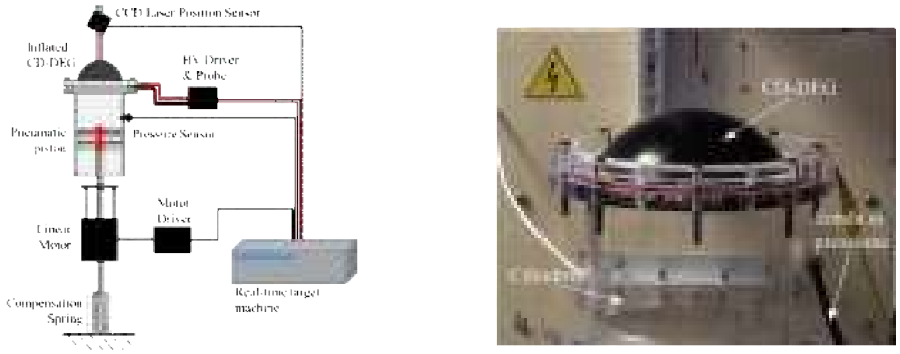


Figura 226. Schema del setup sperimental e foto del prototipo di CD-DEG e della camera pneumatica su cui è alloggiato

Il prototipo è costituito da un CD-DEG montato su una camera d'aria (che replica la camera dell'OWC) alla base della quale è collocato un pistone rigido (che emula gli spostamenti della colonna d'acqua). Il setup sfrutta un modello software dell'idrodinamica del REWEC che riceve come input le letture di pressione rilevate sul prototipo hardware, comanda real-time lo spostamento del pistone (in base allo spostamento calcolato della colonna d'acqua) e controlla l'attivazione elettrica del CD-DEG.

Lo scopo principale degli esperimenti è stato quello di verificare l'implementabilità delle strategie di controllo precedentemente teorizzate. Nel corso del progetto, è stato sviluppato un circuito elettronico che, con l'espediente dell'inserimento di una capacità ausiliaria in parallelo al CD-DEG, consente di effettuare cicli di controllo ad elevata energia convertita, pur mantenendo logiche di controllo piuttosto semplici, che non

richiedono alcuna predizione delle onde incidenti.

Gli esperimenti hanno dimostrato l'effettiva efficacia del circuito e delle strategie di controllo studiate, che si sono rivelate implementabili anche in presenza di onde (simulate) irregolari pancromatiche. Sulla base di tale riscontro è stato possibile procedere ad un dimensionamento di massima dell'architettura elettronica di un PTO polimerico per l'impianto REWEC di Reggio Calabria. Dettagli su questa attività sono riportati nel rapporto RdS/PAR2014/221.

e. Progettazione ed esecuzione delle prove su di un prototipo in scala di dispositivo point absorber "passivo" per il recupero di energia da moto ondoso

Il sistema PEWEC (Pendulum Wave Energy Converter) è costituito da uno scafo galleggiante, all'interno del quale è presente un pendolo in grado di oscillare rispetto alla sua cerniera. La cerniera è solidale allo scafo e in corrispondenza della medesima è installato un generatore elettrico (detto anche Power Take Off, PTO). Infine lo scafo è tenuto in posizione rispetto al fondale marino mediante una linea di ormeggio. In Figura 227 è riportato uno schema qualitativo del dispositivo.

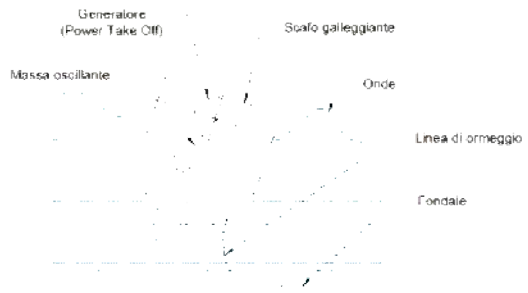


Figura 227. Schema qualitativo PEWEC

Le equazioni dinamiche non lineari del Pendulum Wave Energy Converter sono state derivate applicando l'approccio lagrangiano sui tre gradi di libertà dello scafo (x_G, z_G, δ) e sul grado di libertà interno al sistema ε associato al pendolo. In seguito, considerando l'ipotesi di spostamenti angolari sufficientemente piccoli, le equazioni non lineari sono state linearizzate e quindi semplificate. La modellazione idro-dinamica di uno scafo soggetto al moto delle onde marine è rappresentabile dall'equazione di Cummins. La definizione dei termini non lineari dell'equazione di Cummins, come gli effetti della massa aggiunta e delle onde prodotte dallo scafo stesso ha richiesto l'utilizzo di software specialistico. La risoluzione dell'equazione ha richiesto l'uso di un metodo numerico standard implementato in ambiente MATLAB/Simulink.

Successivamente la risorsa è stata analizzata nei punti di riferimento di Alghero e Pantelleria. Il punto di progetto può essere individuato incrociando i dati delle condizioni ondose dei siti scalati con le specifiche della vasca. Si possono dunque effettuare le seguenti considerazioni:

- *Massima ricorrenza*: sia nel caso di Alghero che in quello di Pantelleria, la scalatura dello stato di mare reale con fattori compresi fra 8 e 15, porta all'ottenimento di densità di potenza massime di 5,16 W/m, valore troppo piccolo per ottenere risultati apprezzabili. Viene dunque scartata la condizione di massima ricorrenza;
- *Massima energia*: di densità di potenza accettabili. Per quanto riguarda il sito di Alghero si può affermare che è replicabile in vasca quando la scala è compresa tra 1:12 e 1:15, infatti per scale più grandi il periodo tipico cade al di fuori del range nominale della vasca.

In ultima analisi lo scafo e il sistema pendolo sono stati identificati seguendo le seguenti strategie:

- uso geometria cilindrica
- la lunghezza del pendolo deve poter essere regolata in modo da poter investigare configurazioni risonanti a periodi diversi da quello nominale.

Il sistema finale ha le seguenti caratteristiche:

- larghezza 2 m
- lunghezza 3 m
- altezza 1,5 m
- massa totale 3000 kg
- massa pendolo 200-400 kg.

La metodologia progettuale del prototipo PEWEC è descritta in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2014/226. Il rapporto RdS/PAR014/227 documenta invece le fasi di progettazione meccanica e di costruzione del prototipo PEWEC in scala 1:12 attraverso la descrizione del sistema e delle sue parti principali e attraverso una selezione delle principali tavole di progettazione e rendering. Il prototipo del dispositivo PEWEC in scala 1:12 è costituito da circa 50 parti in acciaio o altri materiali fabbricati su disegno e circa 20 pezzi commerciali. La progettazione del sistema e il disegno delle parti da fabbricare è stata curata dal Politecnico di Torino in collaborazione con l'ENEA. La fabbricazione delle parti e l'assemblaggio sono stati eseguiti mediante affidamento ad una ditta specializzata nelle lavorazioni meccaniche di precisione, con la supervisione di ENEA e Politecnico. Questi ultimi hanno curato

l'installazione delle parti elettriche, i cablaggi, le verifiche in corso di lavorazione e l'accettazione del prototipo.

Il progetto meccanico si compone di oltre 100 tavole, tra complessivi e dettagli. Le componenti principali del prototipo sono: 1) Scafo, 2) Copertura dello scafo, 3) Massa oscillante, 4) Gruppo PTO (power take off), 5) Gruppo di sollevamento PTO, 6) Linea di ormeggio.

Lo scafo è realizzato in lamiera di acciaio inox con spessore di 4 mm. La forma è semicilindrica, con raggio 1500 mm e larghezza 1992 mm. L'interno è rinforzato con profilati cavi a sezione rettangolare e contiene le mensole per il fissaggio delle zavorre, delle batterie e dei quadri elettrici. La copertura è realizzata in plexiglas, imbullonata alla cornice dello scafo e parzialmente apribile a scorrimento con passo d'uomo.

La massa oscillante, che può essere variata fino a 570 kg, è distribuita su due pendoli, ciascuno da un lato del generatore elettrico. Ogni pendolo è costituito da un'asta centrale, lunga circa 1 m, nella parte superiore calettata all'albero del generatore e nella parte inferiore costituita da una raggiera da cui si dipartono 6 bracci, all'estremità di ciascuno dei quali possono essere fissati fino a 4 dischi di acciaio da 12 kg. Sia l'asta centrale che i bracci hanno diverse forature per poterne variare agevolmente le lunghezze in base alle esigenze sperimentali.

Il gruppo PTO è costituito da generatore elettrico del tipo brashless a controllo elettronico, dall'albero e da due cuscinetti di supporto con rulli a botte orientabili tipo SKF.

Il gruppo di sollevamento del PTO è una struttura di supporto a colonna, con una parte fissa, imbullonata al fondo dello scafo, ed una parte scorrevole che supporta il PTO e la cui altezza dal fondo dello scafo può essere variata, in base alle esigenze sperimentali, mediante un martinetto con motore elettrico e in caso di necessità può essere azionato manualmente con apposita manovella.

La linea di ormeggio serve a mantenere lo scafo in posizione e controllarne le forze di tiro. È costituito dal galleggiante (gavitello), massa di zavorra, celle di carico, funi e sistemi di fissaggio. La geometria della linea di ormeggio determina l'asse di rotazione dello scafo e il modo di oscillare del sistema.

Il prototipo PEWEC è rappresentato nelle Figure 228-230.

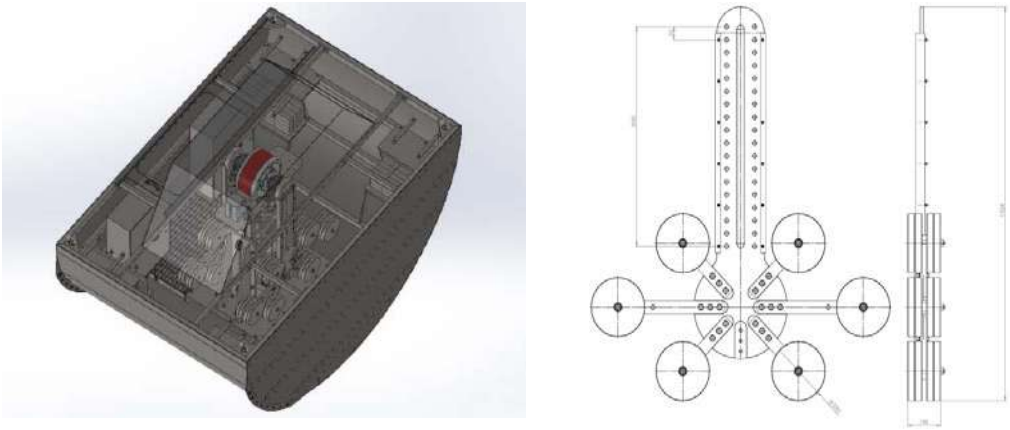


Figura 228. Rendering prototipo PEWEC e schema del pendolo

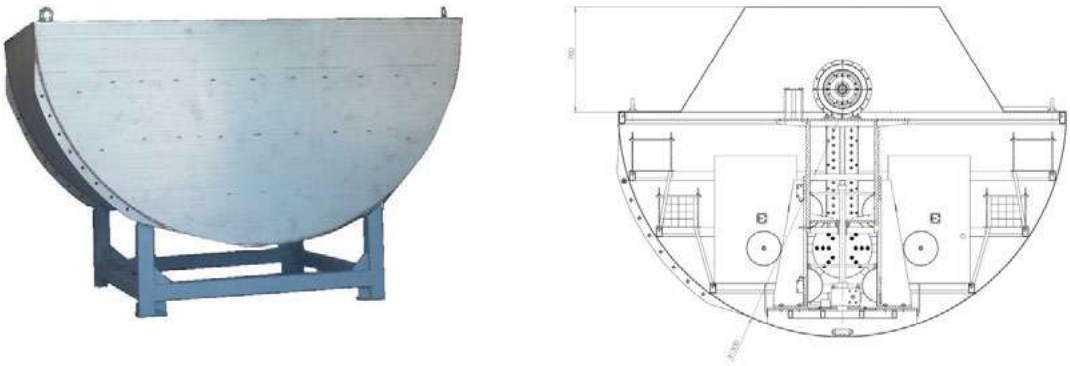


Figura 229. Scafo e sezione trasversale del prototipo



Figura 230. Il prototipo in assetto di prova

Nel report RdS/PAR2014/228 è presentata l'attività di sperimentazione sul prototipo del sistema di conversione di energia da moto ondoso a massa oscillante in scala 1:12. In tale sistema le onde provocano l'oscillazione dello scafo che la trasmette al pendolo contenuto internamente. Il moto relativo scafo-pendolo attiva un generatore che produce energia elettrica.

Dopo la realizzazione meccanica dei componenti del sistema è stata avviata l'attività di messa a punto del prototipo PEWEC in scala 1:12, necessaria per la verifica del funzionamento dei sistemi di bordo e di acquisizione del sistema.

È stata condotta una campagna sperimentale presso il bacino di prova INSEAN, che in una prima fase ha permesso di verificare la qualità delle onde selezionate per i test e la risposta in frequenza a pendolo bloccato del prototipo PEWEC. La seconda parte della campagna di prova è stata progettata in modo da valutare il comportamento dinamico del sistema sia in onda regolare, sia in onda irregolare, nonché al variare dei parametri di controllo del PTO. Per quanto riguarda l'analisi in onda irregolare, è stata considerata un'onda misurata presso il sito di Pantelleria e scalata del fattore di scala 12 comparata con un'onda isoenergetica sintetica generata con armoniche a fase random.

Il sistema PEWEC ha mostrato efficienze di cattura superiori al 60% nei test in onda regolare e pari al 40% per test in onda irregolare.

f. Comunicazione e diffusione dei risultati

Nel corso del progetto sono state intraprese diverse attività per la comunicazione e la diffusione dei risultati: organizzazione di workshop e sessioni in congressi internazionali, produzione di articoli scientifici, presentazioni a congressi, divulgazione delle attività per mezzo di media nazionali, e sviluppo di un Geo-portale per la consultazione dei dati prodotti dal progetto.

A livello europeo sono state attivate sinergie attraverso la partecipazione al programma congiunto di ricerca sull'energia dal mare (*JP Marine Renewable Energy*) proposto dalla EERA *European Energy Research Alliance*. ENEA partecipa in maniera attiva al progetto congiunto attraverso il coordinamento delle Università e dei centri di ricerca nazionali.

Organizzazione Workshop

Il settimo appuntamento del ciclo di convegni tematici sulla Ricerca di Sistema Elettrico, iniziativa ENEA volta a diffondere e rafforzare la conoscenza dei risultati ottenuti dalla ricerca di sistema elettrico nel triennio 2012-2014, è stato dedicato all' "Energia elettrica dal mare", e si è tenuto presso la sede ENEA di Roma il 7 luglio 2015.

L'obiettivo di questa giornata di approfondimento è stato quello di presentare e promuovere le attività che ENEA ha condotto, in collaborazione con i partner universitari, nell'ambito dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA. Durante il workshop è stato inoltre presentato al pubblico il prototipo PEWEC per il recupero dell'energia dal moto ondoso.

Al workshop hanno partecipato tra gli altri: RSE, Radio24, Wavenergy.it S.r.l., UMBRA Group, Faggiolati Pumps S.p.A., ENEL GP, Impresa Pietro Cidonio S.p.A, Wave for Energy, Bosch Rexroth S.p.A. Italy. Le presentazioni tenute durante il workshop sono state rese pubbliche attraverso il seguente indirizzo web: http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/events/rds_energiamare_7lug15/energia-elettrica-dal-mare.

Organizzazione Sessione per MARINE 2015

Lo scorso 15-17 luglio è stato organizzato a Roma, presso la sede centrale del CNR, la sesta conferenza internazionale sul tema "Computational Methods in Marine Engineering (Marine 2015)". All'interno del convegno è stata organizzata da ENEA la sessione su invito dal titolo "Computational Methods in Support of Ocean Energy Harvesting".

Realizzazione di una newsletter dedicata all'energia dal mare

La Newsletter "L'Energia dal Mare" fornisce una rassegna delle principali attività a livello nazionale nel settore della ricerca volta alla produzione di energia dal mare: i risultati scientifici, le iniziative, i seminari, i convegni.

La realizzazione della Newsletter è nata dalla necessità di disporre di uno strumento efficace di distribuzione delle informazioni e di una raccolta organica e aggiornata di quanto viene prodotto su tale tema, mettendola a disposizione dei principali utenti italiani operanti nel settore della ricerca e produzione dell'energia dal mare. La Newsletter rientra nelle iniziative di diffusione portate avanti da ENEA e RSE nell'ambito dei relativi Accordi di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico. In questo ambito, la newsletter si configura come un'iniziativa innovativa che, non solo permette di riportare in un unico contesto i risultati salienti che i due affidatari della ricerca hanno ottenuto nel Progetto, ma si prefigge lo scopo di promuovere lo sviluppo del settore delle energie rinnovabili dal mare attraverso la condivisione delle conoscenze e delle recenti esperienze nella valutazione della risorsa e nella realizzazione di dispositivi di conversione del potenziale energetico marino in energia elettrica.

Il primo numero della newsletter consultabile al seguente indirizzo web:
http://utmea.enea.it/lists/newsletter/newsletter.html

Geoportale

Nell'ambito delle attività di questo obiettivo è stato inoltre progettato e realizzato il Geoportale "Waves Energy": esso rappresenta il punto di accesso per la consultazione dei dati e delle mappe geospaziali prodotti. I dati geospaziali messi a disposizione del Geoportale sono raggruppati nelle seguenti tre categorie: a) "Forecasting" (Output dei modelli previsionali per il Mediterraneo); b) "Climatology" (Serie temporali per il Mediterraneo) e c) "Other Layers" (Mappe e Layer geografici di base). I suddetti dati sono disponibili ed accessibili dal Geoportale tramite le seguenti applicazioni:

- Map Viewer "Waves Energy" (Applicazione con accesso libero, Figura 231)
- WebGIS-DSS "Waves Energy" (Applicazione con autenticazione richiesta)
- Catalogo dei servizi OCG (Accesso diretto ai layer tematici mediante servizi GIS)



Figura 231. Pagina web del Geoportale "Waves Energy" relativa alla sezione di accesso al "Map Viewer"

Le applicazioni Map Viewer e WebGIS-DSS sono state realizzate utilizzando ambienti software free/open source, sfruttando una serie di soluzioni applicative adatte agli scopi ed implementabili mediante la realizzazione di piattaforme integrate e *user-friendly*. Questa soluzione ha permesso di pubblicare sul web le suddette informazioni geospaziali, seguendo gli standard richiesti dall'Open Geospatial Consortium (OGC), attraverso una serie di caratteristiche specifiche per la visualizzazione e la consultazione delle mappe tematiche in un *framework* avanzato, sviluppato su misura per l'applicazione "Waves Energy".

Il Geoportale è stato realizzato in due versioni gemelle (in lingua italiana ed inglese), al fine di raggiungere una più vasta platea di fruitori. Inoltre, esso è articolato diverse sezioni. In particolare, nella Home Page è possibile trovare una breve descrizione del Geoportale stesso, dei principali contenuti e da qui, quindi, navigare attraverso le varie sezioni (indicate nel menu "a schede" in alto) o attraverso specifici link diretti (ad accesso rapido, detti anche "shortcuts") o collegamenti esterni, posti sul lato destro della pagina.

Il Map Viewer "Waves Energy" si basa su un'interfaccia WebGIS *user-friendly*: è stato progettato e realizzato allo scopo di pubblicare e condividere i dati geospaziali relativi alle aree marine e costiere di interesse e, quindi, fornire

un supporto alla valutazione delle risorsa energia dal mare. L'accesso ai dati ed alle mappe tematiche è libero. L'applicazione WebGIS-DSS "Waves Energy"(Figura 232) è stata implementata per rendere fruibili gli strati informativi di tipo climatologico e previsionale, relativi all'utilizzo potenziale della risorsa energia dal mare, nonché per la condivisione delle mappe tematiche e dei dati geospaziali riguardanti le aree di interesse. L'applicazione ha, inoltre, l'obiettivo di supportare le attività di monitoraggio e gestione connesse all'utilizzo della risorsa energia dal mare.

Inoltre, il Geoportale "Waves Energy" è stato appositamente progettato e sviluppato con l'obiettivo di rendere fruibili e consultabili on-line i risultati ottenuti nell'ambito delle attività progettuali. La maggior parte dei dati disponibili possono essere visualizzati ed utilizzati anche attraverso servizi web standard OGC come Servizi WMS (Web Map Services).



Figura 232. Applicazione WebGIS-DSS "Waves Energy": esempio di visualizzazione e consultazione degli strati informativi di base a supporto dei processi decisionali

Speciale 'Ocean energy: Ongoing research in Italy'



Lo scorso settembre 2015 è stata pubblicata online l'edizione speciale della rivista EAI - Energia, Ambiente e Innovazione, sul tema dell'energia dal mare. Il bimestrale tecnico-scientifico dell'ENEA offre una panoramica aggiornata sulle attività in corso e sui risultati raggiunti dalla ricerca italiana nello sfruttamento del potenziale energetico del moto ondoso e delle maree.

Lo speciale *Ocean energy: Ongoing research in Italy* è stato ideato come una raccolta di articoli scientifici che descrivono le tecnologie di conversione dell'energia marina progettate per i mari italiani dai principali centri di ricerca e università nazionali.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università 'Mediterranea' di Reggio Calabria, Dipartimento Ingegneria Civile, Energia, Ambiente

Le attività dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria hanno riguardato l'esecuzione di attività sperimentali di campo sul prototipo REWEC3-GV in scala 1:8. Le prove sperimentali, concordate con ENEA, sono state eseguite presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università. L'Università Mediterranea ha sviluppato inoltre il modello CFD in configurazione 2D in collaborazione con ENEA.

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Le attività del Politecnico di Torino hanno riguardato principalmente la progettazione del prototipo point-absorber in scala 1:12 denominato PEWEC. La progettazione è stata realizzata in stretta collaborazione con ENEA. Il Politecnico ha seguito, sempre in collaborazione con ENEA la successiva fase di costruzione del prototipo e la fase di test, presso la vasca navale del CNR-INSEAN di Roma.

Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Nell'ambito del progetto il Dipartimento di Ingegneria Industriale si è occupato del problema della modellazione idrodinamica del REWEC accoppiata a un modello elettro-iperelastico del Power Take Off (PTO) basato elastomero dielettrico. Tale modellazione è propedeutica alla costruzione/dimensionamento del prototipo da banco dedicato.

Scuola Superiore Sant'Anna, Centro SEES, Istituto TeCIP

Il Centro SEES si occupato dell'approntamento del banco di prova per un PTO basato su materiali ad elastomero dielettrico, dell'implementazione dei controllori, dello svolgimento dei test e dell'analisi dei risultati. Il lavoro è stato svolto in parallelo e come parte complementare delle attività effettuate da ENEA e dall'Università di Bologna, nell'ambito del quale sono stati approfonditi temi inerenti la modellazione di sistemi accoppiati OWC-PTO polimerico.

Cattura e sequestro della CO_2 prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

La transizione verso un'economia non più basata sul carbonio, caratterizzata dal massiccio ricorso a fonti rinnovabili, sarà un processo graduale che vedrà ancora, nel breve-medio termine, l'utilizzo di combustibili fossili.

La Roadmap Europea dell'energia al 2050 pone come target la riduzione entro il 2030 delle emissioni di gas serra del 40% rispetto ai valori del 1990, e in prospettiva una riduzione dell'80-95% entro il 2050, in linea con l'obiettivo, concordato a livello internazionale, di limitare il riscaldamento globale a 2 °C. Essa prevede, tra l'altro, il ricorso massiccio a efficienza energetica e fonti rinnovabili e l'adozione di tecnologie di cattura e stoccaggio della CO_2 per gli impianti a fossili. In particolare, lo sviluppo sostenibile in campo energetico, consiste nella sintesi tra sostenibilità ambientale, sicurezza degli approvvigionamenti energetici e competitività economico-industriale. Le attività di ricerca devono dunque tradursi nello sviluppo di tecnologie per la riduzione delle emissioni in atmosfera, riduzione del consumo di energia, sviluppo delle rinnovabili, e diversificazione delle fonti di energia, senza sottovalutare i problemi di stabilità delle reti e quelli legati alla variabilità di energia prodotta da rinnovabili.

Sul fronte nazionale, il documento di Strategia Energetica Nazionale (SEN), definisce gli obiettivi nel breve-medio periodo in coerenza con le indicazioni della UE, delineando una serie di azioni da portare a termine entro il 2020 e le direttrici per gli anni successivi, con una attenzione non marginale alle attività di ricerca che traguardano il prossimo decennio. In essa continua a ritenersi strategico lo sviluppo delle tecnologie di cattura e sequestro della CO_2, e tuttavia, i profondi cambiamenti intervenuti sul fronte della produzione elettrica, allontanando la prospettiva di un'applicazione industriale nel breve periodo di tali tecnologie, motivano l'opportunità di concentrare gli sforzi su attività di ricerca relative a tecnologie più avanzate e meno mature, ove non interamente nuove, che possano portare ad un miglioramento dell'efficienza del processo di cattura, che risultino meno energivore delle attuali e con una netta riduzione dei costi.

In questo contesto, per dare inoltre risposte adeguate alla crisi industriale dell'area sud occidentale della Sardegna è stato lanciato il Piano Sulcis – frutto di un accordo fra Regione Sardegna e alcuni ministeri del Governo nazionale - nel cui ambito è prevista la realizzazione di un Polo Tecnologico per lo sviluppo di energie *zero emission*, che faccia ovviamente riferimento al carbone, ma guardi anche alle rinnovabili ed alla loro integrazione con impianti a combustibili fossili. Il sistema energetico, infatti, si caratterizza sempre più come un sistema integrato, dove si fa strada la logica della *"poligenerazione"* – generazione combinata di elettricità, nuovi combustibili e *chemicals* – e l'impiego sinergico di fonti primarie diverse, non trascurando sistemi di accumulo basati sulla conversione di elettricità in altri vettori energetici (idrogeno, gas naturale sintetico, metano).

Per rendere possibili gli obiettivi strategici citati, è necessario dunque un grande sforzo di ricerca. A tal riguardo, il Progetto ha per finalità lo sviluppo, la validazione teorica e sperimentale e la dimostrazione su scala significativa di un ventaglio di tecnologie innovative per l'impiego sostenibile di combustibili fossili, sia per la produzione di energia elettrica, che di combustibili liquidi o gassosi.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto è articolato in linee progettuali che hanno come obiettivi finali: lo sviluppo di tecnologie CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) su scala laboratorio e pilota, l'integrazione di processi e il supporto ad attività di dimostrazione, l'efficienza energetica nello sfruttamento del combustibile.

Le attività si articolano in una Parte A, di esclusiva pertinenza ENEA e di una Parte B, di esclusiva pertinenza del Polo Tecnologico del Sulcis, che si articola in due linee progettuali distinte:

- *Linea Progettuale B1*, a responsabilità SOTACARBO
- *Linea Progettuale B2*, a responsabilità ENEA.

Nel dettaglio il progetto è strutturato come segue:

Linea Progettuale A

a. Cattura della CO_2 con sorbenti solidi tramite "calcium looping" e "mineral carbonation"

b. Ampliamento del range operativo di sistemi turbogas sottoposti a variabilità del carico e della composizione del combustibile
c. Cicli turbogas a CO_2
d. Utilizzo della CO_2 per produzione di combustibili

Linea Progettuale B1

a. Cattura della CO_2 in pre-combustione e trattamento del syngas con produzione di combustibili gassosi
b. Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di ossi-combustione
c. Monitoraggio e storage della CO_2
d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Linea Progettuale B2

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in Pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi
b. Studi e sperimentazioni relative alla produzione di SNG da CO e CO_2
c. Sviluppo di diagnostica per applicazioni in ossi-combustione: studio di sistemi ottici per la misura dell'ossigeno nei prodotti di combustione in regime MILD
d. Comunicazione e diffusione dei risultati

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

LINEA PROGETTUALE A. ENEA

Il *"panel"* di tecnologie proposte è caratterizzato da un diverso grado di maturità, pertanto nella Linea Progettuale A vengono affrontate soluzioni tecnologiche più avanzate e innovative, sia in termini di prestazioni energetiche che ambientali, puntando alla loro dimostrazione su scala di laboratorio o pilota, essendo infatti indirizzate a soluzioni nel medio-lungo periodo.

a. Cattura della CO_2 con sorbenti solidi tramite "calcium looping" e "mineral carbonation"

I temi sviluppati nell'ambito della presente obiettivo, riguardano lo sviluppo di tecnologie di gassificazione con ossigeno e vapore e successiva separazione della CO_2 attraverso l'uso di sorbenti solidi di origine naturale, per consentire la produzione di energia *low-carbon* a partire da combustibili fossili (metano, carbone) con elevata efficienza termica. In particolare sono stati proposti e testati nuovi processi (trattamenti su sorbenti della CO_2) o nuovi materiali (membrana perovskitica per la separazione dell'ossigeno dall'aria) a supporto dell'ottimizzazione del processo in esame.

Si è avviato inoltre lo studio sperimentale di un processo detto di *mineral carbonation*, applicabile a un settore industriale particolarmente energivoro quale l'industria siderurgica, come opzione tecnologica per il contemporaneo utilizzo e stoccaggio della CO_2, una volta separata.

a.1 Cattura in pre-combustion basata sul "Calcium Looping": attività di laboratorio e sperimentazione sulla Piattaforma ZECOMIX

Nell'ambito del task sono state individuate tre distinte fasi dell'attività di ricerca.

Individuazione di trattamenti su sorbenti di origine naturali o sintetici a base di CaO per la cattura della CO_2 ad alta temperatura

A scala laboratorio è stato testato un pretrattamento termico per stabilizzare la capacita sorbente della dolomite utilizzata nell'Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX (Figura 233) per la separazione della CO_2. In particolare è stato studiato l'effetto che ha la composizione dell'atmosfera durante la rigenerazione del materiale solido sull'assorbimento della CO_2. La composizione è stata fatta variare in un analizzatore termo-gravimetrico (TGA) secondo due metodi: (i) da 100 % N_2 a 50/50 v/v % CO_2/N_2 e (ii) da 50/50 v/v % CO_2/N_2 con successiva calcinazione 100% N_2 (*triggered calcination*). Questo secondo pretrattamento migliora sia la stabilità chimica del materiale (Figura 234) che la prestazione del materiale sorbente fino al 24% registrato per il 150° ciclo di cattura CO_2 – rigenerazione materiale (rapporto RdS/PAR2014/121).



Figura 233. Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX (Zero Emission of CarbOn with Mixed Technology)

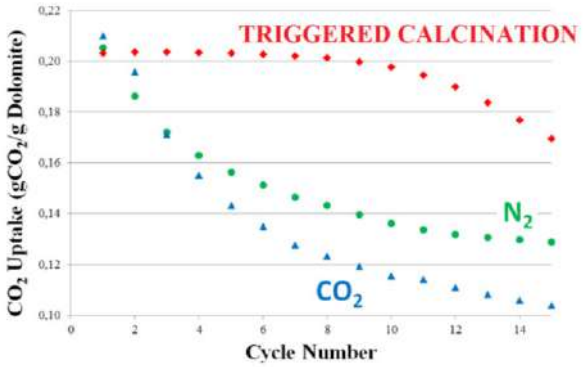


Figura 234. Effetto della triggered calcination sulla stabilità del materiale sorbente

Sono stati studiati altri parametri operativi come la velocità di riscaldamento, la concentrazione della CO_2 e i tempi di carbonatazione oltre ad altri metodi di pretrattamento. Il miglioramento del materiale in termini di cattura della CO_2 viene spiegata come risultato di possibili cambiamenti nella struttura interna del materiale. E' stato infine effettuato uno studio della superficie specifica della dolomite mediante un metodo indiretto basato su esperimenti in TGA portando alla conclusione che la *triggered calcination* applicata '*in–situ*' prima dei cicli di cattura/rigenerazione sembra portare ad una struttura porosa più stabile durante tutta la campagna sperimentale condotta in TGA.

L'attività è stata condotta in collaborazione con l'Università de L'Aquila che ha eseguito analisi per valutare il cambiamento strutturale e morfologico dopo il pretrattamento, le alterazioni della struttura cristallina e lo studio micro strutturale del solido, eseguendo analisi, di tipo: XRD, BET, SEM-EDS.

I dettagli dei test sperimentali sono riportati nel rapporto RdS/PAR2014/121.

Sperimentazione del ciclo di assorbimento sull'Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX

In questa annualità l'Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX è stata predisposta per l'integrazione, in un unico processo, sia della gassificazione del carbone che la successiva decarbonizzazione del syngas (principalmente composto da CO e H_2) nel carbonatatore, attraverso l'uso di sorbenti solidi.

A tal fine sono state condotte due campagne sperimentali: (i) la prima è stata condotta per testare in condizioni batch la reazione SEWGS (*Sorption Enhanced Water Gas Shift*) cioè la reazione tra CO e H_2O (eq. 1) in presenza di materiale solido per la separazione simultanea della CO_2 (eq.2) (i) la seconda di carattere più impiantistico è stata focalizzata su eventuali criticità durante l'accoppiamento tra l'isola di gassificazione ed il carbonatatore,

$$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2 \qquad (1)$$

$$CaO+CO_2 \rightarrow CaCO_3 \qquad (2)$$

In particolare è stato testato il processo di SEWGS in assenza di catalizzatori: l'alta temperatura del processo (650 °C) e la presenza di materiale sorbente della CO_2 (dolomite calcinata), hanno favorito, probabilmente, la reazione di WGS, che normalmente viene condotta a più basse temperature (180-400 °C) e in presenza di catalizzatori. La dolomite tal quale è stata caricata all'interno del carbonatatore attraverso una procedura di start-up già testata e collaudata nell'annualità precedente: le particelle sono state fluidizzate e calcinate ad una temperatura superiore a 800 °C.

Una volta calcinato il letto, il reattore è stato alimentato da una corrente di N_2 al fine di diluire l'eventuale presenza di O_2 all'interno del letto fluido e per abbassare la temperatura fino alla temperatura operativa del processo di SEWGS (circa 650 °C). E' stata prodotta, quindi, una miscela gassosa composta da CO e H_2O da avviare al letto fluido. La miscela gassosa ha continuato a fluidizzare le particelle di sorbente mentre il CO all'interno dell'ambiente riducente ha reagito con il vapor d'acqua producendo H_2 e CO_2. L'anidride carbonica a sua volta ha reagito con le particelle di sorbente spostando in tal modo la reazione di WGS sempre più verso la produzione di H_2. Il gas così decarbonizzato, è stato avviato ad una torcia per la sua combustione in aria. E' stata utilizzata una metodica di campionamento e di monitoraggio già sviluppata durante l'annualità precedente: parte del gas, all'uscita del reattore, è stato infatti, campionato, essiccato ed analizzato attraverso un gas-cromatografo per misurarne la composizione. La portata dei reagenti, la composizione del gas prodotto ad alto contenuto di H_2 e la temperatura durante la reazione di SE-WGS è riportato nella Figura 235. I dettagli del test sperimentali sono riportati nel rapporto RdS/PAR2014/248.

Le attività sperimentali sulla piattaforma ZECOMIX sono state condotte con la collaborazione dell'Università de L'Aquila.

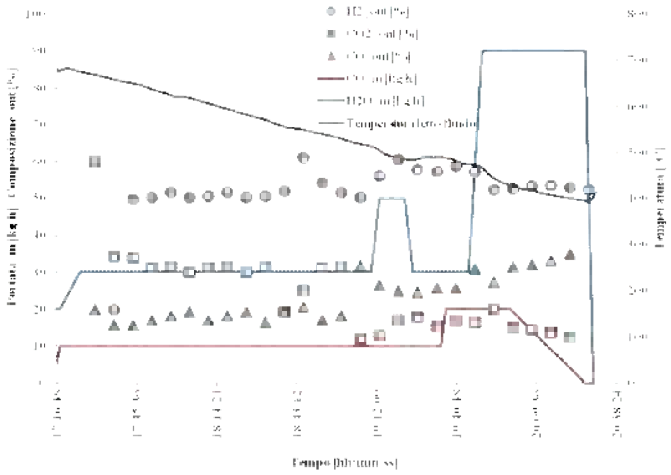


Figura 235. Parametri in ingresso e riposta del carbonatatore durante il processo SEWGS

A integrazione dei test sperimentali, sono state condotte, originariamente non previste nel programma, prime simulazioni del carbonatatore attraverso il codice di simulazione Barracura® della CPFD che utilizza un approccio Euleriano-Lagrangiano: invece di calcolare l'evoluzione di ciascuna particella, queste vengono raggruppate in funzione della dimensione, delle specie etc., in particelle computazionali. In questo modo è possibile modellare sistemi con un elevato numero di particelle con un onere computazionale contenuto, visto che le collisioni non sono direttamente calcolate ma modellate come gradiente spaziale calcolato sulla griglia euleriana. Comunque la fase del solido e quella del gas risultano completamente accoppiate in termini di interscambio di massa, quantità di moto ed energia. Barracuda è inoltre in grado di sfruttare la potenza di calcolo delle schede GPU (Graphics Processing Unit) per parallelizzare il calcolo delle particelle. In particolare sono state utilizzate le schede TESLA presenti sulla piattaforma CRESCO per simulare il comportamento idrodinamico del letto di particelle (rapporto RdS/PAR2014/248).

Come si vede dai primi risultati riportati in Figura 236 (grado di vuoto all'interno del letto), i parametri scelti (portata di CO e H_2O e quantità di materiale solido all'interno del letto) consentono una fluidizzazione omogenea in tutto il letto e l'assenza di canali preferenziali.

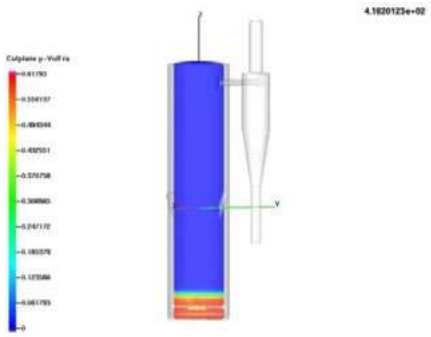


Figura 236. Simulazione numerica ottenuta tramite il simulatore Barracuda® del grado di vuoto all'interno del letto del carbonatatore durante il test sperimentale di SEWGS

Studio sperimentale e modellistico sull'utilizzo di membrane per la produzione di O_2 durante il processo di gassificazione del carbone

Nella presente annualità sono stati condotti, studi sperimentali di permeazione dell'ossigeno attraverso una membrana tubolare di tipo BSCF ($Ba_{0,5}Sr_{0,5}Co_{0,8}Fe_{0,2}O_{3-\delta}$) in scala laboratorio nel range di temperatura 850-1000 °C, pressione atmosferica ed utilizzando aria come fonte di ossigeno. Due diversi moduli di membrana sono stati progettati e realizzati per le misure di permeazione ad alta temperatura con la membrana capillare di spessore 0,35 mm ed utilizzando elio come gas di *sweep*: una semplice configurazione che utilizza aria ambiente come fonte di ossigeno ed una seconda che prevede uno *shell* esterno al modulo membrana dove le misure di permeazione sono condotte con diverse portate di aria di bombola, eventualmente arricchita in ossigeno. Le misure di permeazione sono state studiate in funzione delle portate di He nell'intervallo 80-340 SmL/min, a differente temperature (850-1000 °C) e per due diverse portate di aria lato shell (600 e 2000 SmL/min). Nella procedura sperimentale, i campioni dei gas permanenti sono analizzati con un gas cromatografo equipaggiato con rilevatore a conducibilità termica e colonna impaccata (60/80 Molecular Sieve 5A, 3' x 1/8'' stainless steel). Il carrier usato per l'analisi quantitativa è elio, flussato ad una portata pari a 20 mL/min, verificata nelle condizioni di analisi con un rotametro a bolla ed un cronometro.

Influenza della portata di gas di sweep (lato tubo membrana) e portata di aria (lato shell)

In Figura 237a, è evidente come il flusso di permeazione è fortemente influenzato dalla portata di elio lato membrana in quanto la forza motrice (il salto di pressione parziale tra i due lati della membrana ceramica) aumenta a causa della maggiore diluizione dell'ossigeno nel lato permeato. In Figura 237b si mostra invece, il flusso di permeazione in funzione della frazione molare di ossigeno lato permeato per le quattro temperature investigate (850-900-950-1000 °C). È ben evidente come la pressione parziale lato permeato, ad ogni livello di temperatura, diminuisce all'aumentare della permeazione dell'ossigeno attraverso il modulo membrana.

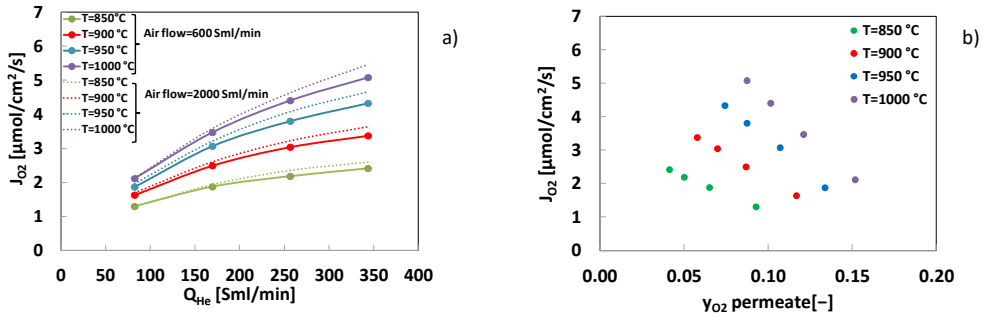


Figura 237. Flussi di permeazione dell'ossigeno in funzione delle portate di He a differenti temperature (portate di aria lato shell pari a 600 e 2000 Sml/min) (a); Flussi di permeazione in funzione della frazione molare dell'ossigeno lato permeato a differenti temperature (portata di aria lato shell pari a 600 Sml/min)

Influenza della temperatura

I flussi di permeazione aumentano con la temperatura a causa della maggiore diffusione dell'ossigeno attraverso la membrana capillare e della cinetica di reazione sulla superficie del materiale perovskitico (Figure 238 e 239).

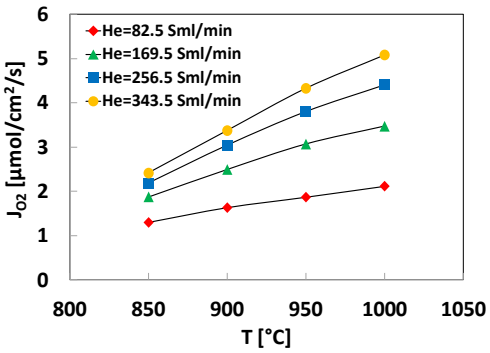


Figura 238. Flussi di permeazione dell'O_2 in funzione della temperatura del reattore; portata di aria lato shell 600 Sml/min

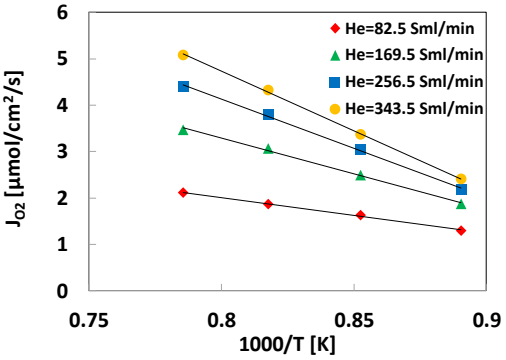


Figura 239. Diagramma di Arrhenius per una membrana di tipo BSCF con spessore 0,35 mm, portata di aria lato shell pari a 600 Sml/min

Queste attività sono state condotte dall'Università de L'Aquila, con la supervisione di ENEA. I risultati ottenuti sono descritti nei rapporti RdS/PAR2014/249 e RdS/PAR2014/250.

a.2 Sperimentazione del processo di mineral carbonation come opzione tecnologica per lo stoccaggio della CO_2 (impianto VALCHIRIA)

L'attività condotta nell'ambito di una collaborazione con l'Università di Roma Tor Vergata ha riguardato lo studio sperimentale del processo di carbonatazione accelerata (mineral carbonation) di residui industriali alcalini come opzione tecnologica per lo stoccaggio della CO_2.

L'attività di ricerca è stata strutturata nelle seguenti due fasi (i) selezione e caratterizzazione di residui industriali idonei al trattamento di carbonatazione; (ii) prove di carbonatazione su *test-rig* nel reattore a tamburo rotante presente nella piattaforma ENEA VALCHIRIA (VALorizzazione CHar, Impianto RIcerche Avanzate, Figura 240) con l'obiettivo di formare un prodotto che potrebbe essere impiegato come aggregato in applicazioni ingegneristiche



Figura 240. Impianto VALCHIRIA

Per quanto concerne la prima fase, sono stati selezionati quali residui idonei per la sperimentazione sia da un punto di vista delle caratteristiche chimico-fisiche e mineralogiche, che della loro disponibilità a scala nazionale ed internazionale, le scorie generate dalle unità BOF (Basic Oxygen Furnace) di un'acciaieria a ciclo integrato. Le scorie analizzate, già sottoposte in impianto a trattamento di macinazione per il recupero del ferro, presentavano una dimensione media pari a 0,5 mm e una dimensione massima inferiore a 2 mm.

Sono risultate costituite prevalentemente da Ca (212,42 g/kg), Fe (178,7 g/kg), Mg (44,1 g/kg) e Si (39,1 g/kg), con un contenuto di carbonio inorganico pari allo 0,6%. Dal punto di vista del comportamento ambientale, i risultati dei test di cessione hanno mostrato che il pH dell'eluato è alcalino (superiore a 12), mentre si è osservato che le concentrazioni dei principali metalli rispettano i limiti previsti per il riutilizzo e per il conferimento in discarica per rifiuti inerti.

Nella seconda fase dell'attività di ricerca sono stati effettuati test di carbo-granulazione (granulazione/ carbonatazione) su *test-rig* nel tamburo rotante facente parte dell'impianto VALCHIRIA. I test sono stati condotti alle temperature di 34, 37 e 50 °C con un contenuto di CO_2 nel gas flussato all'interno del reattore pari rispettivamente al 40 , 46 e 40%v/v (completo N_2). Il campione ottenuto al termine di ciascuna prova è stato sottoposto a curing in aria a condizioni controllate (T=25 °C e RH=100%) per almeno 12 giorni ed analizzato in termini di distribuzione granulometrica, CO_2 uptake e comportamento ambientale. A valle del trattamento, la percentuale di CO_2 stoccata (CO_2 uptake) sotto forma di carbonato di calcio nei residui è risultata confrontabile e variabile tra il 4 e il 6%, mentre, per tutti i campioni analizzati, si è osservato un incremento di circa il 50% dopo il periodo di curing (Tabella 71). Tali valori sono risultati maggiori di quelli raggiunti a scala di laboratorio, sia nel reattore statico a 50°C, che nel reattore rotante di granulazione/carbonatazione.

Tabella 71. Risultati, in termini di D_{50} e CO_2 uptake, dei residui ottenuti dopo il trattamento di carbonatazione e granulazione nel tamburo rotante della piattaforma VALCHIRIA

Condizioni operative Tamburo rotante (VALCHIRIA)	P_{CO2} = 40% T = 34 °C	P_{CO2} = 46% T = 37 °C	P_{CO2} = 40% T = 50 °C
D_{50}	0,98	1	0,54
$\%CO_2$ uptake dopo il trattamento	5,9	4,35	4,49
$\%CO_2$ uptake dopo curing	9,86	9,27	9,55

In conclusione, i risultati delle prove di carbonatazione di scorie BOF condotte su scala pilota nell'impianto VALCHIRIA hanno mostrato che tale trattamento è efficace per lo stoccaggio di CO_2 con percentuali di uptake anche maggiori di quelle riscontrate in test di laboratorio eseguiti in condizioni operative analoghe. Tuttavia, a differenza delle prove condotte in scala di laboratorio, il trattamento testato nell'impianto pilota non si è dimostrato efficace (soprattutto a 50 °C) per l'aggregazione delle particelle, probabilmente a causa della diversa configurazione del reattore dell'impianto Valchiria rispetto al granulatore utilizzato in laboratorio.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/266.

b. Ampliamento del range operativo di sistemi turbogas sottoposti a variabilità del carico e della composizione del combustibile

Le attività incluse nel presente obiettivo, relative alla cattura in pre-combustione, sono finalizzate allo studio, mediante simulazione numerica, delle condizioni di stabilità e di basse emissioni della combustione in sistemi turbogas, destinati a sopperire alle repentine variazioni di carico (load-flexibility) e di composizione dei combustibili e comburenti (fuel flexibility), derivanti anche dal sempre più crescente utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Simulazione di instabilità termo-acustiche

La combustione premiscelata in condizioni magre è la tecnica più utilizzata per ridurre le emissioni di NO_x nelle turbine a gas e le instabilità termoacustiche sono un problema comune per le macchine operanti in queste condizioni. L'instabilità termoacustica è un fenomeno derivante da complesse interazioni tra onde acustiche e rilascio di calore all'interno del bruciatore. Le fluttuazioni di velocità, perturbazioni nella pressione e nella concentrazione del combustibile rappresentano delle cause di oscillazione del rilascio di calore e di nascita onde acustiche che, quando correttamente in fase, fornendo energia alla perturbazione iniziale, sono in grado di sostenere l'instabilità termoacustica stessa (criterio di Rayleigh). Anche la variazione periodica dell'intensità turbolenta generata da oscillazioni di pressione, producendo oscillazioni nella velocità di fiamma turbolenta e di conseguenza delle oscillazioni della velocità di reazione, è in grado di innescare instabilità termoacustiche. In fiamme confinate le frequenze delle instabilità sono centrate attorno alle frequenze acustiche naturali della camera di combustione. Infatti le pareti del sistema selezionano passivamente i disturbi caratterizzati da quelle frequenze.

Nei sistemi operanti ad alta pressione, le fluttuazioni di pressione generate dalla combustione possono causare direttamente oscillazioni del rilascio di calore in fase con l'onda acustica. Nei bruciatori alimentati con combustibile liquido, sono in grado di modificare la configurazione del flusso e il processo di atomizzazione e break-up, causando oscillazioni nella velocità di combustione. In bruciatori a gas, le variazioni del rapporto di equivalenza e del tasso di miscelazione tra reagenti e prodotti della combustione, sono stati identificati come meccanismi in grado di avviare l'instabilità termoacustica. L'identificazione del meccanismo iniziale responsabile delle instabilità termoacustiche è ancora ardua, poiché molti e distinti sono i fenomeni fisici suscettibili di avviare l'instabilità, e ciascuno è caratterizzato da una diversa scala temporale.

L'instabilità termoacustica non costituisce un fenomeno locale e le onde acustiche che interessano l'intero sistema possono compromettere l'integrità. Il fenomeno diventa pericoloso quando le ampie oscillazioni di pressione e di velocità si traducono in vibrazioni auto-sostenute che interferiscono con il sistema e possono indurre fenomeni di flashback ed estinzione della fiamma ed usura prematura dei componenti. In casi estremi può danneggiare gravemente i componenti con conseguente interruzione di funzionamento.

Sebbene oggi alcuni tipi di bruciatori industriali siano efficientemente dotati di sistemi di controllo attivo e passivo, in grado di attenuare o eliminare completamente instabilità termoacustica, l'inibizione di tali fenomeni in una

vasta gamma di condizioni operative è ancora lontana dall'essere raggiunta. Nel prossimo futuro si prevede che il problema diventi ancora più importante fondamentalmente per due motivi: il primo è legato alla flessibilità del combustibile, a causa del crescente interesse per combustibili alternativi (syngas, biogas, shale gas); il secondo è legato alla crescente esigenza di flessibilità di carico, imposta dal crescente utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Il bruciatore sperimentale selezionato per le simulazioni LES è il combustore a gradino ONERA/LAERTE. Con questa configurazione il sistema è in grado di generare sia uno shear layer che una zona di ricircolazione, entrambi causa di instabilità, la quale produce il flashback instabile e quasi-periodico della fiamma, che si distacca dal bordo del gradino. Il numero di Reynolds turbolento $Re_t > 10^3$, corrisponde al regime di "thickened wrinkled flame" nel diagramma di Borghi, che è fortemente influenzato dalla turbolenza. Il test rig è costituito da un condotto rettangolare di 1,7 m di lunghezza e 100x100 mm^2 di sezione. La camera di combustione è lunga 1,4 m ed il gradino è alto 35 mm. La pressione della camera e l'impedenza acustica possono essere regolati per mezzo di un plug regolabile, collocato in corrispondenza dell'ugello di uscita. Aria preriscaldata (fino a 650 K) e combustibile (metano) sono premiscelati prima di entrare nella camera di combustione e passano attraverso una griglia a nido d'ape, usata per raddrizzare il flusso e ridurre la turbolenza.

Gli esperimenti sono stati condotti per una vasta gamma di condizioni operative: velocità di ingresso dell'aria U_0 = 40-65 m/s, temperatura ingresso dell'aria T_{air} = 450-600 K, rapporto di equivalenza aria-combustibile ER = 0,8-1,0, portata massica dell'aria m_{air} = 200-350 g/s, pressione della camera P = 1,12-1,5 bar e potenza termica della camera di 550 - 830 kW.

PLIF dell'OH e chemiluminescenza dell'OH con camera ad alta velocità, sono stati usati per analizzare la struttura della fiamma e per studiare l'interazione fronte di fiamma-vortice. Il campo di moto è stato studiato mediante misure PIV. I segnali di pressione acustica sono stati rilevati in due posizioni nella camera di combustione, a 1,5 cm e 67,5 cm a valle del gradino. Lo spessore dello strato limite (misurato da un tubo di Pitot) è di circa 13 mm. Il profilo di velocità corrisponde ad uno strato limite turbolento completamente sviluppato ed è ben descritto dalla legge di potenza 1/7.

La transizione da regime stabile a instabile si è verificata quando la pressione è stata aumentata a 1,25 bar. Il flashback della fiamma ha interessato una zona ampia circa due volte l'altezza del gradino. Lo spettro dei segnali di pressione ha fatto registrare un picco di 154 dB alla frequenza di 66 Hz. In queste condizioni si sono registrate picchi di velocità fino a 200 m/s.

La simulazione è stata effettuata con il codice ENEA HeaRT utilizzando una griglia di calcolo cartesiana per complessivi 27.619.000 nodi. Il meccanismo di reazione è il single step di Westbrook and Dryer. La pulsazione di 66 Hz delle portate, rilevata sperimentalmente, è stata forzata all'ingresso. In Figura 241 vengono riportate le isosuperfici di temperatura a 1700 e 2000 K, mentre i piani orizzontali riportano la mappa della pressione.

I risultati dell'attività sono descritti nel RdS/PAR2014/240.

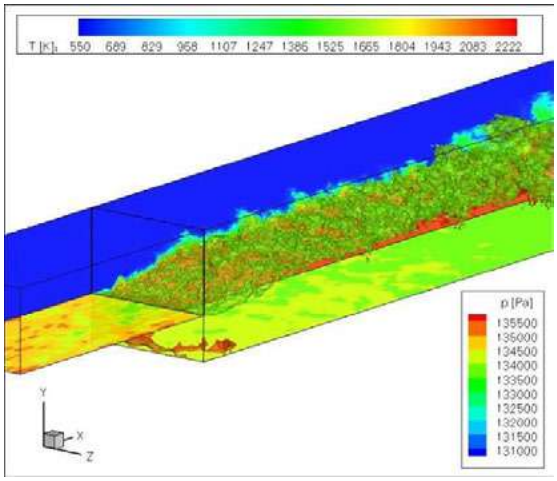


Figura 241. Isosuperfici di temperatura a 1700 e 2000 K. I piani orizzontali riportano la mappa della pressione

Parallelamente a questa attività di tipo numerico, è stata condotta un'attività sperimentale volta allo sviluppo di una metodologia operativa per l'identificazione dell'instabilità termo-acustica. Il lavoro si basa sull'analisi statistica dei segnali acquisiti tramite un foto-diodo capace di registrare le emissioni luminose (chemiluminescenza) di una fiamma.

I dati sperimentali sono stati acquisiti su un combustore di tipo Trapped Vortex. La geometria del combustore è tale da favorire un ricircolo di fluido di grande scala, idealmente grande quanto le dimensioni massime della camera di combustione, ed intrappolare al suo interno il fronte di fiamma, il quale sotto opportune condizioni di diluizione con i propri prodotti di combustione, transisce da uno stato di combustione di superficie ad una combustione di tipo volumetrica. Il risultato finale è una considerevole diminuzione e una omogeneizzazione spaziale delle temperature a tutto vantaggio dell'abbattimento degli ossidi di azoto NO_x.

Questo tipo di geometrie tuttavia, sono soggette a meccanismi di instabilità in cui oscillazioni del flusso inducono vibrazioni meccaniche, rumore, aumento del trasferimento di calore alle pareti del combustore e incremento delle emissioni inquinanti. Tali instabilità sono di tipo termo-acustiche in quanto vi è una mutua interazione e amplificazione tra onde acustiche e rilascio di calore.

Una volta definita la geometria del combustore e il tipo di alimentazione è possibile individuare degli intervalli di funzionamento stabili, sia in termini di carico della macchina sia in termini di tipo di alimentazione (composizione del combustibile). Nell'esigenza di dover cambiare punto di lavoro di un turbogas per assecondare la richiesta della rete elettrica oppure dover alimentare il bruciatore con combustibile diverso (ciò accade quando si usano miscele combustibili di sintesi i cui tenori di miscela non sono fissi), tali limiti di stabilità vengono meno e si rende necessario poter individuare e prevedere con sufficiente anticipo l'insorgere delle instabilità.

A tal proposito sono state effettuate una serie di misure, sul combustore in oggetto, mantenendo la potenza erogata costante (massa di combustibile fissa) e variando la quantità d'aria, cioè passando da una miscela magra ad una miscela grassa. Ciò ha permesso di individuare intervalli di funzionamento stabili e instabili. Nella Figura 242, a titolo di esempio, sono riportate due istantanee nello spettro del visibile, una e l'altra instabile.

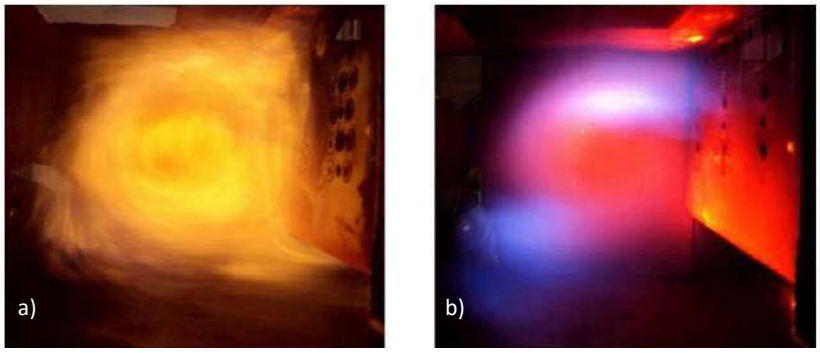


Figura 242. (a) immagine della fiamma ottenuta in condizioni di miscela grassa, fiamma stabile; (b) immagine della fiamma ottenuta in condizioni di miscela magra, fiamma instabile

Per determinare in maniera univoca e ripetibile la presenza o meno di instabilità, il segnale di chemiluminescenza, ottenuto con sonda ODC (brevetto ENEA) la cui intensità è proporzionale al calore rilasciato dalla combustione, è stato trattato in maniera statistica. Infatti, osservando un tipico segnale luminoso come quello riportato in Figura 243 si notano delle brusche e pronunciate diminuzioni dell'energia radiante emessa che possono essere interpretate come spegnimenti localizzati nello spazio e nel tempo.

Si tratta di stabilire se queste successioni di spegnimenti abbiano un carattere di tipo randomico e quindi non siano il risultato di accoppiamento con onde acustiche, oppure di natura coerente (oscillatoria con frequenza e fase propria) sintomo di instabilità termo-acustica. Per stabilire tale differenza si è ricorso alle tecniche di analisi tipiche dei segnali caotici. L'utilizzo dello spazio detto delle pseudo-fasi permette di determinare la randomicità piuttosto che la coerenza di un segnale.

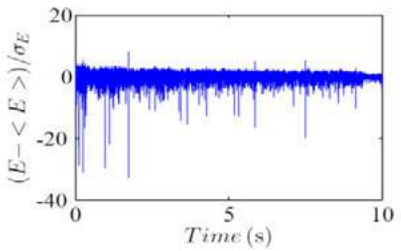


Figura 243. Segnale di energia radiante normalizzato campionato per φ_{cav}=0,72

Il risultato è riportato in Figura 244, in cui si notano per il segnale instabile (rapporto di equivalenza magro pari a 0,6, di colore blu) delle orbite ampie e ricorrenti al contrario di quanto accade nel caso grasso (rappresentato in rosso). Questo comportamento è interpretabile come la ricercata coerenza del segnale caotico.

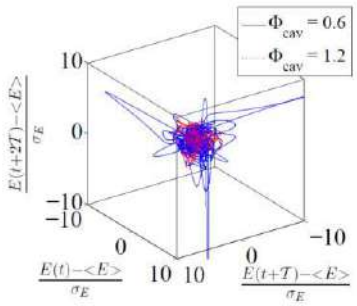


Figura 244. Spazio delle pseudo-fasi del segnale di energia radiante

Si conclude quindi questa breve sintesi potendo affermare che la tecnica sviluppata permette di trovare degli indicatori facilmente implementabili per la determinazione della presenza dell'instabilità termo-acustica.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/241**.**

Simulazione/progetto di un bruciatore innovativo per turbina a gas, caratterizzato da elevata "load-flexibility"

La "*load flexibility" e la "fuel flexibility*" fanno parte degli interventi finalizzati al miglioramento dell'efficienza degli impianti di produzione di energia elettrica. Per quanto riguarda il primo aspetto, nel medio e lungo periodo la produzione elettrica da combustibile fossile continuerà a rappresentare un contributo vitale, che tuttavia dovrà adattarsi a coesistere con le fonti energetiche rinnovabili. Le criticità derivano soprattutto dall'intrinseca impossibilità di pianificare l'andamento della produzione per alcune di queste e si manifestano nella difficile gestione della rete elettrica. Gli eventi internazionali, il costo e la disponibilità dei combustibili sono fattori essenziali nelle scelte legate alla progettazione degli impianti e sottolineano l'importanza che svolgono i combustibili nella produzione di energia. Di conseguenza, la capacità di bruciare una vasta gamma di combustibili continua ad essere di primaria importanza. In passato, la maggior parte delle turbine a gas terrestri hanno utilizzato gas naturale o combustibili distillati. Nel futuro, sempre di più, le macchine saranno chiamate a gestire combustibili di qualità inferiore, derivati per esempio dal carbone. I progettisti di combustori per turbine a gas si trovano quindi ad affrontare la sfida di soddisfare i sempre più stringenti requisiti ambientali, con combustibili di composizione variabile e suscettibili di modificare l'accensione, l'ancoraggio, la posizione della fiamma e portare ad instabilità di combustione.

La soluzione qui proposta, basata sul principio dei bruciatori trapped-vortex, consiste appunto in un bruciatore che permetta di superare i limiti degli esemplari concepiti secondo la tecnologia nota, in ordine all'obiettivo di ottenere stabilmente regimi di combustione volumetrica nelle turbine a gas, con i vantaggi conseguenti: 1) alta efficienza di combustione; 2) omogeneità di temperatura della fiamma; 3) ridotte ed emissioni inquinanti; 4) superiore resistenza di fiamme ultramagre all'innesco di pericolose oscillazioni termoacustiche; 5) assenza d'interazione della fiamma col campo di accelerazioni all'uscita del combustore (Acoustic-entropy combustion instabilities); 6) ridotti stress da dilatazione termica differenziale sull'ugello terminale del combustore e dei primi stadi di turbina; 7) elevata stabilità nelle manovre di variazione del carico termico. Il regime di combustione distribuita estende il campo d'esistenza delle fiamme premiscelate verso miscele più magre (povere di combustibile) a basso rapporto di equivalenza e può quindi essere sfruttato per bruciare in forma premiscelata ed omogenea anche nell'esercizio in regolazione, ai più bassi carichi parziali. L'adozione di cavità per la stabilizzazione della fiamma rende l'intero dispositivo meno sensibile alle variazioni delle condizioni di iniezione dei reagenti, quindi capace di adattarsi anche a variazioni della tipologia di combustibile, o delle condizioni di funzionamento ed adatto ad operare in condizioni di combustione magra. Nel presente lavoro è stato approfondito lo studio del combustore già delineato nelle precedenti annualità, che permetta di ottenere alta efficienza di combustione, omogeneità di temperatura della fiamma e ridotte ed emissioni inquinanti. Si è proceduto in particolare all'ottimizzazione dell'accoppiamento tra il vorticatore e la cavità al fine di massimizzare la penetrazione dei gas combusti e della miscela fresca verso la cavità stessa e del ricircolo dei gas combusti all'interno del vorticatore. Attraverso simulazioni CFD si è arrivati alla definizione di una geometria ritenuta idonea rispetto agli obiettivi prefissati.

Il sistema si compone di un vorticatore elicoidale inserito in una camera di combustione costituita essenzialmente da due parti. Una prima zona che viene a realizzare la cavità per l'intrappolamento del vortice ed una zona più a valle per il completamento della reazione di combustione. Il vorticatore è formato da sei vani elicoidali chiusi dal

lato rivolto verso la cavità di intrappolamento, nei quali scorre la miscela reagente di combustibile ed aria, intervallati da altrettanti vani aperti che favoriscono l'incanalamento elicoidale dei gas combusti presenti nella cavità. In questo modo il verso di rotazione del flusso reagente uscente dal vorticatore che ricircola all'indietro verso la cavità, si accoppia perfettamente con il flusso presente nella cavità, creando un unico vortice toro-elicoidale, secondo un'alternanza azimutale d'ingressi ed uscite. La parte terminale di sbocco del vorticatore è sagomata in maniera da imprimere una componente radiale al flusso reagente, che favorisce il riempimento della cavità. L'azione combinata della depressione lato vani elicoidali chiusi, ma comunicanti con la cavità, dell'azione centrifuga prodotta dallo swirl impresso dal vorticatore e della forma terminale dello stesso, dovrebbero promuovere e massimizzare il riempimento e lo svuotamento della cavità. Sulle pareti dei vani chiusi sono stati ricavati dei fori posizionati tutti sul lato dove, lo scorrimento del fluido all'interno e la forma del condotto, determinano una depressione additiva, in rapporto all'effetto venturi vano-cavità, da sfruttare per il supplementare richiamo dei gas combusti verso il condotto stesso. I fori si trovano cioè sul lato del dorso, in depressione, di quella che sarebbe una pala del vorticatore, di fatto sostituita dalle pareti laterali del vano "aperto". Il diametro ed il numero di tali fori è stato progressivamente incrementato, fino ad ottenere la massima portata di gas combusti entranti, compatibilmente con i vincoli dimensionali del dispositivo. Anche le dimensioni della cavità sono state via via aumentate con l'obiettivo di massimizzare il richiamo della miscela non reagita. Nelle prime versioni, così come risulta dal report dello scorso anno, la cavità era alimentata da una serie di fori disposti in modo da non interferire ma anzi incoraggiare lo sviluppo del vortice. Si è tuttavia notato come la presenza di alimentazioni della cavità, pur se collocate con il criterio suddetto, provocasse l'incremento della pressione regnante nella cavità stessa, ostacolando quindi una sufficiente penetrazione e ricircolo interno di miscela fresca, seppur favorendo il ricircolo nei vani dello swirler. Alla luce di questo importante risultato e dopo scrupolosa analisi, si è deciso di sacrificare questo accorgimento tecnico a favore di un più efficace ricircolo, che costituisce il fulcro ed il fondamento dell'idea di base. Successivamente è stata condotta un'analisi parametrica sulle dimensioni della strozzatura che separa la cavità dalla camera di combustione. Il diametro di questo restringimento risulta infatti essere importante sia per ciò che riguarda l'entità del ricircolo, attraverso i vani del vorticatore ed all'interno della cavità, che per la morfologia della fiamma. Sono stati confrontati tre casi con strozzature man mano più ampie.

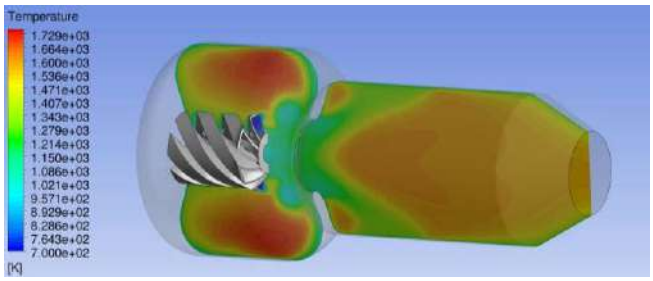


Figura 245. Mappa di temperatura rappresentata su un piano longitudinale

Si nota come la differente strozzatura determini, all'interno della camera di combustione, un diverso comportamento fluidodinamico (Figura 245). In particolare, nel caso di maggiore strozzatura, il vortice toroidale nella seconda camera prodotto dallo swirl, risulta maggiormente esteso radialmente. Inoltre al diminuire della strozzatura compare un vortice in prossimità della base, verso l'esterno, nella seconda camera di combustione. Nel caso di strozzatura minore, compare un ulteriore vortice immediatamente a valle dell'uscita del vorticatore. Tutto questo produce degli evidenti effetti sulla conformazione della fiamma, la quale risulta più schiacciata verso la base della camera di combustione nel caso di strozzatura maggiore, rispetto a quello intermedio. Nel caso di strozzatura minore, si può notare che la fiamma inizia già immediatamente all'uscita del vorticatore, il che è dovuto al fatto che la maggiore apertura disponibile facilita il richiamo di gas caldi verso il vorticatore stesso. Questo fenomeno è confermato anche dai campi del calore di reazione, della concentrazione di OH, di temperatura ed ha effetti anche sulle emissioni di CO. La Reactor Network Analysis (RNA) consiste nel suddividere il volume da simulare in un certo numero prefissato di zone omogenee, ognuna delle quali viene modellata con un reattore ideale perfettamente miscelato. Partendo dalla simulazione CFD la suddivisione può essere fatta per esempio per range di temperatura, di concentrazione di specie, etc. Ovviamente il risultato finale è tanto più accurato quanti più sono i reattori. Individuate topologicamente le zone è possibile anche valutarne i reciproci scambi di massa, dato che il campo di velocità è stato risolto dalla CFD. Nel caso in esame è stato aumentato il numero dei reattori fino a quando non sono state più riscontrate differenze nei risultati. Il meccanismo di reazione utilizzato è il meccanismo completo GRI 3.0 che prevede 325 reazioni e 53 specie. I livelli di temperatura, i campi

delle specie principali e la morfologia della fiamma ottenuti per esempio con 1000 reattori, si dimostrano perfettamente in linea con le simulazioni mostrate in precedenza, pertanto, l'utilizzo della tecnica RNA, che ha permesso di adottare una chimica molto più dettagliata, conferma i risultati e le considerazioni discusse sopra.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/242.

c. Cicli turbogas a CO_2

L'obiettivo riguarda lo studio di cicli turbogas caratterizzati da una combustione operante con crescente percentuale di CO_2 ricircolante, fino ad arrivare ad una ossi-combustione in CO_2 supercritica. Il vantaggio in termini di efficienza della tecnologia *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) è noto, e in parte giustificherebbe l'applicazione di tecnologie di cattura su fumi così arricchiti in CO_2. La combustione in CO_2 supercritica, opportunamente arricchita in ossigeno, rappresenterebbe, in ragione dei numerosi e più oltre elencati vantaggi tecnologici, l'apice dell'intera filiera.

Combustione con diluizione in CO_2 (EGR)

In accordo con questa linea programmatica di ricerca è stato ideato, sviluppato e costruito un bruciatore su scala di laboratorio, capace di elaborare miscele di aria e un idrocarburo come il metano in un ambiente ricco di anidride carbonica ad alta temperatura.

L'idea di fondo di questo modello risiede nella necessità di caratterizzare i regimi di combustione di un bruciatore sviluppato per favorire la cattura del biossido di carbonio come principale prodotto della combustione di una miscela di idrocarburi.

Da un punto di vista reattivo la combustione in aria, quindi in eccesso di un inerte come l'azoto poco si discosta da una combustione in un ambiente ricco di CO_2 la quale non partecipa ai processi di combustione, essendone un prodotto finale. Tale pratica ha il pregio di limitare la produzione dei nocivi ossidi di azoto (NO_x), non solo attraverso l'abbattimento della temperatura di fiamma dovuto ad una miscela magra (in difetto di combustibile), ma anche attraverso la riduzione del tenore stesso di azoto molecolare presente nell'aria, sostituendolo con la CO_2 quale prodotto della stessa combustione. Questo dovrebbe innescare un circuito virtuoso che, allo stazionario, comporterebbe prodotti di combustione enormemente ricchi di CO_2 e estremamente poveri di ossidi di azoto: una miscela ideale per la pratica del sequestro e cattura della CO_2.

Come anticipato, è stato progettato e realizzato quindi un modello di bruciatore da laboratorio (denominato "ROMULUS") di tipo "slotted-burner", a sezione rettangolare, in cui bruciare una miscela di metano/idrogeno/aria in un flusso di anidride carbonica preriscaldata.

Ultimata la progettazione e costruzione materiale del modello sono state svolte indagini di carattere sperimentale/numerico volte ad individuare eventuali criticità di tipo acustico e fluidodinamico.

Nella Figura 246 è riportato il modello in metacrilato su cui sono stati effettuati i test preliminari di acustica con microfoni.

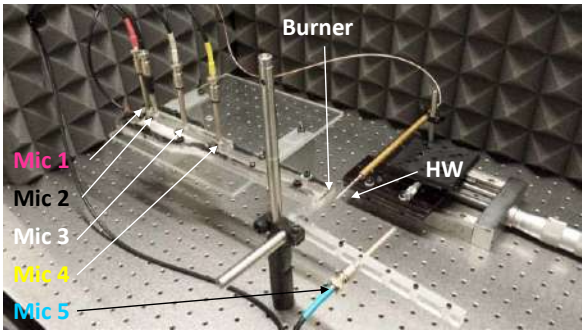


Figura 246. Prototipo in metacrilato del bruciatore strumentato con microfoni

Nella Figura 247 l'analisi spettrale della pressione acustica rivela un picco di energia ben marcato. Dal "collasso" in funzione del numero di Stroual di vari spettri ottenuti a velocità differenti, si deduce che questo picco è di origine fluidodinamica e non acustica. La semplice progettazione di una griglia inserita all'interno delle strutture fluidodinamiche che causano tale picco nello spettro di energia di pressione sonora eliminerà tale problema nel modello finale (Figura 248).

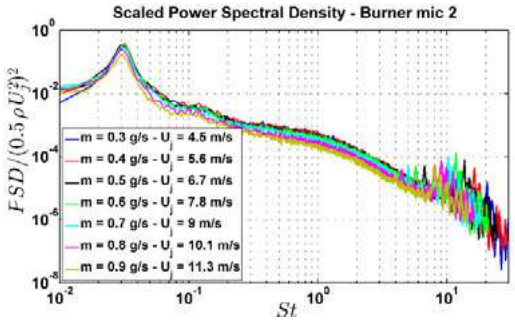


Figura 247. Analisi spettrale della densità di pressione sonora per individuare anomalie acustiche



Figura 248. Modello in acciaio del bruciatore con accessi ottici in quarzo

A seguito di questi test, sono stati acquisiti cambi di velocità con la tecnica della Particle Image Velocimetry (PIV, Figure 249).

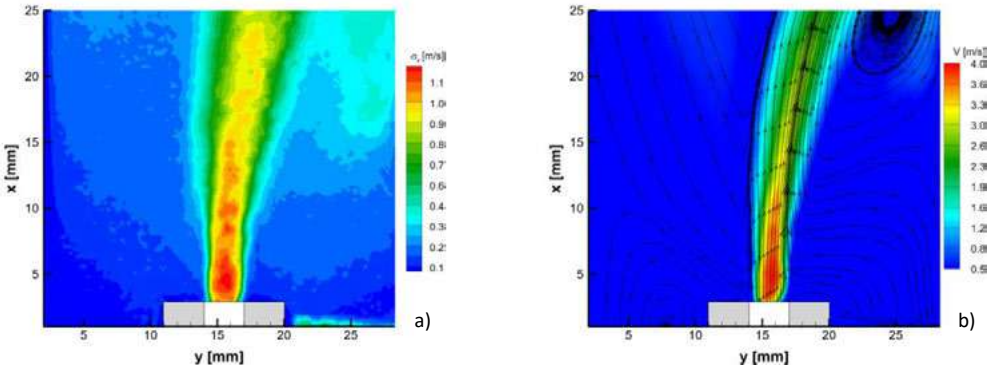


Figura 249. Campo di velocità (a) e fluttuazioni della velocità in termini di valor quadratico medio (b) per una portata d'aria pari a 0,5 g/s

L'attività sperimentale è stata condotta in collaborazione tra ENEA e Università di Roma Tre. I risultati dell'attività sperimentale fin qui condotta, sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/243.

Il codice proprietario HeaRT, sviluppato in ENEA, sarà impiegato, a conclusione delle sperimentazioni, per una simulazione Direct Numerical Simulation (DNS) del bruciatore in oggetto. La simulazione sarà effettuata utilizzando gli schemi ad alto ordine e la chimica dettagliata che il codice mette a disposizione. Non saranno utilizzati modelli di sottogriglia per l'accoppiamento combustione/turbolenza, poiché la griglia computazionale (in

questo caso dell'ordine di $5x10^8$ nodi) risolverà tutte le scale della turbolenza. La simulazione è molto onerosa dal punto di vista computazionale. Per essere eseguita, e per essere il più possibile coerente con l'esperimento effettuato in laboratorio, è necessario che le condizioni al contorno (in particolare le velocità e il loro grado di fluttuazioni all'ingresso nel condotto centrale) siano suffragate da accurate misure sperimentali.

Sviluppo di Cicli EGR

Negli ultimi anni lo scenario di riferimento della generazione elettrica è profondamente mutato, volgendo molto rapidamente verso un sistema elettrico basato sull'uso massiccio delle rinnovabili, alcune delle quali intrinsecamente non programmabili. L'obiettivo evidente di questo cambiamento, per certi versi impetuoso, consiste nel ridurre drasticamente le emissioni climalteranti e inquinanti connesse con la generazione elettrica da fonte fossile e nel ridurre la dipendenza da quest'ultima. Tuttavia, tanto più si è "partigiani" della generazione elettrica verde, tanto più si deve essere consapevoli della necessità di supportare il sistema elettrico quando, per fare gli esempi più evidenti, eolico e fotovoltaico non sono operativi per mancanza della fonte primaria. Il tema dell'abbattimento delle emissioni associate alla generazione da fonte fossile, fortemente connesso con lo sviluppo delle tecnologie CCS, si accoppia pertanto con il più contingente tema della load-flexibility, ovvero della flessibilità di esercizio degli impianti di generazione programmabili, necessaria a compensare le fluttuazioni di potenza associate alle rinnovabili non programmabili. Se si esclude la generazione idroelettrica, comunque vincolata dalla limitata disponibilità di siti sul territorio, le turbine a gas rappresentano il miglior candidato in termini di load-flexibility, principalmente nella configurazione a ciclo aperto, ma anche nella configurazione a ciclo combinato che, peraltro, espone la miglior efficienza termodinamica tra i sistemi di conversione da fonte fossile. Tuttavia l'implementazione delle CCS presenta delle problematiche per entrambe le configurazioni, dovute principalmente alla bassa concentrazione della CO_2 nei gas di scarico che rende il processo di cattura meno efficiente, con facility dedicate più voluminose e quindi penalizzanti sia in termini di CAPEX (CAPital EXpenditures) che di OPEX (OPerational EXpenditures).

I cicli turbogas EGR (Exhausts Gas Recirculation) possono rappresentare una soluzione brillante, potenzialmente in grado di accoppiare la flessibilità di esercizio tipica delle turbine a gas, con l'implementazione efficace delle tecnologie CCS. In estrema sintesi, il principio fondante di questa tipologia di cicli consiste nel ricircolare all'aspirazione gli esausti della turbina a gas, dopo averli raffreddati fino a temperatura ambiente, con l'obiettivo di ottenere un fluido di lavoro composto da aria ad alto tenore di CO_2. Il maggior contenuto di CO_2 negli esausti rende la cattura più efficiente, richiede facility dedicate meno voluminose e, non ultimo, può potenzialmente contribuire alla riduzione degli NOx, sia a causa della minor concentrazione di ossigeno, sia per la favorevole distribuzione della temperatura all'interno del combustore.

L'impianto AGATUR (Advanced Gas Turbine Rising) in dotazione al laboratorio IPSE dell'ENEA, attualmente in corso di adeguamento, verrà utilizzato quale dimostratore sperimentale di un ciclo turbogas EGR. L'impianto è dotato di una micro-turbina a gas (µGT) Turbec T100 da 100 kW_{el} e di un vessel di circa 40 m^3, il quale, connesso alla µGT dal lato aspirazione, fungerà da plenum per la creazione della miscela sintetica aria - CO_2 che verrà aspirata dalla macchina. In questo primo assetto sperimentale di AGATUR (EGR - STEP 1, Figura 250), la miscela gassosa sarà quindi prodotta mediante iniezione di portate controllate di aria e CO_2, con l'obiettivo di emulare la composizione del fluido di lavoro corrispondente a diverse percentuali di ricircolo. Il successivo assetto sperimentale di AGATUR (EGR - STEP 2) prevede ulteriori modifiche dell'impianto che consentiranno di ottenere il ricircolo dei gas di scarico e la "chiusura" del ciclo turbogas EGR.

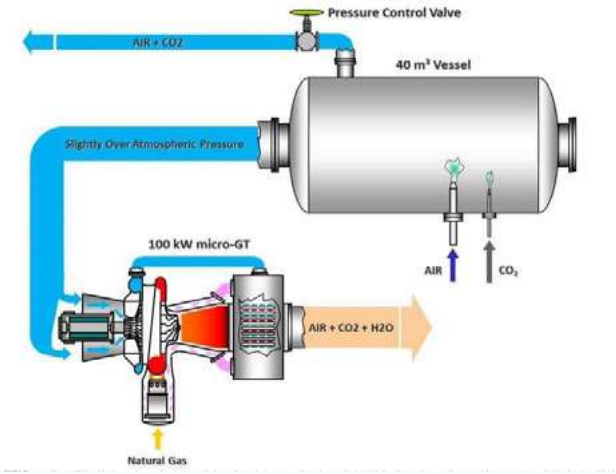


Figura 250. Schema dell'impianto AGATUR in assetto EGR - STEP 1

Nel rapporto RdS/PAR2014/244 vengono esposti i risultati della simulazione di processo, utilizzati come condizioni al contorno per la simulazione CFD del combustore della µGT quando quest'ultima viene esercita con un fluido di lavoro composto da aria ad alto contenuto di CO_2, unitamente ai risultati della stessa simulazione CFD. L'obiettivo contingente delle simulazioni numeriche, sia a livello di sistema (la turbina a gas) che di singolo componente (il combustore), consiste nel dotarsi del bagaglio informativo utile alla successiva impostazione dei test reali che verranno svolti sulla piattaforma sperimentale AGATUR. A tal fine le simulazioni di processo sono

state implementante imponendo condizioni di carico conservative, in grado di porre i presupposti per l'esercizio sicuro della macchina durante l'esecuzione di test in condizioni fortemente off-design. Si prevede di controllare la µGT con una strategia a RPM costanti, con un SETpoint pari all'85% del numero di giri nominale. La scelta del RPM-SETpoint è dettata dalla compatibilità con le prestazioni di AGATUR in termini di erogazione stabile della portata massica di fluido richiesta dalla µGT, prestazioni che peraltro sono state valutate in una campagna sperimentale eseguita nel corso di questa annualità. L'estrapolazione del comportamento termo-fluidodinamico della µGT con fluido di lavoro arricchito in CO_2 è stata ottenuta mediante un modello numerico che oltre a riprodurre la termodinamica del sistema, gestisce l'accoppiamento fluidodinamico (flow-matching) delle turbomacchine, utilizzando curve caratteristiche costruite con gruppi parametrici full-dimensionless e pertanto adatte a valutare gli effetti della composizione del fluido di lavoro sulla performance della macchina. I valori caratteristici del flow-matching istantaneo delle turbomacchine (pressioni, temperature, potenze e portate) unitamente alla caratteristica meccanica del generatore e al momento d'inerzia polare dell'albero, costituiscono i dati in ingresso per il bilanciamento dinamico del rotore (work-matching), ovvero per il calcolo della velocità e dell'accelerazione angolari. Il sistema di controllo, anch'esso parte del modello in questione, provvede a mantenere la macchina stabile pilotando istante per istante l'apertura delle valvole del combustibile.

Le simulazioni CFD sono state effettuate mediante il codice di calcolo ANSYS-FLUENT su una griglia di calcolo a celle tetraedriche di circa 1530000 celle di calcolo, adottando come geometria uno spicchio di 120°, ovvero 1/3 dell'intero combustore.

Le condizioni al contorno riproducono una condizione di funzionamento della µGT presa come test di riferimento, per la quale è stata verificata sperimentalmente la compatibilità con le prestazioni di AGATUR in termini di erogazione stabile della miscela aria-CO_2, secondo le condizioni specificate in Tabella 72. Dai risultati della simulazione CFD (Figura 251 e 252) si evince una distribuzione abbastanza uniforme della temperatura nel corpo centrale e all'uscita del combustore, con un picco nel fronte di fiamma del pilota, evenienza prevedibile essendo questa fiamma diffusiva.

Tabella 72. Test di riferimento per la simulazione CFD del combustore

RPM 85%	Fluido di lavoro											Combustibile		
	Anidride carbonica		Ossigeno		Azoto		Argon		Temperatura	Pressione	Tot. mass rate	Metano	Temp.	Pressione
	kg/s	Fraz. molare	kg/s	Fraz. molare	kg/s	Fraz. molare	kg/s	Fraz. molare	°C	bar	kg/s	kg/s	°C	bar
	0,061715	0,068110	0,128930	0,195700	0,419515	0,727340	0,007285	0,008860	423,238718	3,038100	0,617450	0,004400	14,857503	6,900000

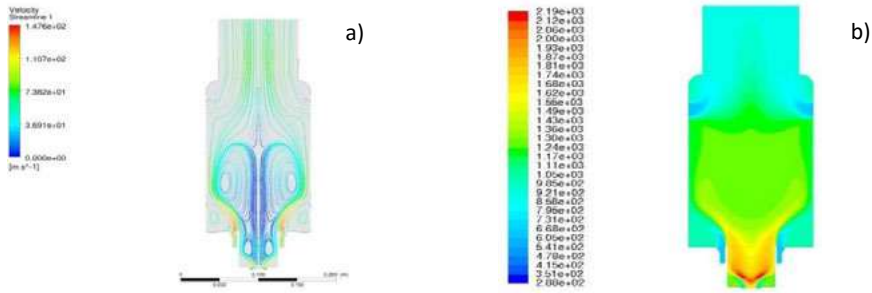


Figura 251. a) Linee di flusso colorate con la velocità (m/s); b) Campo della temperatura (K)

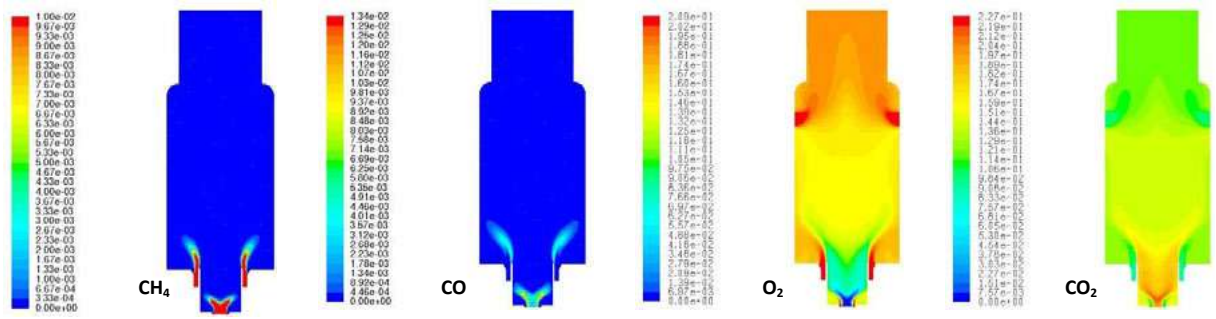


Figura 252. Campo di concentrazione di CH_4, CO, O_2 e CO_2 (mass fraction)

In sintesi, sovrapponendo i risultati del simulatore della μGT, i risultati della simulazione CFD del combustore e le verifiche sperimentali effettuate sull'impianto AGATUR, si ottiene una previsione complessivamente positiva sulla riproducibilità sperimentale del test di riferimento che verrà effettuato sull'impianto AGATUR in assetto EGR - STEP 1.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/244**.**

Il dominio sperimentale per l'implementazione del ciclo EGR è stato definito con l'ausilio della simulazione numerica, accoppiando l'analisi di processo del ciclo turbogas ai test di stabilità effettuati sull'impianto AGATUR. Nello specifico si espongono i risultati dei test di stabilità effettuati sul sistema di alimentazione aria/CO_2, finalizzati alla valutazione del dominio di funzionamento stabile del sistema, con particolare riferimento all'erogazione controllata in termini di portate massiche e pressioni di esercizio.

L'esercizio dell'impianto AGATUR in assetto EGR - STEP 1 prevede l'accoppiamento fluidodinamico tra la sezione di aspirazione della microturbina e il vessel, essendo quest'ultimo il plenum che garantisce l'erogazione costante del fluido di lavoro, di composizione controllata, in condizioni di pressione leggermente superiori a quelle ambiente (0,1 bar_g). I test hanno quindi permesso di valutare la corretta riproduzione di queste condizioni, con diverse composizioni della miscela aria/CO_2, controllando stabilmente anche la pressione di erogazione. Le prove di stabilità hanno evidenziato le condizioni limite di esercizio del sistema, corrispondenti, in estrema sintesi, alla massima portata d'aria e alla portate massima e minima di CO_2 (Figura 253). Con riferimento alla portata massica d'aria, l'erogazione massima in condizioni stabili è pari a 2580 kg/h, mentre per quanto riguarda la CO_2 si riscontra il limite dimensionale massimo del sistema corrispondente a 300 kg/h, al di sopra del quale si incorre nel congelamento della linea di adduzione proveniente dallo stoccaggio criogenico. Si riscontra parimenti un limite minimo nell'erogazione stabile della CO_2, coincidente con 40 kg/h, al di sotto del quale si instaura il pendolamento non controllabile della valvola di alimentazione.

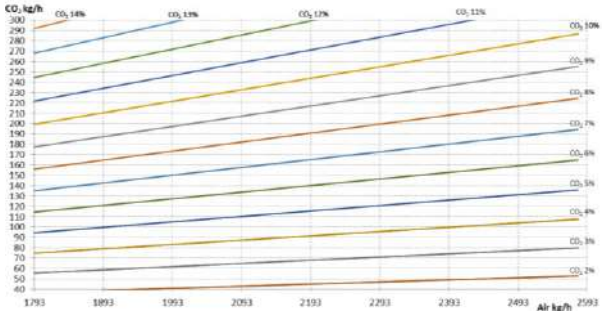


Figura 253. Dominio di funzionamento del sistema di erogazione della miscela aria/CO_2 dell'impianto AGATUR in assetto EGR - STEP 1

Parallelamente ai test di stabilità, è stata portata a termine una campagna di simulazioni numeriche di sistema per la definizione del comportamento termodinamico della μGT esercita con fluidi di lavoro di composizione variabile, secondo i vincoli definiti dai test di stabilità, implementando una strategia di controllo a velocità (RPM) costante. Le simulazioni sono state eseguite mediante l'utilizzo del modello numerico della Turbec T100, che nelle precedenti annualità è stato progressivamente implementato in linguaggio VBA e integrato nel simulatore di processo ChemCAD®. L'intersezione tra risultati delle simulazioni numeriche e i risultati del test di stabilità definisce il dominio di funzionamento stabile dell'impianto AGATUR in assetto EGR - STEP 1.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/267.

Ossi-combustione in atmosfera di CO_2 supercritica

I cicli turbogas a CO_2 supercritica (che operano ad elevata pressione, circa 300 bar) possono rappresentare un'ottima soluzione al problema della sostenibilità delle fonti di energia rinnovabile. Infatti, tali sistemi, nella loro configurazione semi-chiusa, in cui l'ossi-combustione di gas naturale (o idrogeno, o altre miscele idro- genate) è la fonte interna di calore al ciclo, sembrano avere le caratteristiche di load-flexibility necessarie per stabilizzare la rete elettrica dalle inevitabili ed improvvise fluttuazioni di potenza dovute alle rinnovabili. Inoltre, nella loro configurazione chiusa, in cui il calore proviene dall'esterno tramite scambiatori, bene si prestano per aumentare l'efficienza di altri cicli (combinati).

Nella precedente annualità è stato affrontato il problema della modellazione dei fluidi ad alta pressione in termini delle loro proprietà termodinamiche e di trasporto. In tale ambito è stata sviluppata ed implementata una tecnica basata sulla tabulazione delle proprietà delle singole specie e sull'uso di leggi di mescolamento. Tale tecnica è stata però validata con successo solo per miscele binarie. Sulla base di questo risultato e per ridurre il tempo di sviluppo necessario per arrivare alla simulazione di casi applicativi, è stato deciso di mettere da parte, almeno per il momento, la strada della tabulazione (tale strategia è molto efficace per ridurre l'onere computazionale) e di ricorrere all'uso di leggi di gas reale semplificate. In particolare, è stato adottato il modello di Peng-Robinson che rappresenta un buon compromesso tra accuratezza ed efficienza di calcolo. Al tempo stesso abbiamo anche implementato nel codice HeaRT il modello di gas reale più accurato, il GERG-2008. Tale modello è però così pesante dal punto di vista computazionale da rendere impossibili le simulazioni fluidodinamiche: il tempo per la soluzione è estremamente lungo. Averlo implementato è comunque importante perché consente di valutare l'errore commesso nelle proprietà termodinamiche e di trasporto per un singolo campo fluidodinamico. Questo tipo di analisi su miscele risulta assolutamente originale nella letteratura della fluidodinamica computazionale dei gas reali.

Inoltre, sempre nella precedente annualità, è stata anche effettuata una simulazione di tipo Large Eddy relativa al mescolamento di metano ed ossigeno a 150 bar, che ha evidenziato alcune lacune negli schemi numerici per la simulazione di discontinuità di contatto ad alta pressione. Per risolvere tali problemi, è stato implementato (in collaborazione con l'Università di Roma Sapienza) nel codice HeaRT lo schema HLLC/HLLE per il termine convettivo degli scalari.

La simulazione di un getto di azoto supercritico, inizialmente prevista, è stata sostituita con simulazioni relative al mescolamento ("mixing layer") di getti metano/ossigeno, più adatte alla validazione del nuovo schema implementato perché presentano una forte discontinuità di contatto e sono computazionalmente meno onerose. Il "mixing layer" bidimensionale simulato consiste in un getto centrale di metano a 100 m/s, immerso in una corrente di ossigeno a 25 m/s: entrambe le specie si trovano ad una temperatura di 300 K. Il campo è inizializzato con i tre getti aventi un forte gradiente (nell'ordine, dal più grande al più piccolo, di energia totale, specie, e velocità) in corrispondenza delle due interfacce di separazione: il forte gradiente del campo iniziale è discretizzato e risolto con circa 10 punti di calcolo. Nella direzione del flusso sono state assunte condizioni di periodicità, che portano ad una evoluzione temporale del "mixing layer" simulato; nella direzione trasversale sono state assunte condizioni di uscita non riflessive. La Figura 254 mostra un campo istantaneo dell'energia totale dopo che le interfacce di separazione si sono instabilizzate, portando alla formazione di vortici ed al conseguente mescolamento dei due getti. E' da notare la grande differenza di energia totale tra i due getti, dovuta alle differenze molecolari delle due specie. La simulazione con il nuovo schema implementato è risultata stabile, mentre con lo schema AUSM, precedentemente impiegato per gli scalari, presentava forti oscillazioni. Sono stati effettuati test di "mixing layer" a pressioni con diversi ordini di grandezza (1,5, 15, 150 bar): con l'aumentare della pressione, per stabilizzare il calcolo, è stato anche necessario sostituire lo schema centrato al secondo ordine adottato per i termini convettivi dell'equazione della quantità di moto con lo schema AUSM (con interpolazione QUICK al terzo ordine).

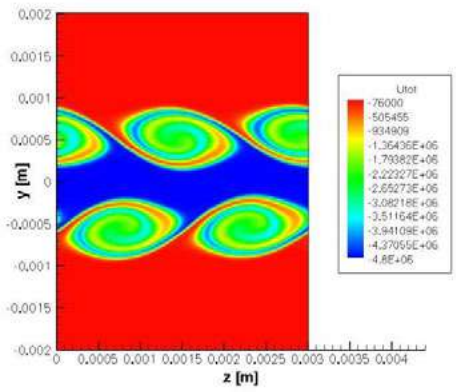


Figura 254. Campo istantaneo di energia totale relativo al "mixing layer" bidimensionale di metano (getto centrale a 100 m/s) ed ossigeno (getti laterali a 25 m/s), a 300 K ed 1,5 bar

Per dimostrare le potenzialità del simulatore di alta pressione del codice HeaRT, è stata infine condotta una simulazione relativa alla combustione di metano e ossigeno a 150 bar. La configurazione dei getti è analoga ai precedenti test di "mixing layer": getto centrale di metano a 100 m/s, iniettato in una corrente di ossigeno a 25 m/s, entrambe a 300 K. Nella direzione del flusso, sul lato sinistro è stata imposta una condizione di ingresso che già presenta una zona di reazione in corrispondenza delle due interfaccie; sul lato destro è stata imposta una condizione di uscita non riflessiva, opportunamente modificata per tener conto di effetti di gas reale. La Figura 255 mostra un campo istantaneo di

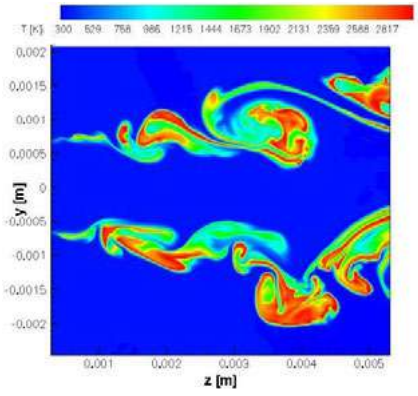


Figura 255. Campo istantaneo di temperatura nella simulazione bidimensionale del "mixing layer" reattivo tra metano ed ossigeno

temperatura: si possono notare le strutture vorticose del "mixing layer" reattivo, le elevate temperature tipiche della combustione stechiometrica metano/ossigeno, ed i forti gradienti spaziali. La Figura 256 mostra l'errore percentuale della velocità del suono calcolata assumendo l'equazione di stato di Peng-Robinson rispetto al valore "esatto" ottenuto assumendo l'equazione di stato GERG-2008. Come si vede il massimo errore percentuale è del 5,7% (negativo, cioè Peng-Robinson sottostima la velocità del suono), che è dello stesso ordine di grandezza di quello commesso nella modellazione delle proprietà di trasporto nel caso ideale, quindi accettabile.

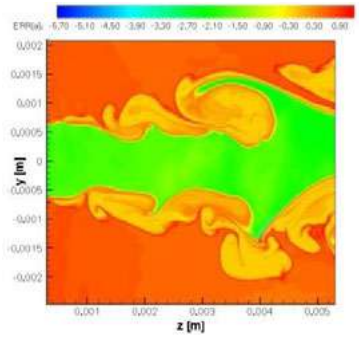


Figura 256. Distribuzione dell'errore percentuale commesso nella valutazione della velocità del suono con l'equazione di stato Peng-Robinson rispetto all'equazione "esatta" GERG-2008

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/245**,** e sono frutto della collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale dell'Università di Roma Sapienza.

d. Utilizzo della CO_2 per produzione di combustibili

Nel corso dell'annualità sono state completate le attività di metanazione sull'impianto dimostrativo FENICE (Figura 257). L'attività svolta nell'ambito del PAR 2013, aveva dimostrato l'efficacia del sistema catalitico individuato, anche su questo impianto. Le rese di conversione ottenute in precedenza non raggiungevano però i valori riscontrati durante la sperimentazione su un piccolo sistema da laboratorio. Su FENICE infatti la massima resa misurata è stata del 60% mentre in laboratorio si era ottenuto oltre il 90%. Il motivo di tale discrepanza risiede nel diverso tempo di contatto (τ); per le prove di laboratorio si aveva τ = 143 s mentre su FENICE il tempo di contatto, a parità degli altri parametri sperimentali, era di 1 s.



Figura 257. Impianto dimostrativo FENICE

Sono state quindi eseguite una serie di prove a flussi ridotti, senza alterare la natura e le dimensioni del letto catalitico. Come atteso, in queste condizioni, la resa di conversione è stata di oltre il 90%. Raggiunto l'obiettivo di un impianto dimostrativo che ha le stesse prestazioni di quello da laboratorio, si può ritenere conclusa l'attività sperimentale sulla metanazione.

Oltre al metano, altre molecole meritano un'attenzione particolare per la versatilità del loro impiego, che va dal diretto utilizzo come combustibili o carburanti alla molteplicità delle trasformazioni cui sono suscettibili per produrre una vasta gamma di prodotti di largo utilizzo. Fra queste molecole un ruolo di primaria importanza lo occupano il metanolo ed il dimetil-etere (DME).

Il metanolo è uno dei principali materiali di base dell'industria chimica ed è prodotto in misura di circa 50 Mt/anno. L'impiego del metanolo come carburante in motori a benzina è iniziato negli anni '60 del secolo scorso.

Il prodotto della disidratazione del metanolo, cioè il dimetil-etere (DME), è invece idoneo a sostituire il gasolio nei motori diesel. Il DME è il più semplice degli eteri ed è un gas non tossico, non corrosivo, sicuro da manipolare che viene facilmente liquefatto come il GPL. Metanolo e DME si candidano pertanto a sostituire gli attuali carburanti derivati da fonte fossile.

La conversione di CO_2 a metanolo è una reazione di idrogenazione catalitica esotermica:

$$CO_{2\,(g)} + 3\,H_{2\,(g)} \leftrightarrows CH_3OH_{\,(g)} + H_2O \qquad \Delta H_{\,298\,K} = -\,11{,}9 \text{ kcal/mole}$$

I catalizzatori più comunemente usati sono metalli ed i loro ossidi, in particolare la combinazione di rame ed ossido di zinco è stata estesamente impiegata per questa conversione. La temperatura di reazione è compresa fra

200 °C e 300 °C e la pressione è di diverse decine di bar.

Il DME è ottenuto dalla disidratazione del MeOH su catalizzatori acidi come allumina, zeoliti, acido fosforico, resine solfoniche:

$$2\ CH_3OH \leftrightarrows CH_3OCH_3 + H_2O \qquad \Delta H_{298\ K} = -5{,}5\ kcal/mole$$

La produzione di DME può essere eseguita in due step separando la produzione di metanolo dalla sua disidratazione, o in un unico step utilizzando catalizzatori bifunzionali in cui il metallo/ossido metallico è supportato su un materiale solido acido.

E' noto che la conversione all'equilibrio del DME è notevolmente maggiore di quella relativa alla sintesi del MeOH anche a bassa pressione; per questo la prima fase della nostra attività è dedicata alla disidratazione del metanolo. Il fatto di lavorare a bassa pressione consente di utilizzare semplici reattori di pirex mentre l'alimentazione del metanolo avviene tramite un dosatore volumetrico. I catalizzatori saranno inizialmente di tipo convenzionale, ovvero zeoliti e γ-allumina. In seguito saranno testati catalizzatori non convenzionali in cui un supporto inorganico come SiO_2 o MCM-41 è funzionalizzato con una funzione acida solfonilica. Questi catalizzatori hanno elevata area superficiale, idonee caratteristiche acide ed elevata resistenza termica.

Inizialmente per la misura quantitativa della conversione del metanolo e della selettività nei confronti del DME, sono state effettuate misure con un micro-GC dotato di rivelatore TCD ed usando H_2 come gas di trasporto, infatti la conducibilità termica del metanolo è molto vicina a quella dell'argon (comunemente usato come gas di trasporto). In queste condizioni sono state possibili alcune analisi preliminari di carattere qualitativo, non disponendo ancora degli opportuni standard.

Nella Figura 258 è riportata l'area del segnale gascromatografico assegnato al DME per due diverse temperature, quando la pressione è di 1,3 bar ed il flusso di MeOH è 0,06 mL/min ed il catalizzatore è γ-allumina. Dalla figura si può notare come la produzione di DME aumenti all'aumentare della temperatura.

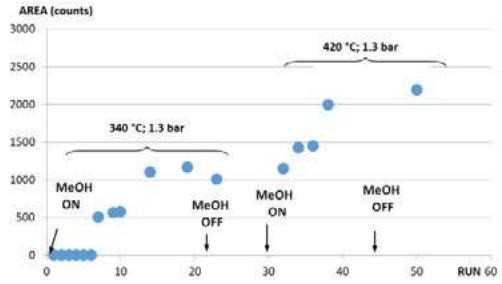


Figura 258. Segnale gascromatografico relativo al DME per due diverse temperature (pressione = 1,3 bar; flusso di MeOH = 0,06 mL/min; catalizzatore: γ-allumina)

Nella Figura 259 è riportato l'effetto della temperatura sulla resa in DME per il catalizzatore MN-170 che corrisponde a silice funzionalizzata con un gruppo benzensolfonico (SiO_2-C_6H_4-SO_3H). La pressione è 1.7 bar ed il flusso di alimentazione del metanolo è 0,02 mL/min.

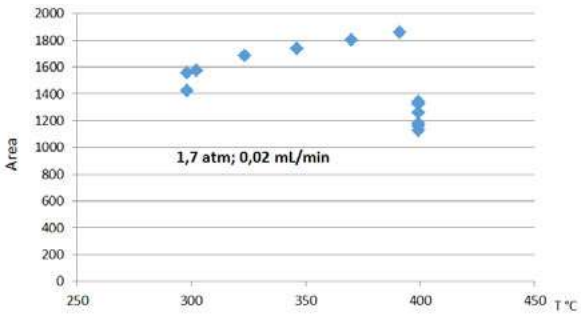


Figura 259. Effetto della temperatura sulla resa in DME [catalizzatore MN-170 : silice funzionalizzata con gruppo benzensolfonico (SiO_2-C_6H_4-SO_3H); pressione = 1,7 bar; flusso di alimentazione metanolo = 0,02 mL/min]

Dalla figura si nota come l'efficienza cresca inizialmente con la temperatura ma subisce un crollo intorno a 400 °C. Infine nella Figura 260 viene riportato il confronto fra il rapporto DME/MeOH per i due catalizzatori MN-170 e

γ-allumina alla temperatura di 400 °C e pressione di 1,7 bar con 0,02 mL/min di metanolo. Come si nota il catalizzatore MN-170 è inizialmente più efficiente della γ-allumina, ma perde rapidamente funzionalità tendendo agli stessi valori della γ-allumina.

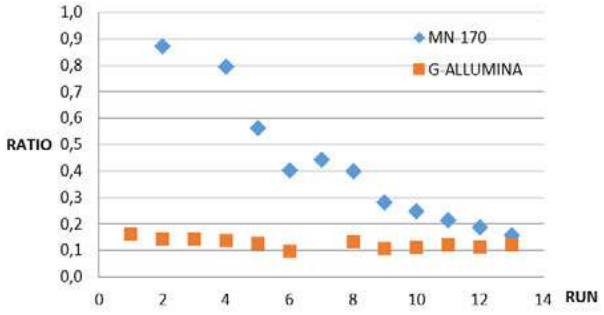


Figura 260. Confronto fra il rapporto DME/MeOH per i due catalizzatori MN-170 e γ-allumina (temperatura = 400 °C; pressione = 1,7 bar; 0,02 mL/min di metanolo)

Alla luce di queste prime indicazioni si può ipotizzare un effetto destabilizzante della temperatura sulla porzione organica del catalizzatore MN-170 che tenderebbe quindi a comportarsi come solo SiO_2. La silice è infatti un possibile catalizzatore di disidratazione del metanolo al pari dell'allumina.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/251.

Linea Progettuale B. Polo tecnologico del Sulcis

Linea B1 – Attività SOTACARBO

Nella Linea Progettuale B1 vengono proposte ed affrontate tecnologie con un orizzonte applicativo nel breve-medio termine, che vengono applicate e studiate su facility di prova di scala pilota pre-industriale, di proprietà Sotacarbo S.p.A., che è anche l'organo esecutore di riferimento della Linea.

a. Cattura della CO_2 in pre-combustione e trattamento del syngas con produzione di combustibili gassosi

Le attività, sia teoriche che sperimentali, svolte nel periodo dal 1 ottobre 2014 al 30 settembre 2015, hanno riguardato sia la modifica e l'integrazione di alcune sezioni dell'impianto pilota e dimostrativo, che test sperimentali per la messa a punto di tecnologie di gassificazione su scala dimostrativa. Nel dettaglio l'obiettivo è stato quello di produrre combustibili gassosi dal carbone attraverso il processo di gassificazione e di approfondire i processi di separazione della CO_2 dal syngas con solventi liquidi. In quest'ambito sono state svolte delle sperimentazioni negli impianti, volte a caratterizzare la produzione di syngas, il suo trattamento e il loop completo di assorbimento e desorbimento della CO_2 presente nel syngas con misure di densitometria e viscosimetria, mediante la strumentazione installata nella precedente annualità. Le attività sono state svolte prevalentemente presso la piattaforma Pilota ed i laboratori Sotacarbo. In particolare sono stati studiati i processi di:

- co-gassificazione carbone e biomasse su scala dimostrativa;
- assorbimento delle ammine in ciclo chiuso con il sistema di rigenerazione, dove sono state ottimizzate le procedure di funzionamento e sono state analizzate le caratteristiche di degrado dell'ammina.

Sono state eseguite le attività di modifica e integrazione di alcune sezioni dell'impianto pilota e dimostrativo ed eseguiti dei test preliminari per verificare la funzionalità dei sistemi costituenti i due impianti, a seguito delle modifiche e integrazioni effettuate. Successivamente sono state avviate le sperimentazioni relative a:

- Impianto pilota - Ottimizzazione del processo di cattura della CO_2 mediante l'impiego di solventi liquidi a base di ammine, in condizioni di pre-combustione
- Impianto dimostrativo - Ottimizzazione del processo di gassificazione.

Test e attività sperimentali sull'impianto pilota e dimostrativo

Le attività sperimentali eseguite sono di seguito riportate:

- è stata effettuata una sperimentazione per valutare la reazione alle alte temperature di due differenti tipologie di inerti (argilla e lapillo vulcanico), da utilizzarsi nei successivi test sperimentali sull'impianto

dimostrativo. I componenti d'impianto testati sono stati: Gassificatore, Scrubber, I Stadio di desolforazione a freddo con soda e torcia. Il combustibile utilizzato è stato: 100% carbone russo, avente pezzatura tra 8 e 15 mm. La durata della prova è stata di circa 16 ore;

- è stata effettuata una sperimentazione per valutare l'efficienza di rigenerazione attraverso la caratterizzazione del solvente in ingresso ed in uscita dal sistema, in termini di densità, di viscosimetria e di pH della soluzione. I componenti d'impianto testati sono stati: sezione di assorbimento della CO_2 (SAC) alimentata con MEA 5 M, sezione di rigenerazione. E' stata utilizzata una miscela di gas costituita da 90% di N_2 e 10% di CO_2 (in volume). La durata della prova è stata di circa 16 ore;
- è stata effettuata una sperimentazione per valutare l'efficienza di rigenerazione attraverso la caratterizzazione del solvente in ingresso ed in uscita dal sistema, in termini di densità, di viscosimetria e di pH della soluzione. I componenti d'impianto testati sono stati: gassificatore, scrubber, desolforatore a caldo, sezione di assorbimento della CO_2 (SAC), sezione di rigenerazione e torcia. Il combustibile utilizzato è stato: 100% carbone russo. La durata della prova è stata di circa 16 ore;
- è stata effettuata una sperimentazione per valutare l'efficienza di rigenerazione attraverso la caratterizzazione del solvente in ingresso ed in uscita dal sistema, in termini di densità, di viscosimetria e di pH della soluzione. I componenti d'impianto testati sono stati: sezione di assorbimento della CO_2 (SAC) alimentata con MEA 5 molare, sezione di rigenerazione. E' stata utilizzata una miscela di gas costituita da 90% di N_2 e 10% di CO_2 (in volume). La durata della prova è stata di circa 16 ore;
- è stata effettuata una sperimentazione per valutare l'efficienza del processo di gassificazione utilizzando carbone colombiano a granulometria controllata. I componenti d'impianto testati sono stati: Gassificatore, Scrubber e Torcia. Il combustibile utilizzato è stato carbone colombiano (100%). La durata della prova è stata di circa 80 ore;
- è stata effettuata una sperimentazione per valutare l'efficienza di rigenerazione attraverso la caratterizzazione del solvente in ingresso ed in uscita dal sistema, in termini di densità e di pH della soluzione. I componenti d'impianto testati sono stati: gassificatore, scrubber, sezione di assorbimento della CO_2 (SAC), sezione di rigenerazione. Il combustibile utilizzato è stato: 100% carbone colombiano. La durata della prova è stata di circa 16 ore;
- è stata effettuata una sperimentazione per valutare la rigenerazione del solvente. La durata della prova è stata di circa 5 ore;
- è stata effettuata una sperimentazione per valutare l'efficienza del processo di gassificazione utilizzando carbone colombiano a granulometria controllata. I componenti d'impianto testati sono stati: Gassificatore, Scrubber e Torcia. Il combustibile utilizzato è stato carbone colombiano (100%). La durata della prova è stata di circa 80 ore.

Nell'ambito del presente obiettivo sono stati inoltre svolte le seguenti attività:

- studi modellistici sui processi di separazione della CO_2 attuati attraverso l'utilizzo di solventi liquidi poi inviati a rigenerazione, affidati al Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali dell'Università di Cagliari.
- modellazione cinetica della pirolisi e ossido-riduzione dei gas di coda provenienti dalla rigenerazione dei solventi utilizzati per la desolforazione (costituiti principalmente da H_2S, CO_2, CO) per la produzione di gas di sintesi, e la relativa attività di convalida sperimentale su impianto da laboratorio realizzato presso il Centro Ricerche Sotacarbo, affidata al Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta".

Nel corso dell'annualità sono state modificate e integrate alcune parti d'impianto come di seguito descritto.

Impianto pilota

Al fine ottimizzare il funzionamento delle sezioni di assorbimento e rigenerazione è stata potenziata la strumentazione di analisi in linea. Nelle precedenti campagne sperimentali si è constatato che la densità è un importante parametro per valutare le prestazioni del processo di assorbimento CO_2 e rigenerazione dei solventi. Pertanto si è deciso di installare due misuratori in linea di densità tarati sulle ammine (MEA, MDEA, DEA): il primo sull'ammina satura di CO_2 in uscita dalla sezione di assorbimento ed il secondo sull'ammina rigenerata in uscita dalla sezione di rigenerazione

Tali strumenti sono stati introdotti per avere una misura precisa sul grado di esaurimento e rigenerazione dell'ammina impiegata nel processo di cattura della CO_2; essendoci infatti un legame tra grado di saturazione dell'ammina e la sua densità. Il DT001 e il DT002 risultano infatti essere installati rispettivamente all'ingresso dell'impianto di rigenerazione e all'uscita di esso.

Sulla base delle prescrizioni presenti nel manuale operativo (a corredo dei due strumenti), si è deciso di montare il misuratore DT001 (ingresso MEA impianto di rigenerazione) nella configurazione ottimale atta a eliminare i problemi causati dalla presenza di eventuali impurità, possibili cause di sedimenti e ostruzioni. Tale configurazione prevede il posizionamento dello strumento con il serbatoio di misura rivolto verso l'alto, analoga configurazione è stata adottata sul DT002 posto all'uscita dell'impianto di rigenerazione MEA.

Pur essendo il fluido proveniente dalla colonna di rigenerazione privo di impurità, si è optato per questa configurazione per evitare eccessive perdite di carico nel circuito. Le pompe volumetriche installate nell'impianto hanno una modesta prevalenza (0,06 bar), quindi si è voluto evitare di introdurre eccessive perdite di carico nel circuito, possibili cause di problemi di carico e di scarico della colonna di rigenerazione. I parametri funzionali dei misuratori sono riportati in Tabella 73.

Tabella 73. Parametri operativi dei misuratori DT001 e DT002

Parametri funzionali	Operativi	Nominali
Temperatura	10 ÷ 40°C	– 40 ÷ 150°C
Pressione	Circa atmosferica	100 bar
Portata	0 ÷ 1,421 L/min	1,5 ÷ 6 L/min *
Densità	1013 ÷ 1117 kg/m^3**	0 ÷ 5000 kg/m^3
intervallo di calibrazione	1015 ÷ 1070 kg/m^3	400 ÷ 2000 kg/m^3

* Portata consigliata, **Densità MEA 5% molare, con grado di saturazione tra 0 e 0,50 a 25°C

Impianto dimostrativo

Sull'impianto dimostrativo sono state eseguite le seguenti modifiche.

a) Ri-progettazione e realizzazione del sistema di trattamento dei reflui provenienti dagli impianti sperimentali

Durante le sperimentazioni effettuate nelle precedenti annualità, in particolare nel PAR 2013, dove è stato testato l'impianto dimostrativo, è emerso che le quantità di reflui provenienti dagli impianti e quindi da smaltire sono considerevoli con notevole incidenza sui costi di esercizio. Pertanto è stata avviata la ri-progettazione del sistema di trattamento dei reflui, considerando diverse soluzioni impiantistiche, tra cui:

- un impianto di distillazione evaporativo;
- un impianto che prevede un trattamento di tipo fisico per diversi stadi di filtrazione con riutilizzo del fango di scarto finale nel processo di gassificazione;
- un impianto che prevede un trattamento del refluo di tipo chimico fisico mediante flocculazione e addensamento e stadio finale di filtrazione.

Dal confronto delle diverse soluzioni impiantistiche è emerso quanto segue:

- l'impianto di distillazione evaporativo non è stato preso in considerazione in quanto fornisce un prodotto finale con caratteristiche di purezza superiori a quelle necessarie e con costi di fornitura e gestione maggiori rispetto alle altre due soluzioni;
- anche la seconda soluzione sopra indicata è stata scartata in quanto, oltre a presentare un costo di realizzazione elevato, non vi è certezza sulla possibilità di riutilizzare il sottoprodotto nel processo di gassificazione;
- è stata, quindi, selezionata la tecnologia di trattamento di tipo chimico-fisico mediante flocculazione e addensamento e stadio finale di filtrazione.

La fornitura, l'installazione e il collaudo sono stati affidati all'Azienda Italiana Depuratori Srl. In particolare l'impianto risulta costituito da:

- una pompa di alimentazione;
- due miscelatori da inserire nelle vasche esistenti;
- un bacino combinato di destabilizzazione, flocculazione e sedimentazione;
- impianti di stoccaggio, diluizione e dosaggio reattivi chimici, completi di serbatoi del tipo cilindrico verticale in polietilene con vasche esterne di sicurezza, aventi volume utile compresi tra 500 e 1.000 litri;
- un filtro finale a letto misto di sicurezza a quarzite e a carboni attivi, con gruppo di valvole a sfera per il lavaggio periodico del letto filtrante-adsorbente;
- strumentazione elettronica di misura e controllo in continuo del pH;
- una vasca in cemento armato prefabbricato di accumulo da 6 m^3, per consentire il riutilizzo del refluo depurato per il circuito di raffreddamento;

- un quadro elettrico di protezione e di comando di tutte le utenze,
- un container per l'alloggiamento e la protezione di tutte le apparecchiature costituenti l'impianto di trattamento.

Durante la fase di realizzazione dell'impianto e a seguito delle ulteriori analisi effettuate sui reflui provenienti dall'impianto, si è reso necessario integrare l'ordine suddetto con la fornitura di un'ulteriore sezione di dosaggio del pH. In Figura 261 è riportato l'impianto installato.



Figura 261. Impianto trattamento reflui

b) Modifica delle linee del sistema di campionamento syngas

Nella presente annualità è stata eseguita la riprogettazione delle linee dei sistemi di campionamento syngas, per ottimizzare il loro utilizzo con entrambi gli impianti sperimentali.

In particolare, è stato deciso di spostare sia il modulo ABB che il sistema di campionamento e analisi Agilent in una zona centrale equidistante dai due impianti sperimentali; tale spostamento ha permesso di ridurre la lunghezza delle linee di campionamento con conseguente miglioramento delle misurazioni effettuate, in quanto sono stati ridotti i tempi di percorrenza del gas lungo le linee. Il sistema di analisi ABB è stato inoltre dotato per ogni linea di campionamento di sistemi di filtrazione posti a monte dello strumento al fine di evitare uno sporcamento dello stesso.

A partire dal mese di ottobre 2014, sono state eseguite delle prove funzionali su tutte le apparecchiature da laboratorio e sui sistemi di analisi dei gas, mentre durante tutta la campagna sperimentale sono state eseguite le principali analisi dei combustibili impiegati nelle prove. Per approfondimenti e dettagli sulle procedure operative e i parametri di esercizio adottati per l'esecuzione dei test sperimentali e sui risultati delle prove condotte si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/252.

Per concludere, in sintesi, la campagna sperimentale sul processo della cattura della CO_2 e sul processo di rigenerazione dei solventi con MEA (monoetanolammina) 5 M hanno avuto come obiettivo l'ottimizzazione e la valutazione del processo di assorbimento e rigenerazione dei solventi tramite le misure dei due densimetri in linea posti: all'uscita della sezione di assorbimento sul solvente ricco di CO_2 proveniente dal processo di assorbimento e sul solvente rigenerato proveniente dall'unità di rigenerazione. Sui due densimetri è stata effettuata un'attività di verifica dell'attendibilità dei valori misurati per la MEA 5 M. Di seguito si riassumono le principali lavorazioni e attività :

- installazione degli strumenti nelle migliori condizioni per il loro funzionamento;
- verifica dell'attendibilità dei valori rispetto a quelli misurati da un densimetro portatile;
- verifica del cambiamento della densità dell'ammina rispetto alla temperatura;
- calcolo della funzione di compensazione della densità con la temperatura ed inserimento di tale funzione negli strumenti al fine di avere una misura depurata dall'errore con la temperatura.

Le attività sui densimetri hanno mostrato durante i test sperimentali con MEA 5 M la possibilità di controllare il processo di assorbimento e rigenerazione del solvente tramite gli strumenti in linea poiché la misura della densità (depurata dalla variazione rispetto alla temperatura) è fortemente correlata al caricamento della CO_2 per la monoetanolammina (il caricamento esprime il numero di moli di CO_2 assorbite nel solvente liquido/numero di moli di ammina nel solvente liquido).

È stato effettuato anche un test di assorbimento di H_2S e CO_2 anche con una soluzione di MDEA (metildietanolammina) 5 M, tale test è stato diviso in due fasi: durante la prima si è proceduto all'assorbimento e in una seconda fase il solvente saturo di H_2S e CO_2 è stato rigenerato. Durante tale test è stata verificata la possibilità di assorbire H_2S e CO_2 e rigenerare la soluzione con estrema facilità diminuendo fortemente i consumi elettrici dell'unità di rigenerazione ed avendo una corrente pura di H_2S e CO_2 utile per sviluppare nelle prossime annualità della Ricerca di Sistema Elettrico alcuni processi attualmente in fase di studio teorico.

Sono stati effettuati due test di gassificazione sull'impianto dimostrativo, utilizzando come unico combustibile carbone colombiano, che hanno permesso di verificare come il gassificatore sia facilmente gestibile. Durante il primo test sperimentale si è cercato di non andare al massimo della potenzialità del gassificatore, di seguito sono riassunti i principali risultati sperimentali:

- il consumo di carbone è stato pari a circa 120 kg/h
- la portata di aria è stata mantenuta fra i 500÷600 kg/h
- la portata di syngas è stata pari a circa 650 m^3/h con un potere calorifico inferiore di circa 4 MJ/kg.

Il secondo test sperimentale è stato condotto con la stessa tipologia di combustibile ma con condizioni operative differenti; il test ha presentato risultati analoghi al primo per qualità del gas prodotto:

- il consumo di carbone è stato pari a circa 120 kg/h
- la portata d'aria è stata mantenuta fra i 700÷800 kg/h
- la portata di syngas è stata pari a circa 715 m^3/h con un potere calorifico inferiore di circa 3,6 MJ/kg.

Effettuando per i due test sperimentali il calcolo del rendimento di gas freddo η_{GF} (*cold gas efficiency*), definito come il rapporto tra la potenza chimica prodotta dal gassificatore sotto forma di syngas (prodotto tra portata di syngas e il suo potere calorifico inferiore) e quella introdotta nel gassificatore attraverso il combustibile, per il primo test è stata ricavata un'efficienza di gassificazione di circa 70%, mentre per il secondo un'efficienza del 67%.

Sviluppo di un modello dettagliato dell'impianto di cattura postcombustione della CO_2 utilizzando Custom Modeller dell'ASPEN

L'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali (DIMCM) dell'Università di Cagliari nell'ambito della linea di ricerca dal titolo "Modellazione e simulazione dei processi di gassificazione a letto fisso e dei successivi sistemi di trattamento del syngas" si è articolata su due differenti filoni:

- Modellazione e simulazione dei processi di gassificazione a letto fisso;
- Modellazione dei sistemi di purificazione del syngas e di cattura della CO_2.

Con riferimento alla modellazione e simulazione dei processi di gassificazione a letto fisso, è stato sviluppato un modello di simulazione zero-dimensionale allo stato stazionario implementato utilizzando il codice di calcolo Aspen Plus. Il modello si basa su un precedente modello dedicato alla valutazione delle prestazioni dei gassificatori a letto fisso, che è stato opportunamente perfezionato e finalizzato sia alla valutazione delle prestazioni di piccoli gassificatori a letto fisso up-draft alimentati a carbone, in diverse condizioni operative, che al supporto alla progettazione di attività sperimentali in unità pilota di gassificazione. Il modello è stato specificamente adattato alla valutazione delle prestazioni di entrambi i gassificatori presenti in Sotacarbo (pilota e dimostrativo) al fine anche di supportare la progettazione e l'esecuzione delle campagne sperimentali.

Il modello del processo di gassificazione permette di determinare le prestazioni generali (caratteristiche chimico-fisiche del syngas e bilancio energetico) degli impianti di gassificazione a letto fisso alimentati a carbone o anche a biomasse. Più specificamente è in grado di valutare i bilanci di massa ed energia in ogni zona (o sottoprocesso) del gassificatore e le principali caratteristiche del syngas prodotto dal processo di gassificazione (composizione, portata massica, temperatura, potere calorifico, etc.), noti i principali parametri operativi, quali temperature di gassificazione, rapporti acqua/carbone, rapporti ossidante/carbone, grado di conversione del carbonio, composizione dei gas volatili, composizione del combustibile primario e dell'ossidante, etc..

Il modello sviluppato è stato utilizzato per valutare le prestazioni del gassificatore pilota Sotacarbo e potrà essere utilizzato in futuro per la previsione delle prestazioni del gassificatore dimostrativo presente presso il Centro Ricerche Sotacarbo. Dal confronto dei risultati ottenuti attraverso il modello con i dati sperimentali si evince come il modello replichi in maniera puntuale le prestazioni del gassificatore, quando alimentato con carboni altamente reattivi, come, ad esempio ligniti o carboni sub-bituminosi. Al momento, tuttavia, non sono ancora disponibili sufficienti dati sperimentali per la validazione del modello con riferimento al gassificatore dimostrativo.

La seconda attività sviluppata su questa linea di ricerca ha riguardato la modellazione dei sistemi di purificazione del syngas e di cattura della CO_2 presenti a valle del gassificatore pilota di piccola taglia, con l'obiettivo di ottimizzarne l'integrazione con l'impianto di gassificazione nel suo complesso. Il sistema di purificazione del syngas e di cattura della CO_2 include: un compressore, un riscaldatore elettrico, un processo di desolforazione a caldo, un sistema di shift conversion, un sistema di rimozione della CO_2 e una sezione di produzione dell'idrogeno.

Nel corso della ricerca sono stati analizzati con maggior dettaglio il processo di shift conversion dell'ossido di carbonio e il processo di rimozione della CO_2 con solventi amminici. La trasformazione di shift del CO avviene in due stadi in reattori distinti, operanti uno ad alta temperatura ed uno a bassa temperatura, separati da uno scambiatore di calore per il raffreddamento intermedio del gas. Il processo di cattura post-combustione della CO_2 è basato su una miscela di acqua e monoetanolamina (MEA), che, in una colonna di assorbimento, separa la CO_2 dal syngas. All'uscita dalla sezione di rimozione della CO_2 si ottiene un syngas ricco di idrogeno da inviare alla sezione di produzione dell'idrogeno.

Obiettivo primario di questa attività di ricerca è stata l'ottimizzazione delle interazioni sia di energia che di materia tra le varie sezioni della linea di purificazione, al fine di incrementare le prestazioni dell'impianto nel suo complesso. L'attività di ricerca riguardante la sezione di shift-conversion ha permesso di valutare, in particolare,

l'influenza dei principali parametri operativi (temperatura, pressione, rapporto molare vapore/CO) sulle prestazioni dei reattori, con riferimento alle differenti caratteristiche del syngas prodotto nel gassificatore in funzione della tipologia di carbone e dei principali parametri operativi del gassificatore stesso. Con riferimento al processo di cattura della CO_2, l'attività di ricerca, oltre all'ottimizzazione delle interazioni energetiche tra la sezione di cattura della CO_2 e il resto dell'impianto, ha riguardato anche la valutazione della fattibilità dell'introduzione di un sistema di rigenerazione delle ammine, attualmente non presente nell'impianto di gassificazione. I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/254.

Modellazione e simulazione dei processi di gassificazione a letto fisso e dei successivi sistemi di trattamento del syngas

Nel quarto anno di attività del progetto, riguardante la modellazione e il controllo di un impianto di tipologia CCS Post-Combustione dimensionato per trattare la portata di fumi uscente da una centrale di potenza USC di taglia 250 MWe (Benchmark), è stata focalizzata l'attenzione sul miglioramento dei modelli dell'assorbitore e dello stripper, sia per ciò che riguarda l'analisi del numero dei segmenti da utilizzare per la discretizzazione, sia per quanto concerne la modellazione matematica dei due processi.

In particolare, è stato esaminato nuovamente il modello su Aspen Plus, in quanto i profili di temperatura precedenti presentavano alcune problematiche di congruenza fisica con i flussi all'interfase ottenuti.

Al fine di selezionare un adeguato numero di segmenti per la discretizzazione del dominio spaziale del modello (ovverosia l'altezza della colonna), è stata preliminarmente condotta un'analisi del numero di Peclet. Questo parametro adimensionale, definito come il rapporto tra la velocità di trasporto per convezione e la velocità di trasporto per diffusione/dispersione assiale, fornisce delle importanti indicazioni riguardanti il numero di segmenti da adottare. In particolare, a un valore elevato del numero di Peclet corrisponde un comportamento della colonna simile a quello di un reattore PFR puro, e pertanto sarà necessario un elevato numero di segmenti per la corretta descrizione dei profili di concentrazione e temperatura all'interno della apparecchiatura. Viceversa nel caso di bassi valori del gruppo adimensionale, sarà necessario prendere in considerazione gli effetti dovuti alla diffusione/dispersione assiale e, pertanto, non sarà necessario considerare un numero considerevole di segmenti.

Per quanto riguarda il modello in esame, sono stati considerati due diversi numeri di Peclet: il primo relativo allo scambio di materia (Pe_M) e il secondo relativo allo scambio di energia (Pe_T). In entrambi i casi, tale parametro è stato valutato per le due fasi e con riferimento sia all'altezza della colonna che al diametro del riempimento come grandezze caratteristiche. In Tabella 74 vengono riportati gli ordini di grandezza ottenuti per i diversi numeri di Peclet. Si precisa che, poiché il numero di Peclet è ottenuto in seguito a una procedura di adimensionalizzazione dei bilanci, è stato necessario scegliere delle appropriate condizioni di riferimento. Nel nostro caso, le condizioni di riferimento coincidono con le condizioni di alimentazione.

Tabella 74. Ordini di grandezza dei numeri di Peclet ottenuti

Trasporto di materia				**Trasporto di energia**			
Altezza colonna		Diametro particella		Altezza colonna		Diametro particella	
Liquido	Vapore	Liquido	Vapore	Liquido	Vapore	Liquido	Vapore
10^9	10^6	10^6	10^3	10^7	10^6	10^5	10^3

Alla luce dei risultati ottenuti è pertanto possibile affermare che sarà necessario utilizzare un numero di segmenti consistente per la corretta descrizione del sistema.

In letteratura viene spesso fatta confusione, nelle simulazioni relative all'ottimizzazione energetica, nel significato del rapporto tra la CO_2 e la MEA presenti nella corrente liquida in ingresso all'assorbitore. È stato infatti rilevato che tale rapporto dovrebbe essere espresso in funzione della quantità di ione carbamato ($MEACOO^-$) sulla quantità di MEA piuttosto che della quantità di CO_2, in quanto la bontà della rigenerazione del solvente dovrebbe essere misurata sulla base della quantità di $MEACOO^-$ che si ritrova presente nella corrente in uscita dal fondo dello stripper.

Con riferimento ai valori ottimi riportati in letteratura[8, 9] , il rapporto $MEACOO^-$/MEA in ingresso all'assorbitore è

[8] Cau G., Tola V., Deiana P., "Comparative performance assessment of USC and IGCC power plants integrated with CO_2 capture systems," *Fuel,* 116 (2014) 820-833

[9] Abu-Zahra M.R.M., Schneiders L.H.J., Niedere J.P.M., Feron P.H.M., Versteeg G.F., "CO_2 capture from power plants. Part I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine," International Journal of Greenhouse Gas Control, 1 (2007) 37-46

stato preso pari a 0,28. Come già fatto in precedenza, l'assorbitore è stato simulato utilizzando il modello RadFrac™ in modalità RateBased (software AspenPlus® V8.6) con un numero di segmenti crescente. Le cinetiche utilizzate sono quelle riportate da Kvamsdal e Rochelle[10].

A titolo di esempio, nella Figura 262 sono rappresentati gli andamenti dei profili di temperatura lungo l'apparecchiatura dell'assorbitore al variare del numero di stadi per la fase liquida e per la fase vapore. L'utilizzo dei profili di temperatura è preferibile a quelli di composizione perché le calibrazioni dei modelli di processi industriali è basata sulla capacità del modello di descrivere questi profili, che spesso sono gli unici noti.

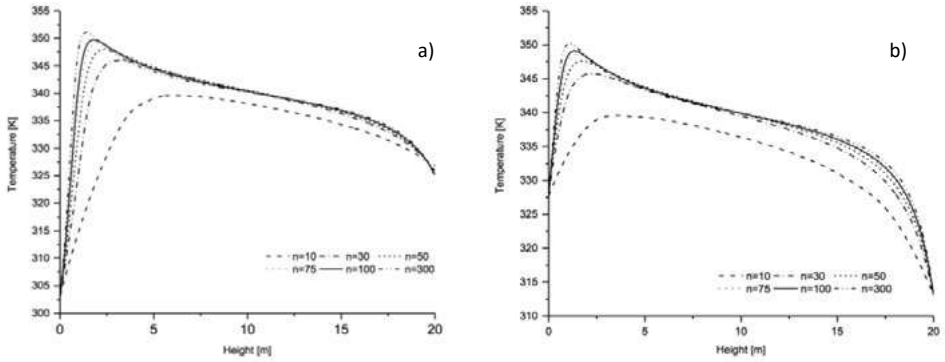


Figura 262. Profilo termico al variare del numero degli stadi: a) liquido; b) vapore

Dall'analisi della Figura 262a è possibile notare come il profilo con 10 segmenti sia notevolmente diverso rispetto ai profili ottenuti con un numero maggiore di segmenti. In particolare, si può vedere che, dopo 30 segmenti, si ha un andamento generalmente concordante dopo un'altezza di riempimento pari a 5 m.

Le differenze iniziali nei profili possono essere spiegate dal fatto che le velocità di reazione (e di conseguenza la generazione di calore di reazione e l'evaporazione dell'acqua) sono maggiori in prossimità dell'entrata dell'assorbitore, dove la concentrazione di CO_2 è più alta e sono quindi presenti i gradienti più elevati. Un'analisi del tutto simile può essere fatta per i profili di temperatura della fase vapore, riportati in Figura 262b.

Una volta terminata questa analisi preliminare, è stato sviluppato un nuovo modello matematico dinamico, basato su principi primi, per entrambe le apparecchiature basati sulle seguenti ipotesi:

- modello plug-flow per la descrizione della fluodinamica della fase liquida e vapore;
- comportamento non-ideale della miscela liquida e gassosa;
- equilibrio termodinamico in corrispondenza dell'interfaccia gas/liquido;
- effetto delle reazioni nel film liquido espresso dal fattore di esaltazione;
- assenza di scambio termico con l'esterno.

Il modello formulato, basato sulla teoria dei due film considera contemporaneamente la fase liquida e la fase gassosa. Nella fase liquida, sia nell'assorbitore sia nello stripper sono stati modellati tutti i componenti eccetto gli inerti (Ar, N_2, O_2) mentre, per quanto riguarda la fase gassosa, nello stripper sono stati considerati solamente i componenti volatili (CO_2, MEA, H_2O) e nell'assorbitore sono state considerate le specie volatili e gli inerti. La chimica del sistema è stata descritta dalle espressioni cinetiche di formazione del carbammato e dell'idrogeno carbonato e dalle relazioni di equilibrio riguardanti la dissociazione dell'H_2O, della MEA e dell'idrogeno carbonato. Le composizioni all'interfaccia sono state ricavate considerando gli equilibri di fase e l'uguaglianza dei flussi. Inoltre, per calcolare l'effettivo trasferimento di materia attraverso il film liquido, è stato necessario utilizzare il fattore di esaltazione, il quale rappresenta il rapporto tra il flusso in presenza di reazione chimica e il flusso puramente diffusivo.

La principale differenza rispetto alla precedente modellazione si presenta nel passaggio da una fluidodinamica di tipo PFR a una fluidodinamica di tipo CSTR. In questo modo si ottiene una rappresentazione dei processi simile a quella delle colonne di distillazione a stadi. Da un punto di vista puramente matematico ciò significa passare da un sistema di PDE a un sistema di ODE. Globalmente le due colonne vengono quindi modellate come una serie di *n*-CSTR che, come noto, per un *n* sufficientemente grande, tende a un reattore PFR.

A causa dei problemi riscontrati con Custom Modeller non è stato possibile ottenere modelli funzionanti delle due

[10] H.M. Kvamsdal, G.T.Rochelle, "Effects of the Temperature Bulge in CO2 Absorption from Flue Gas by Aqueous Monoethanolamine", Ind. Eng. Chem. Res., 47 (2008) 867-875

apparecchiature e per questa ragione si sta procedendo alla loro implementazione in linguaggio Fortran.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/253.

Nel quadro di questo obiettivo il Politecnico di Milano ha svolto attività relative alla ossidoriduzione di CO_2e H_2S per la produzione di gas di sintesi.

I gas di coda provenienti dalla rigenerazione dei solventi utilizzati per la desolforazione sono principalmente costituiti da H_2S, oltre che da CO_2, CO, COS e altri composti organosolforati. Tali correnti possono essere efficacemente convertite a gas di sintesi in base ad una nuova tecnologia sviluppata presso il Politecnico di Milano secondo la reazione di ossido-riduzione:

$$2H_2S + CO_2 = H_2 + CO + S_2 + H_2O$$

Gli studi preliminari di modellazione e sperimentazione hanno mostrato l'efficacia di tale reazione a temperature relativamente elevate, tali per cui si ha la decomposizione termica dell'H_2S, l'ossidazione dello zolfo ivi contenuto a zolfo elementare e, a seguito dello sviluppo di un pool radicalico (H, SH, HSS, etc.), la riduzione di CO_2 a CO. Tale processo permette di neutralizzare l'H_2S presente nei gas di coda, così come già avviene per alcuni processi di conversione (i.e. processo Claus), ma nel contempo valorizza il potenziale di idrogeno contenuto in questa molecola. Inoltre, il carattere innovativo del processo è nell'utilizzo di CO_2 come agente ossidante e non di aria o ossigeno come comunemente avviene. Ciò permette di convertire porzioni significative di CO_2 in gas sintesi.

Il lavoro effettuato ha permesso di approfondire le conoscenze scientifiche e tecnologiche relative a questo processo, nonché di dimostrarne fattibilità e impatto su scale dimostrative ed industriali con forti ricadute in diverse aree tecnologiche come la gassificazione del carbone a basse emissioni, la desolforazione di gas naturale e greggi, la produzione a impatto zero di metanolo e ammoniaca per citarne alcune.

L'interazione tra Politecnico di Milano, Sotacarbo e ENEA si è dimostrata fortemente sinergica. L'attività sperimentale del Centro di Ricerca di Carbonia ha permesso di estendere e convalidare i modelli cinetici e matematici sviluppati presso il Politecnico, caratterizzando quindi in maggior dettaglio i meccanismi di reazione coinvolti nella reazione complessiva di ossido-riduzione per la produzione di gas di sintesi.

Le attività svolte coprono diversi ambiti, tra cui:
- il completamento dell'analisi di letteratura per il sistema reagente C-H-O-S con valutazione dei modelli cinetici disponibili;
- il supporto all'attività sperimentale di pirolisi di H_2S da effettuare presso Sotacarbo.
- la convalida della sperimentazione e del modello cinetico di pirolisi dell'H_2S.

offrendo la possibilità di effettuare:
- le valutazioni economiche alla scala del processo per fattibilità industriale della tecnologia di produzione di gas di sintesi. Simulazioni con strumenti commerciali (i.e. AspenHysys).
- la sensitività rispetto ai principali parametri operativi e valutazione delle condizioni limite e programmazione dell'ulteriore sperimentazione, anche rispetto alla reazione di ossido-riduzione di CO_2 con H_2S e convalida del relativo modello cinetico.

Le previsioni del modello sono dapprima confrontate con i dati esistenti in letteratura. Sono state quindi eseguite simulazioni a supporto dell'attività sperimentale di Sotacarbo, risultate utili all'allestimento e taratura degli apparati sperimentali.

La complessa cinetica di pirolisi dell'H_2S ha richiesto un notevole sforzo modellistico e sperimentale per la comprensione dei meccanismi di reazione e per il tuning del modello cinetico nel suo complesso e delle singole reazioni chimiche costituenti il modello stesso.

Alcuni andamenti preliminari di conversione di conversione dell'H_2S e della CO_2 in syngas mostrano le potenzialità e l'efficacia della tecnologia. L'attività di ricerca richiede tuttavia ulteriori convalide sperimentali e rimodulazioni matematiche alla scala cinetica prima di poter passare a simulazioni affidabili alla scala del processo.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/255.

b. Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di ossi-combustione

Nel quadro di questo obiettivo sono stati effettuati studi di fattibilità tecnica e sperimentale riguardanti due sezioni di impianto innovative, di impatto significativo sulla competitività della tecnologia, in particolare:

- la sezione di preparazione ed alimentazione della miscela acqua-carbone, attività svolta in collaborazione con

il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura dell'Università di Cagliari;
- la sezione micro pilota di conversione dei composti solforati (SO_2 presente nei fumi), per il recupero dello zolfo valorizzato sotto forma di acido solforico commerciale in alternativa ai convenzionali metodi che prevedono la discarica a terra di gessi.

b.1 Preparazione ed alimentazione del coal slurry da alimentare al reattore di ossicombustione

Nell'ambito del presente subtask è proseguita l'attività di caratterizzazione del coal slurry con l'affidamento al Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale ed Architettura dell'Università di Cagliari (DICAAR). Scopo di questo lavoro è individuare le principali caratteristiche delle miscele di acqua e carbone e la composizione dei fumi di combustione per la definizione delle successive fasi di trattamento. Nel corso dell'attività sono state confrontate differenti soluzioni tecnologiche per la produzione di slurry, valutandone gli effettivi limiti applicativi, individuando le più idonee per affidabilità e precisione da implementare nella prossima annualità.

In questo studio, dopo una breve trattazione sullo stato dell'arte delle tecnologie di ossicombustione ed il loro riconoscimento tra le CCS, viene presentato un panorama delle applicazioni esistenti ed in progetto della tecnologia ISOTHERM, con particolare riferimento all'impianto da 48 MWth Sotacarbo-Itea-ENEA. In questo ambito sono state individuate le principali caratteristiche delle miscele di acqua-carbone utilizzate in alimentazione, e la composizione degli effluenti gassosi dal sistema "reattore", la cui caratterizzazione è fondamentale per assicurare il corretto funzionamento delle unità a valle e per caratterizzarne la qualità ambientale. Sono state confrontate differenti soluzioni tecnologiche per la produzione di slurry, valutandone gli effettivi limiti applicativi, individuando le più idonee per affidabilità e precisione da implementare nella prossima annualità.

Le elaborazioni relative alle attività tecnico scientifiche svolte nell'ambito del presente subtask sono riportate nel rapporto RdS/PAR2014/256.

b.2 Definizione e trattamento degli effluenti tipici del processo e realizzazione di una sezione di recupero di acido solforico da fumi di ossicombustione

Nell'ambito del presente subtask è stato realizzato e collaudato un impianto micro-pilota (capacità 3 Nm^3/h di fumi da trattare) di desolforazione dei fumi di combustione provenienti da un ossi-combustore flameless con successiva produzione di acido solforico di grado commerciale.

Durante la presente annualità è stata eseguita la progettazione definitiva (as-built), l'installazione, i collaudi ed le prove preliminari su tale unità che va a completare lo studio già effettuato nell'ambito del PAR 2013 riguardante la progettazione di base e di dettaglio della sezione di desolforazione dei fumi di combustione.

L'impianto realizzato rappresenta un prototipo essendo il primo esempio di applicazione della tecnologia di produzione di acido solforico a correnti gassose di fumi di combustione ricche di CO_2 con basse concentrazioni di SO_2-SO_3. La realizzazione e posa in opera dell'impianto è stata affidata alla ditta Hysytech in data 31 marzo 2015.

Taglia e specifiche dell'impianto

L'impianto di desolforazione da fumi di combustione di scala micropilota è costituito da una sezione di trattamento ad alta temperatura per la conversione dell'anidride solforosa in anidride solforica seguita da una sezione di assorbimento in H_2O dell'anidride solforica con produzione di acido solforico.

L'impianto ha un duplice scopo: consentire la rimozione degli ossidi di zolfo dalla corrente di gas esausti in ingresso e produrre contemporaneamente acido solforico di grado commerciale. In questo modo vengono abbattuti i costi di smaltimento dei reflui prodotti dai tradizionali processi di desolforazione a freddo (tipo Desox) e nello stesso tempo la corrente gassosa di CO_2 concentrata in uscita dalla sezione di assorbimento può essere inviata tal quale allo stoccaggio.

I fumi di combustione ovvero la corrente gassosa in alimentazione all'impianto rappresentano gli effluenti tipici prodotti da un ossi-combustore pressurizzato di tipo flameless ad alta efficienza alimentato con slurry di carbone di basso rango (lignitico ad alto tenore di zolfo) e provengono da una caldaia di recupero termico (GVR).

La taglia dell'impianto riferita alla portata di fumi in ingresso è pari a 3 Nm^3/h. Su una base di servizio di 330 giorni annuo (35 giorni di fermo programmato annuo, non necessariamente continuativi), l'impianto ha un fattore di servizio di 0,90; pari a 7.920 ore annue non necessariamente continuative.

In condizioni di progetto, la corrente gassosa spillata a valle di un turbo-espansore posizionato dopo la caldaia a

recupero ha le seguenti caratteristiche:

- Portata totale massima 4,5 kg/h (3 Nm^3/h)
- Temperatura massima 450 °C
- Pressione (nor) 0,2 barg
- Composizione:
  - Particolato assente
  - Metalli pesanti e alcalini assenti
  - NO_x assenti
  - CO_2 56% vol
  - SO_2 2% vol
  - H_2O 39% vol
  - O_2 % vol

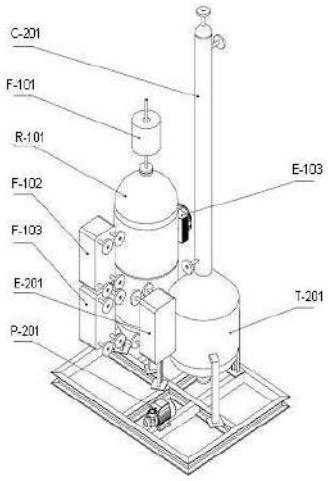


Figura 263. layout dell'impianto

Al fine di verificare le prestazioni dell'impianto, la corrente in alimentazione può anche essere costituita da un gas sintetico prodotto da bombole con caratteristiche analoghe ai fumi.
In particolare i valori di temperatura e pressione della corrente sono le condizioni tipiche della corrente in uscita dal turbo espansore posizionato a valle della caldaia.

La composizione della corrente è stata calcolata in base ai bilanci di massa sul combustore, come già riportato nel report "*Progetto di una sezione di recupero di H_2SO_4*" nella scorsa annualità della Ricerca di Sistema Elettrico.

Le apparecchiature che compongono le due unità (Figura 263) con alcune della loro caratteristiche sono riportate in Tabella 75.

Tabella 75. Elenco apparecchiature

Tag	Sezione	Q.tà	Descrizione	Servizio	Dimensione caratteristica	Note
E-101	Reazione	1	Scambiatore di calore	Recupero termico fumi combustione	1 kW	AISI 316
E-102	Reazione	1	Scambiatore di calore	Condensatore H_2O	1,5 kW	AISI 316
E-103	Reazione	1	Scambiatore di calore	Raffreddamento intermedio	1 kW	Hastelloy acciaio rivestito
F-101	Reazione	1	Riscaldatore elettrico	Start up riscaldamento fumi		
F-102	Reazione	1	Riscaldatore elettrico	Riscaldamento 1° letto catalitico		
F-103	Reazione	1	Riscaldatore elettrico	Riscaldamento 2° letto catalitico		
R-101	Reazione	1	Reattore catalitico	Conversione SO_2 in SO_3	0,2 s^{-1}	Hastelloy acciaio rivestito
S-101	Reazione	1	Separatore condensa	Separazione acqua da fumi		AISI 316
D-101	Reazione	1	Scaricatore condensa	Scarico condensa		AISI 316
C-201	Assorbimento	1	Colonna assorbimento	Produzione H_2SO_4		Hastelloy acciaio rivestito

Le elaborazioni relative alle attività tecnico scientifiche svolte nell'ambito del presente task sono riportate nel rapporto RdS/PAR2014/257.

c. Monitoraggio e storage della CO_2

Sono proseguite le attività legate al progetto generale che si pone come obiettivo il completamento della caratterizzazione del bacino del Sulcis come potenziale sito di stoccaggio dell'anidride carbonica. In particolare sono state eseguite le seguenti attività:

- l'espletamento delle pratiche relative all'istruttoria amministrativa e tecnica finalizzata al rilascio delle autorizzazioni di indagine e dei permessi di ricerca nella zona di Monte Ulmus (limitrofa a Monte Sinni);
- è continuata l'attività di monitoraggio e caratterizzazione geochimica dell'area del bacino carbonifero del Sulcis attraverso il prelievo di campioni di gas nel suolo, in particolare, nel precedente PAR è stata individuata una zona di faglia che potrebbe essere idonea per i test di iniezione, pertanto in questa zona si sono intensificati il numero di campionamenti effettuati;

- il completamento dello studio della sismicità di fondo dell'area carbonifera del Sulcis e dell'adiacente graben del Campidano, che costituisce una baseline della sismicità naturale dell'area, principale riferimento per il successivo monitoraggio sismico di dettaglio dell'area oggetto del progetto di fattibilità, ed in particolare del potenziale sito di stoccaggio. Nell'ambito di questa attività è stato emesso un ordine per l'acquisizione di competenze e conoscenze verso l'INGV, in particolare è stato completato il lavoro iniziato nel precedente PAR, per quanto riguarda il monitoraggio accurato di piccoli micro-sismi eventualmente generati dalla iniezione della CO_2.

c.1 Approfondimenti sulla raccolta delle informazioni, definizione preliminare delle specifiche tecniche per la realizzazione delle perforazioni e procedure autorizzative per attività di ricerca e prospezione

Nell'ambito del seguente subtask è stato condotto uno studio in collaborazione la società di consulenza ambientale, la Golder Associates. Si è partiti dallo studio dell'ubicazione della zona di inserimento del progetto e la sua motivazione. Sono stati vagliati in seguito gli strumenti di programmazione e pianificazione territoriale attualmente vigenti sul territorio in esame e gli eventuali vincoli che possano sussistere, archeologico, paesaggistico, naturalistico e ambientale. È stato poi predisposto un inquadramento dell'ambiente dove si instaura il progetto, dal punto di vista geologico con gli studi preliminari che hanno portato a scegliere la zona fra le tante possibili, e con gli studi dell'area di dettaglio per dimostrare la sicurezza del confinamento nel tempo. Lo studio ha contemplato anche un inquadramento generale della vegetazione e del suolo, per verificare la condizione ex ante della zona. Il progetto e le tecniche operative adottate sono stati poi descritti nel dettaglio individuando i potenziali fattori di disturbo per l'ambiente e descrivendo le misure di prevenzione e mitigazione per ridurre al minimo gli impatti con le diverse componenti ambientali (ambiente biotico ed abiotico).
Si è poi passati alla simulazione del progetto e degli eventuali impatti, analizzando gli eventuali interventi di mitigazione necessari, individuando le eventuali interferenze tra l'opera e l'ambiente, e descrivendo le misure di mitigazione e controllo previste per limitare e contenere gli impatti.

Lo studio preliminare ambientale è stato consegnato in data 14/05/2015. Secondo le norme interne alla Regione Autonoma della Sardegna, che seguono le tempistiche previste dal decreto 152/06, dalla istruzione dell'istruttoria il SAVI ha 45 giorni di tempo per dare risposta, se non intervengono nel frattempo richieste di ulteriori approfondimenti da parte del pubblico (45 giorni) o delle autorità territoriali (30 giorni). Terminati tali tempi, la Giunta Regionale emette parere circa l'assoggettabilità o meno del progetto a valutazione di impatto ambientale. Secondo i tempi sopraddetti, è ragionevole aspettarsi un pronunciamento della Giunta entro il mese di ottobre. Per quanto riguarda lo studio "*Approfondimenti sulla raccolta delle informazioni e definizione preliminare delle specifiche tecniche per la realizzazione delle perforazioni*" da effettuarsi in collaborazione con la società Carbosulcis, partecipata al 100% dalla Regione Autonoma della Sardegna, non si è concretizzata la prosecuzione della collaborazione nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico.

Le elaborazioni relative alle attività tecnico scientifiche svolte k sono riportate nel rapporto RdS/PAR2014/258 .

c.2 Rilievo geostrutturale in galleria

Le attività in sottosuolo hanno previsto la caratterizzazione delle faglie e della fratturazione condotta in miniera, con la successiva rielaborazione dei dati raccolti e la comparazione con quelli ottenuti precedentemente in superficie. Nello specifico l'attività ha previsto:

- analisi strutturale e caratterizzazione petrofisica delle principali zone di faglia, secondo transetti attraverso i piani di faglia principali e secondari;
- analisi della fratturazione al fine di definire i parametri petrofisici necessari per la modellazione statica/dinamica, la valutazione dei volumi disponibili, il contributo della permeabilità secondaria (per fratturazione);
- comparazione con i dati di superficie ottenuti durante il primo anno di lavoro.

Le stazioni di misura hanno consentito inoltre di:

- definire lo stile deformativo dei litotipi in esame;
- determinare la densità di fratturazione;
- valutare la connettività del network di fratture.

Le elaborazioni relative alle attività tecnico scientifiche svolte nell'ambito del presente Task sono riportate nel rapporto RdS/PAR2014/259.

c.3 Monitoraggio geochimico dell'area del bacino del Sulcis

Nell'ambito del presente subtask sono proseguite le attività di ricerca sviluppate nell'ambito dell'accordo di

collaborazione tra Sotacarbo e il CERI - Sapienza Università di Roma che riguardano l'attuazione di un piano di monitoraggio geochimico continuo e discontinuo per lo stoccaggio geologico della CO_2 e la sua sperimentazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis.

Nello studio sono riportati i primi risultati della campagna di prospezione geochimica superficiale effettuata in un'area molto ristretta del bacino del Sulcis, dove è prevista una prova di iniezione di anidride carbonica e che quindi necessita una conoscenza specifica del sito estremamente elevata.

In quest'ottica, nel periodo compreso tra il 4 ed il 15 maggio 2015, è stato effettuato un campionamento di gas del suolo nell'area della piana dell'abitato di Matzaccara (Figura 264). Il numero di campioni prelevato è stato pari a 630. Il campionamento è stato di estremo dettaglio, con un area di indagine di 5,3 km^2 ed un numero di campioni superiore a 100 per km^2 (119 campioni/km^2), con equidistanza media dei campioni intorno a 70 metri.

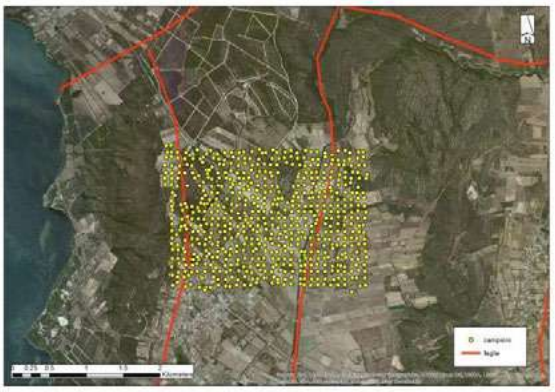


Figura 264. Mappa dei punti campionati - Campagna maggio 2015

Le analisi eseguite sono state le seguenti:

- misure direttamente in campagna durante l'acquisizione dei campioni per CO_2, flusso di CO_2, H_2S, H_2 e CH_4 (con risoluzione minima di 1000 ppmv per il metano, 4000 ppmv per la CO_2 e 1 ppmv per CO_2 flux, H_2S e H);
- misure in laboratorio dei campioni acquisiti in campagna per la determinazione di CO_2, O_2, N_2, He, CH_4, etilene, etano, acetilene e propano (con risoluzioni di 10 ppmv per il metano e 100 ppmv per l'anidride carbonica).

Sono state eseguite le analisi di laboratorio ed è stata realizzata la mappa a classe dei valori di concentrazione realizzata su ArcGis per quanto concerne la CO_2 misurata direttamente in campagna (Figura 265).

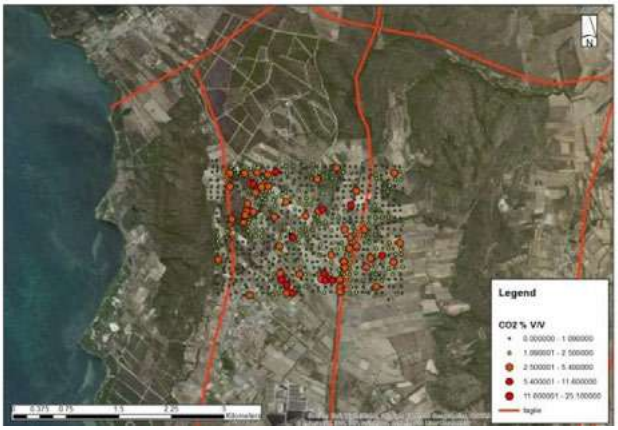


Figura 265. Mappa a classe di valori per la concentrazione di CO_2

Dallo studio è emerso che le anomalie sono, seppur diffuse, correlabili con le strutture principali presenti nell'area, soprattutto per la faglia più ad Ovest dell'area di indagine, mentre la faglia più vicina alla costa sembra essere più "interna".

Le elaborazioni relative alle attività tecnico scientifiche svolte sono contenute nel rapporto RdS/PAR2014/260.

c.4 Studio della sismicità e definizione della baseline dell'area del bacino del Sulcis

L'obiettivo del presente subtask di ricerca è stato lo studio della sismicità di fondo dell'area carbonifera del Sulcis, attraverso la definizione della baseline della sismicità naturale dell'area. Il lavoro è stato svolto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Tale baseline costituirà il principale riferimento per il successivo monitoraggio sismico di dettaglio dell'area oggetto del potenziale sito di stoccaggio, finalizzato a discriminare tra sismicità naturale e quella eventualmente dovuta a cause antropiche/industriali.

Inoltre, lo studio della sismicità di fondo potrebbe fornire indicazioni sulla presenza di faglie attive e contribuire alla loro caratterizzazione. A tal fine è proseguita l'acquisizione di dati sismologici con strumentazione installata

nella zona del Sulcis ed in parte nel graben del Campidano.

Punto di partenza per la definizione della baseline sismica dell'area è stato uno studio preliminare della geologia del bacino, e l'individuazione delle principali unità tettoniche.

È stato quindi eseguito uno studio della sismicità strumentale storica, che ha messo in luce che il settore sud-occidentale della Sardegna è caratterizzato da una bassa sismicità strumentale. Gli eventi sismici registrati negli ultimi 20 anni sono pochi e di lieve entità, localizzati nel Campidano mentre un evento di magnitudo moderata si è verificato nel Golfo di Cagliari.

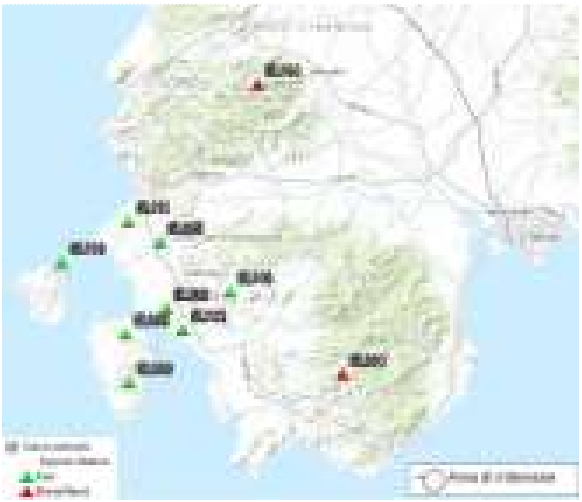


Figura 266. Mappa delle stazioni temporanee installate nell'area del Sulcis

Per la definizione della baseline della sismicità di fondo naturale è stata installata una rete sismica temporanea costituita da 10 stazioni (Figura 266, triangoli in rosso - stazioni munite di sensore BroadBand, triangoli in verde - stazioni equipaggiate con sensori a banda allargata). Le stazioni sono state posizionate in modo tale da essere lontane da fonti di rumore di tipo antropico.

Per ogni stazione è stata calcolata la Power Spectral Density di ognuna delle tre componenti che consente di quantificare in maniera oggettiva il rumore di una stazione sismica, e il rapporto H/V (HVSR) separatamente per le due componenti orizzontali che viene usata per stimare le amplificazioni locali dovute principalmente a condizioni geologiche (Figura 267).

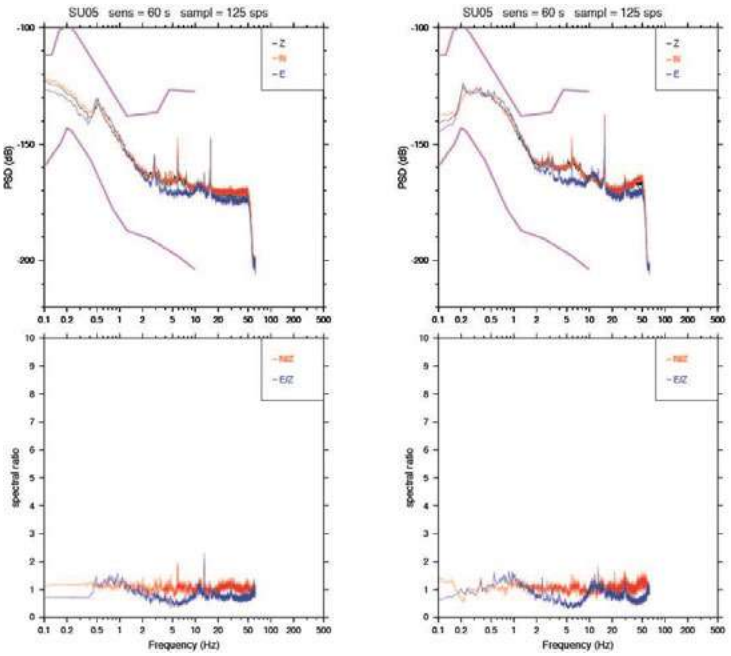


Figura 267. Analisi del rumore sismico alla stazione SU05 di notte (ore 22:00, a sinistra) e di giorno (ore 10:00, a destra). I Pannelli in alto rappresentano la funzione di PSD espressa in decibel. I pannelli in basso rappresentano invece i rapporti tra le componenti orizzontali e la verticale, sia la N/Z (in rosso) e la E/Z (in blu)

Al fine di valutare la sensibilità della rete da rumore sismico ambientale, sulla base delle condizioni di rumore locale di ogni stazione, è stata sviluppata una procedura capace di elaborate contemporaneamente i dati di rumore acquisiti a tutte le stazioni e simulare una serie di sorgenti sismiche in posizione e magnitudo note.

Le attività svolte sono descritte in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2014/261.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Le attività volte nel periodo hanno riguardato:

- la pubblicazione della rivista ONE (Only Natural Energy) online riguardante principalmente le tecnologie Carbon Capture an Storage (CCS);
- l'organizzazione della terza edizione della International Sulcis CCS Summer School, in collaborazione con ENEA, Università di Cagliari, CO2 Geonet e IEA Clean Coal Centre;
- lo svolgimento di attività, in collaborazione con la International Energy Agency Clean Coal Centre (IEA), per l'organizzazione di convegni sulle tematiche legate alle CCS.
- l'avvio del progetto ZoE (Zero Emissioni) per la divulgazione scientifica a favore di scuole e cittadinanza.
- apertura al pubblico del Centro Ricerche Sotacarbo in occasione della manifestazione "Monumenti Aperti".

Dettagli sulle attività relativi alla comunicazione e diffusione dei risultati sono contenti nei rapporti - RdS/PAR2014/262 e RdS/PAR2014/263.

LINEA PROGETTUALE B2 - ATTIVITÀ ENEA

Nella Linea Progettuale B2 vengono proposte ed affrontate tecnologie con un orizzonte applicativo nel breve-medio termine, che vengono studiate e testate su facility di prova di ENEA. Oltre a ciò, e non marginalmente, vengono condotte e descritte le azioni svolte da ENEA, come supporto alle attività di Sotacarbo, descritte nella Linea B1.

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi

L'obiettivo ha visto la prosecuzione delle attività avviate nella precedente annualità, legate allo sviluppo e caratterizzazione sperimentale del processo di gassificazione e dei sistemi di separazione della CO_2 da syngas con solventi. Le attività in campo sono state svolte principalmente presso gli impianti del C.R. Sotacarbo (rif. obiettivo a - Parte B1), mentre attività di supporto per la predisposizione delle prove e l'analisi dei dati sono state condotte presso il C.R. ENEA di Casaccia.

Una task force dedicata all'analisi, implementazione e gestione sperimentale degli impianti e dei sistemi di cattura della CO_2 e rigenerazione dei solventi è stata istituita con la partecipazione di personale ENEA e Sotacarbo. L'attività ha visto la partecipazione del personale ENEA nella predisposizione e verifica delle modifiche attuate in impianto (impianto di gassificazione 5 MW e loop di cattura CO_2 e rigenerazione solventi sull'impianto pilota di scala ridotta), nella definizione e predisposizione delle specifiche di prova, nella fase di sperimentazione e nella fase di elaborazione e analisi dei dati ottenuti.

Sulla base delle esperienze condotte nelle passate annualità presso gli impianti Sotacarbo, ENEA ha collaborato alle attività svolte presso la piattaforma Pilota ed i laboratori Sotacarbo, fornendo personale (in situ e non) che ha operato in prima persona alla predisposizione delle specifiche di prova, alla sperimentazione e all'elaborazione dati.

Come descritto in precedenza è stato ottimizzato il processo di assorbimento della CO_2 e di successiva rigenerazione delle ammine. La campagna sperimentale sul processo di cattura della CO_2 e sul processo di rigenerazione dei solventi con MEA 5 M è servita per effettuare la valutazione del processo di assorbimento e rigenerazione dei solventi con una prima caratterizzazione dell'impianto completo della misura di densimetria dei solventi effettuata tramite le misure on line fornite dai due densimetri installati all'uscita della sezione di assorbimento sul solvente ricco di CO_2 proveniente dal processo di assorbimento e sul solvente proveniente dall'unità di rigenerazione.

A valle delle attività di modifica dell'impianto, e di predisposizione e verifica di tutti i componenti e sistemi dell'Impianto di Gassificazione Dimostrativo da 5MW, sono stati eseguiti due test di gassificazione, della durata di oltre tre giorni ciascuno per un totale di oltre 150 ore, utilizzando carbone colombiano come combustibile. Questi test sperimentali hanno mostrato come il gassificatore sia gestibile anche con carboni con reattività non molto elevata fatto che specie durante il primo test ha implicato una certa limitazione nel raggiungimento del massimo della potenzialità del gassificatore.

Ulteriori sperimentazioni ed approfondimenti futuri sull'impianto sono ritenuti necessari in particolare per la caratterizzazione della produzione di syngas e per le sezioni di clean up, generazione elettrica e allaccio alla rete. Un ulteriore attività sperimentale è stata condotta presso l'impianto pilota (Gassificatore Sotacarbo Pilota di piccola taglia). Sono state testate su questo gassificatore a letto fisso, di tipo up-draft differenti tipologie di

carbone, biomasse (cippato di legno) e loro miscele, analizzando ed elaborando i dati sperimentali ottenuti nel corso dei test. Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/252 redatto in collaborazione con Sotacarbo.

L'obiettivo prevedeva anche attività sperimentali condotte sull'impianto sperimentale GESSYCA (GEneratore di SYngas da CArbone) presso ENEA-Casaccia, previ interventi di modifica dello stesso. A causa della ritardata attivazione del contratto relativo agli interventi di adeguamento, le suddette attività sono state dirottate sull'impianto Pilota di Sotacarbo.

Nell'ambito di queste attività sulla gassificazione, è stato affidato al Dipartimento di Scienze Chimiche (DSCG) della Università di Cagliari un'attività di caratterizzazione del syngas proveniente dalla gassificazione di carbone e biomasse, nonché del tar e delle ceneri.

Questo lavoro è stato dedicato alla messa a punto di una procedura di campionamento e di analisi del syngas, allo scopo di determinarne la composizione relativamente ai macrocostituenti (H_2, CH_4, CO, CO_2, N_2, O_2, H_2O) e ai contaminanti principali, quali H_2S, COS, HCl, HF, NH_3, particolato e Tar. L'individuazione di tale procedura ha richiesto una serie di sopralluoghi al fine di individuare i punti e le modalità di prelievo che potessero garantire la successiva caratterizzazione composizionale del syngas. Sono state individuate due diverse linee di prelievo, una per il campionamento del tar, immediatamente vicina all'uscita gas del gassificatore, riscaldata alla temperatura di 220 °C, e l'altra per la raccolta di campioni finalizzata all'analisi della composizione del syngas relativamente ai macrocostituenti (H_2, CH_4, CO, CO_2, N_2, O_2, H_2O) e contaminanti principali (H_2S, COS, HCl, HF, NH_3). Per maggiori dettagli vedasi il report RdS/PAR2014/268 redatto in collaborazione con i ricercatori dell'Università di Cagliari.

b. Studi e sperimentazioni relative alla produzione di SNG da CO e CO_2

La produzione di SNG (Substitute Natural Gas) da carbone presenta il vantaggio di ottenere un gas che immediatamente si può collocare sul mercato della distribuzione verso gli usi finali. Il processo richiede ancora importanti innovazioni e sviluppi in campo tecnico. Il miglioramento dell'efficienza energetica e la minimizzazione dell'impatto ambientale sono due sfide cruciali. L'obiettivo è quello di migliorare la competitività economica rispetto ai competitor (gas naturale e GPL) e ridurre l'utilizzo di "materie prime" ed energia. Nel contesto italiano lo studio di una possibile applicazione di questo genere avrebbe l'importante e ulteriore ricaduta di un impiego massiccio di carboni nazionali di basso rango e di biomasse.

L'attività è stata sviluppata con test sperimentali, svolti presso il C.R. ENEA Casaccia, su catalizzatori di natura commerciale a base di nichel su scala ridotta su un reattore monotubolare ed ha visto come principale obiettivo la sperimentazione del processo per un suo successivo upgrade.

Lo scopo dell'attività è stato quello di approfondire e studiare le problematiche legate alla reazione di metanazione individuando le condizioni di processo (ovvero pressione, temperatura e velocità spaziali) più idonee. L'insieme delle informazioni elaborate risultano utili alla progettazione ed alla conduzione di attività sperimentali su scala maggiore.

La sintesi del metano avviene secondo le seguenti reazioni:

$$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O \qquad \Delta H=-206\ kJ/mol \qquad (1)$$

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad \Delta H=-165\ kJ/mol \qquad (2)$$

Le reazioni (1) e (2) sono fortemente esotermiche conseguentemente nella pratica industriale si sviluppano su una serie di reattori a letto fisso adiabatici tra i quali sono previsti interstadi di raffreddamento, ricircoli o diluizione del gas entrante, oppure si utilizzano reattori a letto fluidizzato.

Al fine di studiare il processo di metanazione è stato allestito un apparato sperimentale operante in pressione costituito da un sistema di adduzione dei gas di reazione che opportunamente miscelati vengono inviati ad un reattore tubolare a letto fisso (Figura 268). L'apparato sperimentale è dotato di un sistema di analisi in continuo dei gas prodotti ed è equipaggiato con diverse termocoppie utili a monitorare l'andamento delle temperature. Manometri permettono la misura della pressione e delle perdite di carico. I valori di temperatura vengono acquisiti in continuo mediante un datalogger, è così possibile monitorare lo sviluppo del processo controllando eventuali incrementi repentini delle temperature che potrebbero danneggiare il reattore e/o il catalizzatore compromettendo le prestazione del sistema.

E' stata svolta una serie di test sperimentali per valutare le prestazioni di un catalizzatore di natura commerciale a base di nichel supportato su allumina ed individuare condizioni operative tali da massimizzare la resa in CH_4. Sono stati eseguiti differenti test variando la pressione operativa (1-5 bar), la velocità spaziale, il rapporto H_2/CO e la



Figura 268. Alloggiamento del reattore nel forno e utilizzo della termocamera per monitorare le temperature

composizione della miscela. I risultati indicano rese fortemente dipendenti dalla pressione di esercizio e dal rapporto H_2/CO (Figura 269). Confermando che per alti contenuti di H_2 nella miscela reagente la reazione di WGS viene sfavorita.

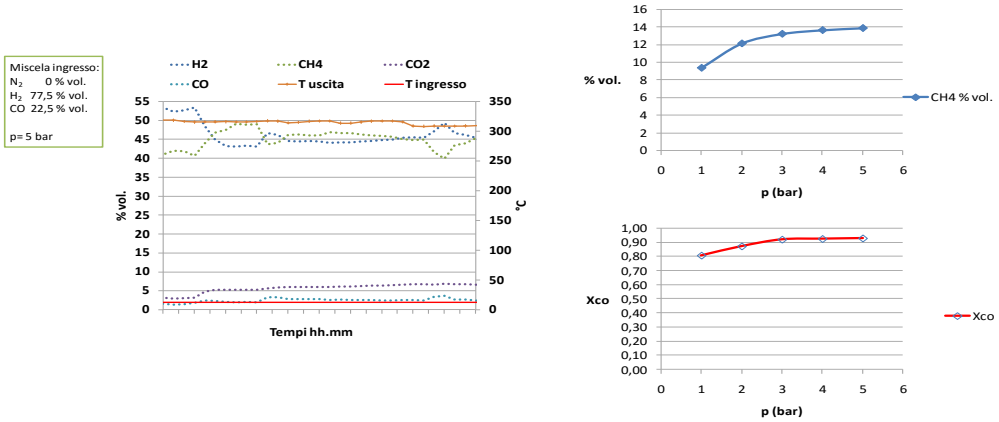


Figura 269. Andamento della composizione dei prodotti per differenti miscele in ingresso al reattore a 5 bar e rese del processo in funzione della pressione

Valori di pressione di 5 bar e temperature nel range di 300-350 °C consentono di ottenere buone rese in metano. A valle dei test sul set up a singolo reattore è stato testato il processo con tre differenti miscele in ingresso a contenuto di metano crescente andando a riprodurre un sistema costituito da tre reattori in serie (Figura 270). Il gas finale ottenuto è caratterizzato da un contenuto in CH_4 oltre l'80%vol. La CO_2 si è mantenuta pressoché costante evidenziando che in presenza di CO la reazione di metanazione favorita è quella legata al CO piuttosto che alla CO_2 che si comporta perlopiù da inerte.

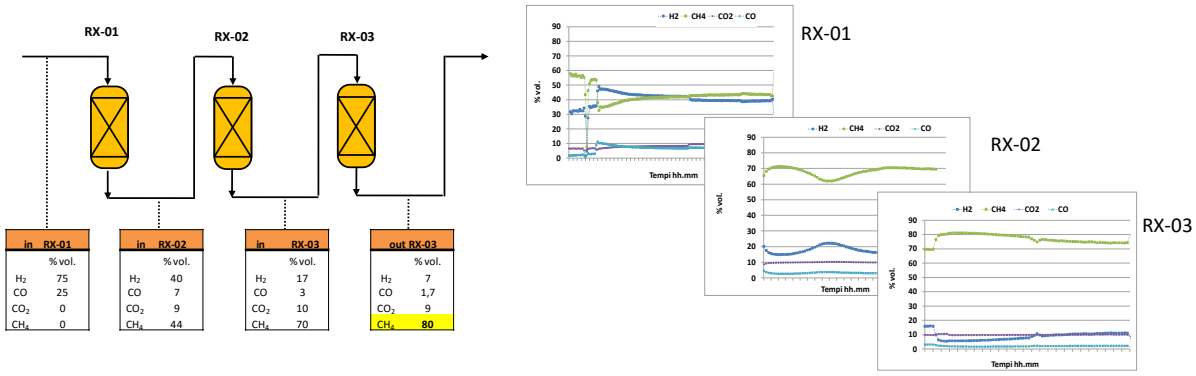


Figura 270. Schema e risultati del processo su tre reattori in serie che si è riprodotto con i test sperimentali

Il prosieguo delle attività prevede la valutazione dell'influenza del vapore nella miscela reagente su scala ridotta, la valutazione delle rese del processo con miscele contenti diverse concentrazioni di CO_2 e idrogeno, test sperimentali su altre tipologie di catalizzatori. L'insieme delle informazioni e competenze acquisite saranno trasferite ed utilizzate per effettuare attività sperimentale su componenti ed impianti di scala maggiore equipaggiati da più reattori multi tubolari in serie (impianto GESSYCA).

I risultati tecnici dell'attività sono descritti nel report RdS/PAR2014/246.

Nell'ambito del presente obiettivo è stato affidato al Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano un'attività di sintesi, caratterizzazione e prova di catalizzatori di tipo strutturato in forma di monolite per la produzione di SNG da carbone.

E' stata inizialmente condotta un'analisi di letteratura dalla quale è emerso che i catalizzatori a base di rutenio sono i più efficienti nella reazione di metanazione da CO_x. Essi sono infatti più attivi rispetto ai catalizzatori a base di nichel, soprattutto a basse temperature (250-350 °C), e maggiormente selettivi a metano. Inoltre, vista la loro maggiore attività intrinseca (TOF, turn over frequency), è possibile impiegare bassi carichi di fase attiva (0,5-5 %p).

Successivamente un catalizzatore commerciale a base di rutenio (0,5%wt Ru/AT R 4871 Dry Reduced), fornito da ENEA, è stato testato in condizioni rappresentative per la reazione di metanazione della CO_2, ovvero 1 barg, 350 °C, H_2/CO_2=4. Il sistema è caratterizzato da un transitorio di attivazione durante il quale la conversione di CO_2 progressivamente incrementa (Figura 271a). Dopo 20 ore il catalizzatore raggiunge condizioni stazionarie con conversione di CO_2 pari al 75% ad una velocità spaziale di 3389 $Ncm^3/h/g_{cat}$. Durante tutto il test del catalizzatore la selettività a metano è rimasta sempre prossima al 99%.

Lo studio delle condizioni operative ha messo in risalto che all'aumentare della temperatura la conversione incrementa, ma il sistema approccia l'equilibrio termodinamico (Figura 271b). Essendo la reazione esotermica il valore di conversione di equilibrio diminuisce al crescere della temperatura. La conversione di CO_2 aumenta anche al diminuire della GHSV e all'aumentare del rapporto H_2/CO_2. L'effetto di temperatura, della GHSV e del rapporto H_2/CO_2 in alimentazione è invece del tutto trascurabile in termini di selettività a metano. In tutte le condizioni investigate abbiamo misurato selettività a metano superiori al 99%.

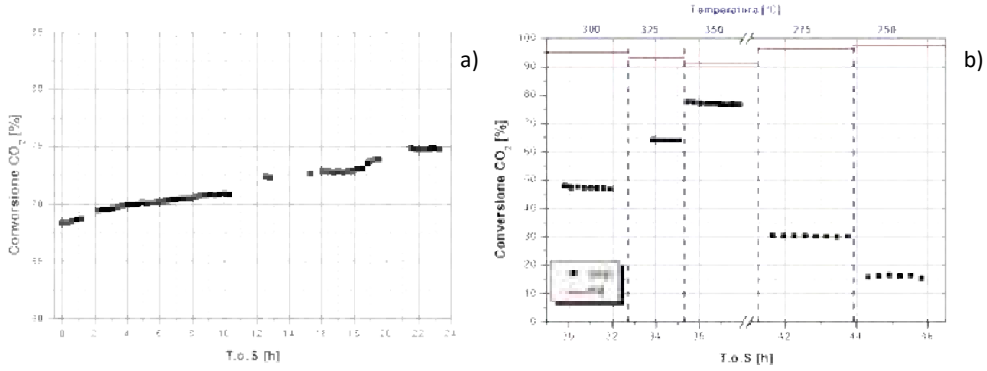


Figura 271. (a) Andamento della conversione di CO_2 durante il transitorio e (b) andamento della conversione di CO_2 al variare della temperatura per il catalizzatore commerciale (P= 1 bar, T = 350 °C, GHSV= 3689 $Ncm^3/h/gcat$, H_2/CO_2= 4)

Presso i laboratori è stato quindi sintetizzato un catalizzatore "hand-made" con un carico di rutenio pari a 0,5 wt%. facendo uso della tecnica di impregnazione detta WET, e impiegando γ-Al2O3 come supporto. Il catalizzatore preparato, denominato Ru-N#POLI è caratterizzato da un'elevata area superficiale (189 m2/g). L'analisi TPR in idrogeno ha mostrato come la riduzione del RuO2 avvenga tra i 190 e i 250 °C (Figura 272a). I testi di attività catalitica, condotti alle medesime condizioni impiegate per il campione commerciale, hanno mostrato come il catalizzatore Ru-N#POLI ha una conversione di CO_2 inizialmente più elevata del catalizzatore commerciale testato nel precedente subtask (75%), ma poi questa decresce lievemente stabilizzandosi ad un 68% dopo circa 40 ore di marcia. Gli andamenti degli effetti delle variabili operative sono qualitativamente gli stessi di quanto osservato per il catalizzatore commerciale.

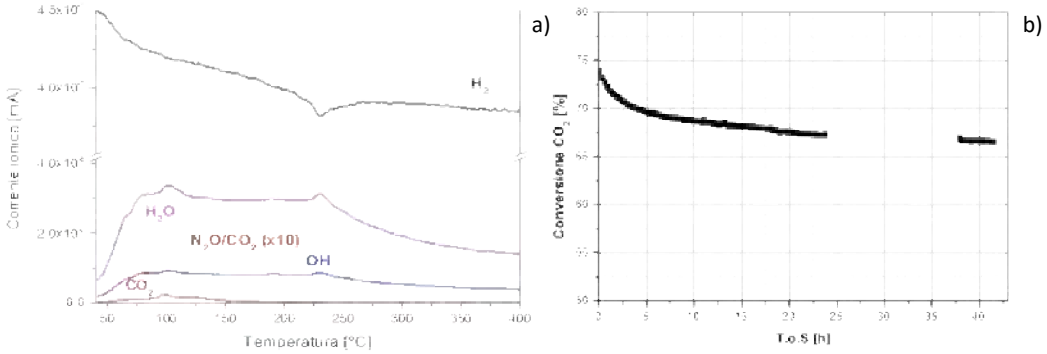


Figura 272. Catalizzatore Ru-N#POLI (a) TPR in H_2; (b) andamento della conversione di CO_2 durante le prime 40 ore di marcia (P= 1 bar, GHSV= 3689 $Ncm^3/h/gcat$, H_2/CO_2= 4)

Infine è stato sviluppato un modello cinetico in grado di descrivere le prestazioni del catalizzatore Ru-N#POLI in termini di conversione di CO_2. A tal fine è stata impiegata la seguente espressione cinetica, ottenuta dalla letteratura.

$$r_{CO_2} = k \exp\left(-E_a/RT\right)\left\{[P_{CO_2}]^n[P_{H_2}]^{4n} - \frac{[P_{CH_4}]^n[P_{H_2O}]^{2n}}{(K_e(T))^n}\right\}$$

In essa compaiono il fattore pre-esponenziale k, l'energia di attivazione Ea, le pressioni parziali di reagenti e prodotti P_i, la costante di equilibrio termodinamico K_e, ed il parametro *n*. Tramite regressione dei dati sperimentali raccolti abbiamo potuto stimare una E_a pari a 80,8 kJ/mol e *n* pari a 0,1386. In Figura 273 si riporta a titolo di esempio un confronto tra i dati sperimentali e le previsioni del modello in termini di effetti di temperatura e GHSV sulla conversione di CO_2. L'errore relativo è sempre inferiore al 2,35%.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/270.

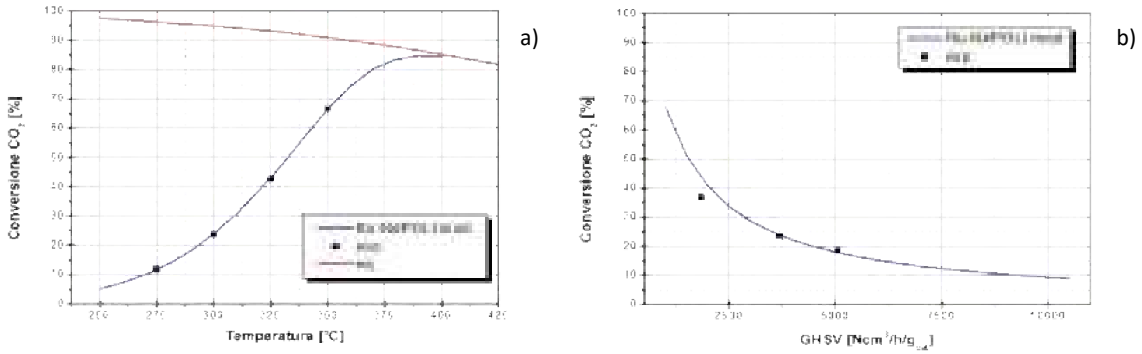


Figura 273. Confronto tra dati sperimentali e dati simulati in termini di effetto di temperatura (a) e GHSV (b) sulla conversione di CO_2

È stata altresì affidata al Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna un'attività di sintesi, caratterizzazione e prova di membrane per la separazione della CO_2 e la purificazione del gas naturale sintetico (SNG).

A conclusione di una ricerca bibliografica sulle proprietà dei vari materiali esistenti, si è deciso di optare per lo studio di poliimidi aromatiche a base fluorurata (PI) e dei materiali ottenuti, a partire da queste, con un processo di trattamento termico sulla membrana solida, le cosiddette membrane termicamente riarrangiate, che chimicamente corrispondono a dei polibenzossazoli (PBO). Le PI di partenza sono di per sé dei materiali molto selettivi ai componenti del SNG, ma hanno modesta permeabilità; il riarrangiamento termico e la trasformazione in PBO consentono di aumentare significativamente la permeabilità, e quindi la produttività del processo, senza sacrificare troppo l'efficacia della separazione. La conversione inoltre conferisce migliore resistenza generale rispetto al materiale poliimidico di partenza.

Dalla letteratura si evince in particolare che i materiali PBO: i) possiedono eccellenti valori di permeabilità e selettività per i componenti del SNG, giacendo al di sopra del limite superiore stabilito per le membrane polimeriche; ii) hanno ottima resistenza termica; iii) sono resistenti all'aggressione chimica, poiché una volta riarrangiate sono insolubili nei solventi; iv) sono ottenibili nella forma di film sottili e fibre cave, e quindi possono essere prodotte su larga scala. Il materiale scelto per il presente lavoro appartiene a questa categoria, è semi commerciale nei suoi componenti costitutivi (monomeri), ed è stato finora oggetto di una caratterizzazione puramente preliminare in letteratura, che però ha mostrato una elevata permeabilità alla CO_2 e ottima selettività CO_2/CH_4.

Le membrane sono state ottenute nella forma di film sottili (circa 50 µm) con una superficie di circa 10 cm^2, e la caratterizzazione è stata condotta sia sul materiale PI di partenza che sul PBO, per valutare la variazione delle proprietà legata al riarrangiamento, e ha consentito di ottenere solubilità e diffusività dei gas componenti il SNG, a varie pressioni fino a 30 bar. Il riarrangiamento induce un discreto aumento della solubilità, e un significativo aumento della diffusività a tutti i gas, per via dell'aumento del volume libero associato alla conversione. Di conseguenza la permeabilità aumenta di quasi due ordini in seguito al riarrangiamento, attestandosi intorno ai 500-700 Barrer per la CO_2.

Si è poi studiato l'effetto dell'umidità sulle prestazioni delle membrane, poiché è noto che questa riduce la permeabilità. Le prove di assorbimento di umidità dirette hanno mostrato che le membrane riarrangiate sono molto meno idrofile delle PI di partenza, e coerentemente si è poi osservato in queste membrane un minore calo della permeabilità a parità di umidità.

E' stato poi quantificato l'invecchiamento fisico, legato alla natura vetrosa delle membrane: si ha un calo di circa il 30% della permeabilità alla CO_2 dopo sei mesi, accompagnato da un aumento di selettività del 20%. Le proprietà comunque, anche a seguito di questo deterioramento rimangono molto competitive; va detto inoltre che le PI di partenza mostrano un calo di permeabilità più elevato, pari al 50%, dopo 6 mesi.

In conclusione, le membrane riarrangiate termicamente da poliimidi aromatiche costituiscono una promettente soluzione per la purificazione del SNG, e sono un materiale maturo per una fase successiva di sperimentazione su impianti di scala maggiore e con miscele reali.

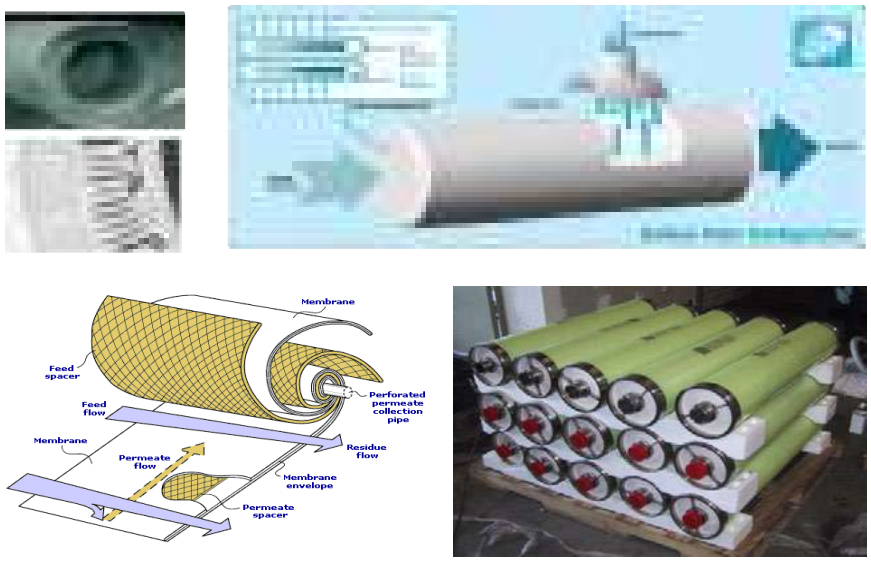


Figura 274. (a) Immagine SEM della sezione di una membrana a fibra cava e schema di un modulo a membrana a fibre cave; (b) Schema di funzionamento di una membrana piana a spirale avvolta e foto di moduli a membrana a spirale avvolta pronti per il montaggio (*Fonte NETL*)

Con una stima di massima è possibile valutare la superficie di membrana richiesta per avere una rimozione di CO_2 del 99% nella corrente di permeato, con fissati valori dei parametri e condizioni operative.

I calcoli sono stati eseguiti con un foglio di calcolo sviluppato dal DICAM che risolve le equazioni di bilancio di materia per i vari componenti che attraversano la membrana. I dati di superficie richiesta vanno utilizzati a scopo puramente indicativo ai fini del confronto membrana poliimidica/membrana riarrangiata piuttosto che come valori idonei ai fini del progetto del processo, in quanto si appoggiano su diverse approssimazioni

Con la membrana mPI invecchiata 6 mesi è necessario una superficie di poco meno di 15 m^2 (molto alta) per avere una purezza di metano prodotto (in un singolo stadio a membrana) del 95%: questo produce una perdita di metano di poco inferiore al 3,5% rispetto a quello presente nella corrente alimentata. Per quanto riguarda la CO_2, essa è rimossa, sempre con la superficie indicata, in quantità pari a circa il 95% di quella alimentata e la sua purezza nel permeato è del 96,5%.

Con la membrana mTR-PBO invecchiata 6 mesi è necessario una superficie di circa 0,18 m^2 (moderata, ma 2 ordini di grandezza inferiore a quella della membrana mPI) per avere una purezza di metano prodotto (in un singolo stadio a membrana) del 95%: questo produce una perdita di metano di circa il 12% rispetto a quello presente nella corrente alimentata, superiore a quello della membrana mPI per una minore selettività. Per quanto riguarda la CO_2, essa è rimossa, sempre con la superficie indicata, in quantità pari a circa il 95% di quella alimentata e la sua purezza nel permeato è del 89%.

Si è visto che il valore che differisce maggiormente, tra una membrana e l'altra, è la superficie richiesta per la separazione, che ovviamente è molto minore nel caso della membrana TR data la sua maggiore permeabilità. Con questa, si ha una perdita superiore di CH_4 nel permeato, e una minore purezza di CO_2, a causa di una minore selettività, ma si tratta di una variazione contenuta. Un'altra considerazione riguarda lo spessore considerato, che è pari a 1 µm: in queste condizioni la membrana va supportata su un substrato microporoso, e le proprietà potrebbero anche avere delle variazioni rispetto a quelle di membrane più spesse, in ragione del diverso protocollo di ottenimento del film.

In conclusione, le membrane riarrangiate termicamente da poliimidi aromatiche fluorurate costituiscono una promettente soluzione per la purificazione del SNG, e sono un materiale maturo per una fase successiva di sperimentazione su impianti di scala maggiore e con miscele reali.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/269.

c. Sviluppo di diagnostica per applicazioni in ossi-combustione: studio di sistemi ottici per la misura dell'ossigeno nei prodotti di combustione in regime MILD Monitoraggio e storage della CO_2

Il principio di funzionamento del sistema di monitoraggio ottico per la misura dell'ossigeno risiede nella possibilità di individuare univocamente la variazione di quest'ultimo all'interno di una miscela di gas quando questa è nello stato di quasi-plasma, ovvero una regione di carica spaziale neutra composta da elettroni, ioni e atomi neutri. In queste condizioni, gli atomi e le molecole si trovano in uno stato eccitato che decade in tempi dell'ordine dei microsecondi, emettendo fotoni a ben determinati valori della lunghezza d'onda caratteristici della specie chimica. Quindi, l'idea è quella di eseguire in tempo reale, l'analisi spettroscopica dei gas residui della combustione immettendoli in una camera da vuoto e innescando un plasma mediante un generatore a radio frequenza. L'osservazione della variazione relativa delle varie linee spettroscopiche delle specie presenti e in particolare quella relativa all'ossigeno atomico (777 nm) permette il monitoraggio in tempo reale della variazione dell'ossigeno molecolare presente nei fumi prodotti dalla combustione.

I risultati che verranno illustrati riguarderanno lo studio spettroscopico di una miscela di CO_2 e O_2 considerando che la variazione dell'intensità della riga spettrale relativa all'ossigeno atomico è influenzata anche dalla dissociazione della CO_2 in CO + O.

Sono stati inoltre effettuati dei test sperimentali in laboratorio per dimensionare e definire le caratteristiche di un prototipo che possa essere utilizzato ex-situ per campagne di misura su impianti sperimentali per lo studio della combustione.

È stata allestita una stazione di prova nella camera pulita (classe 100) dei laboratori ENEA (Figura 275. La stazione è costituita dall'impianto RF Sputtering di cui viene utilizzata la camera da vuoto e il sistema a radio frequenza per la generazione del plasma. Nella regione in cui è visibile il plasma, è affacciata una fibra ottica collegata ad uno spettrometro Ocean Optics, modello Maya 2000 pro che permette di acquisire gli spettri nell'intervallo da 200 a 1100 nm. L'utilizzo di questa tipologia di spettrometri compatti ed economici implica che l'analisi può essere effettuata acquisendo gli spettri limitatamente all'intervallo che va dagli UV (UltraViolet radiation or light) al NIR (Near InfraRed).

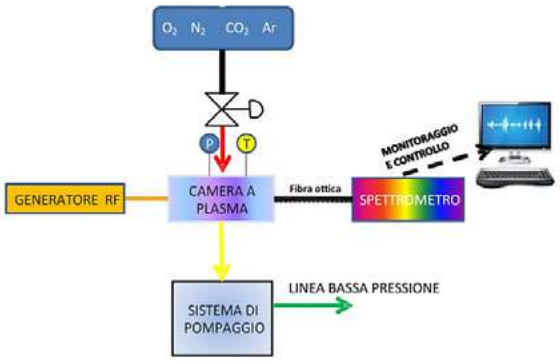


Figura 275. Schema della stazione di prova per il monitoraggio della variazione di O_2 in plasma

La pressione in camera viene regolata mediante una valvola posta all'ingresso della pompa turbo-molecolare la cui funzione è quella di mantenere costante il valore della pressione durante le misure. La miscela di gas viene immessa nella camera da vuoto mediante un sistema che è in grado di controllare i singoli flussi ma non le concentrazioni relative. A tale proposito si è proceduto all'acquisto di un sistema automatico MKS in grado di controllare la pressione assoluta in camera e di regolare il flusso totale mantenendo costante il rapporto relativo dei gas.

Le attività si sono svolte osservando il comportamento spettroscopico di alcuni dei gas che sono presenti nei fumi di combustione. In particolare, le misure spettroscopiche si sono focalizzate sull'O_2 e CO_2 al fine di individuare i parametri critici che influenzano la misura come, la pressione totale (P) in camera, la tensione di "bias" (V_{bias}) tra gli elettrodi, e le righe spettroscopiche più significative per la determinazione dell'andamento nel tempo della concentrazione di O_2 nella miscela.

In presenza del solo ossigeno nel plasma le righe che si possono osservare sono correlate sia alla sua fase atomica (777 nm) e sia a quella molecolare (banda centrata a 760 nm). L'andamento relativo delle due fasi in funzione di V_{bias} e della pressione in camera è mostrato in Figura 276. Come si può osservare dal confronto tra la figura 276a e la 276b, la variazione dell'intensità del picco relativo alla fase O_2 in funzione della pressione in camera, mostra un comportamento opposto rispetto a quello relativo all'ossigeno atomico in Figura 276a. L'intensità emessa dalla transizione tra i livelli molecolari $^3X\Sigma^-_g \rightarrow b^1\Sigma^+_g(v=0)$, aumenta al crescere della pressione dell'ossigeno molecolare, mentre la transizione tra i livelli atomici $3p^5P_3 \rightarrow 3s^5S^o_2$ diventa più intensa al diminuire della pressione dell'ossigeno atomico. Inoltre, come mostrato nella figura 2a, l'intensità della riga a 777 nm ha una marcata dipendenza da V_{bias} contrariamente a quanto osservato per la banda a 760 nm relativa all'ossigeno molecolare. I risultati riportati in Figura 276a suggeriscono quindi di acquisire gli spettri di O a pressioni dell'ordine dei 10^{-2} mbar sia per l'alto valore di intensità del segnale misurato a 777 nm e sia per la ripetibilità della misura dovuta a una buona stabilità del plasma. Viceversa, la molecola di O_2 è molto più facilmente rivelabile a pressioni dell'ordine di 0,1-1 mbar.

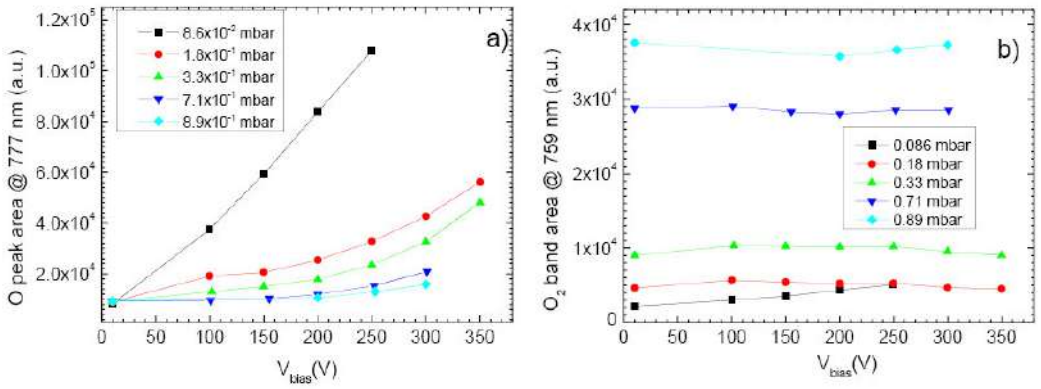


Figura 276. Area del picco dell'ossigeno atomico a 777 nm (a) e della banda dell'ossigeno molecolare centrata a 760nm (b), in funzione della tensione di bias e per differenti valori della pressione

La concentrazione dell'ossigeno molecolare non può essere correlata direttamente al segnale a 760 nm, in quanto nei fumi di combustione potrebbero essere presenti delle specie gassose più luminescenti dell'ossigeno molecolare. Al contrario, l'alta intensità della riga a 777 nm permette di rivelare l'ossigeno anche in presenza di altre molecole.

Poiché la CO_2 è la specie più abbondante nei fumi, è stata eseguita una serie di prove sperimentali in cui si è analizzato lo spettro di emissione della CO_2 pura e quello di miscele di CO_2 e O_2. In tali prove è stato variato il rapporto tra i flussi dei due gas, mantenendo costante sia il flusso totale che la pressione in camera.

Nei plasmi in cui vi è una miscela di CO_2 e O_2, l'emissione a 777 nm non è direttamente collegata alla sola concentrazione di O_2 in quanto a tale riga contribuisce anche l'ossigeno atomico prodotto dalla dissociazione di CO_2 in CO e O. Nella Figura 277 è riportato lo spettro nel caso in cui l'emissione fosse dovuta al flusso di CO_2 pura alla pressione di 0,035 mbar. (curva blu). E' evidenziato in

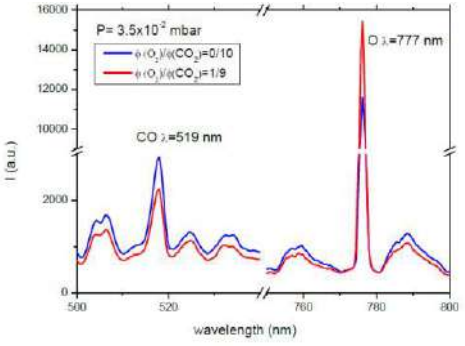


Figura 277. Spettri di emissione della CO_2 pura e della miscela di CO_2 e O_2

particolare il picco a 519 nm che appartiene alla serie Angstrom della molecola CO associata alla transizione $(B^1\Sigma^+(v=0) \rightarrow A^1\Pi(v=2)$. La dissociazione della CO_2 è confermata dalla presenza del picco a 777 nm.

Nella stessa figura è riportato lo spettro (curva rossa) di una miscela di CO_2 e O_2. La presenza di molecole di O_2 nella miscela ha determinato una diminuzione dell'altezza del picco associato alla CO e un contemporaneo aumento del picco dell'ossigeno atomico. Questo andamento per varie miscele è riassunto nella Figura 278a dove si osserva che all'aumentare della concentrazione di O_2 il segnale integrato del picco a 777 nm aumenta. Correlando l'andamento dei picchi a 777 nm e 519 nm, è possibile discriminare la variazione della concentrazione di O_2 nella miscela monitorando il rapporto delle intensità dei due picchi (Figura 278b).

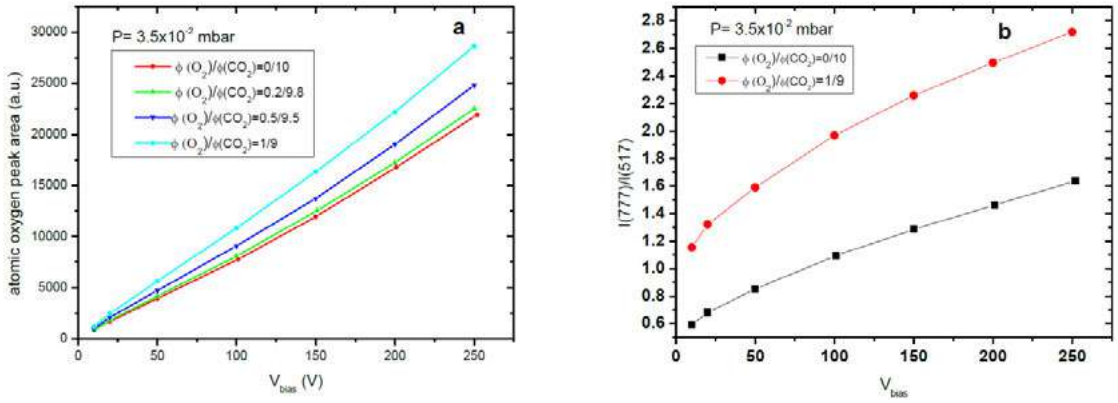


Figura 278. a) Integrale dell'area sottesa al picco a 777 nm in funzione di V_{bias} per miscele di CO_2/O_2; b) Rapporto tra le aree sottese dai picchi misurati a 777 e 519 nm in funzione di V_{bias} per CO_2 pura e per una miscela di CO_2 e O_2 al 10%

Progettazione di massima dello strumento per campagne di misura

Dai risultati illustrati sopra e dall'analisi dei parametri di funzionamento della stazione di prova RF-LS500, si è arrivati alla definizione delle caratteristiche che dovrà avere la versione compatta dello strumento per la diagnostica dei gas di post-combustione. I disegni in Figura 279 mostrano lo strumento che verrà realizzato nei prossimi mesi e che sarà in grado di essere trasportato ed installato in impianti sperimentali per i test preliminari.

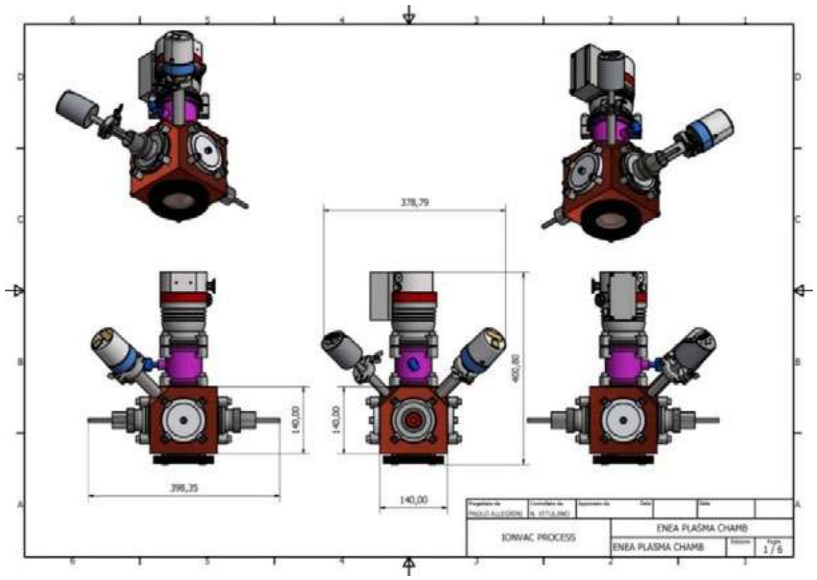


Figura 279. Disegni dello strumento per l'analisi spettrale dei gas di combustione

Il sistema è composto essenzialmente da una camera cubica di 140 mm di lato, in cui viene praticato il vuoto mediante un sistema di pompaggio composto da una turbomolecolare ed una rotativa. Il gas da analizzare viene immesso nella camera mediante un sistema in grado di controllare e mantenere costante la pressione assoluta e, nel caso di miscele, controllare i flussi dei singoli gas e le loro percentuali relative. La finestra di osservazione del

plasma è posta su una delle facce del cubo in modo tale da consentire una osservazione completa della regione in cui è confinato il plasma. La generazione del plasma avverrà grazie a un generatore a Radio Frequenza (potenza massima 300 W) che verrà confinato con l'inserimento di magneti permanenti in posizione trasversale al plasma e dei quali sarà possibile variare la posizione rispetto al plasma stesso. L'ottimizzazione del confinamento magnetico sarà necessaria per massimizzare la brillanza ed evitare fenomeni di contaminazione dovuta all'erosione delle pareti per il fenomeno dello "sputtering" da bombardamento ionico.

È stata misurata l'emissione delle linee spettroscopiche associate all'ossigeno considerando pressioni diverse e miscele di gas controllate che fossero in parte rappresentative dei gas emessi dal combustore. Tali prove sperimentali hanno verificato che in miscele di gas in cui vi sia il biossido di carbonio e O_2, l'emissione dell'ossigeno atomico può ancora essere rivelata e correlata alla variazione della concentrazione di O_2 nella miscela. L'insieme delle prove di laboratorio effettuate hanno concorso a definire il progetto del prototipo che s'intende utilizzare per effettuare test su impianti a combustione sperimentali.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/247.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Al fine di valorizzare i risultati dell'attività svolta nell'intero progetto, Parte A e Parte B, una particolare attenzione è stata rivolta agli aspetti di comunicazione e diffusione dei risultati, in diversi ambiti, forme e con l'organizzazione di iniziative di particolare rilievo. Questa azione si è articolata attraverso:

- la pubblicazione di articoli e documenti tecnici a carattere pubblico;
- l'organizzazione di workshop, seminari, convegni;
- l'aggiornamento di brochure di impianti.

Tra le varie, due iniziative spiccano in particolare: l'organizzazione della "Sulcis Summer School on CCS Technologies" e quella di un workshop dal titolo "Cattura e sequestro della CO_2 prodotta da combustibili fossili", volto alla diffusione dei risultati del Programma della "Ricerca per il Sistema Elettrico Nazionale" sul tema delle tecnologie CCUS.

Sulcis Summer School on CCS Technologies

La Scuola Estiva sulle Tecnologie di Cattura e Stoccaggio della CO_2 è giunta alla sua terza edizione. L'evento, che si è tenuto presso il Centro Ricerche Sotacarbo - Carbonia nel mese di Luglio 2015, è stato organizzato congiuntamente, e in stretta collaborazione, da ENEA, Sotacarbo e Università di Cagliari nell'ambito delle attività del Polo Tecnologico Carbone Pulito. Con questa iniziativa gli organizzatori hanno inteso consolidare un evento di valenza internazionale, che si propone come sede stabile di approfondimento e aggiornamento sugli argomenti e le problematiche relative alle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO_2 . L'iniziativa si è rivolta a studenti universitari della laurea magistrale e del dottorato di ricerca provenienti da diversi percorsi formativi, oltre che a operatori ed esperti di impiantistica energetica, al fine di promuovere la loro partecipazione attiva in questo settore.

Workshop "Cattura e sequestro della CO_2 prodotta da combustibili fossili"

In data 24 Giugno 2015, presso la Sede ENEA di Roma, è stato organizzato, nell'ambito del iniziative per la diffusione dei risultati del Programma sulla Ricerca e Sviluppo di interesse generale per il Sistema Elettrico Nazionale Ricerca, un workshop dal titolo **"**Cattura e sequestro della CO_2 prodotta da combustibili fossili".

All'evento hanno preso parte oltre 90 partecipanti, tra ricercatori ed operatori del settore. Tutti gli interventi sono stati volti a porre l'attenzione, non solo sui risultati più significativi delle attività di ricerca, ma anche e soprattutto sulle linee di sviluppo rispetto alle quali il Programma si è andato orientando ed evolvendo nell'ultimo anno. La giornata è stata conclusa da una tavola rotonda a cui hanno preso parte rappresentati del mondo industriale.

Parallelamente alle iniziative citate, ed alla reportistica di progetto, ENEA ha prodotto, spesso in collaborazione con i propri partner universitari o con Sotacarbo, memorie presentate ad altrettanti Meeting nazionali e non, pubblicazioni su riviste scientifiche e un libro[11].

Le attività relative al presente obiettivo sono descritte nel Report RdS/PAR2014/271.

[11] E. Giulietti, *"Combustion instabilities in Gas Turbine: A new methodology for combustion monitoring"* LAP LAMBERT Academic Publishing (agosto 2015), ISBN-10: 3659748323, ISBN-13: 978-3659748325

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito delle **attività afferenti alla Parte A**, sono stati stipulati da ENEA Accordi di Collaborazione con i seguenti partner universitari:

Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia

Accordo di Collaborazione sul tema: Studio sperimentale e modellistico sull'utilizzo di membrane a trasporto ionico, per la produzione di O_2 durante il processo di gassificazione del carbone in situ
Il gruppo dell'Università de L'Aquila, ha collaborato allo studio e progettazione dei principali componenti della Piattaforma Zecomix (gassificatore, carbonatatore), nonché nello sviluppo di sorbenti solidi per cattura di CO_2
Oltre a ciò, vanta competenze internazionalmente riconosciute, è partner o coordinatore di numerosi progetti europei (due con partecipazione anche di ENEA), pertanto vanta competenze assolutamente congruenti con i temi della collaborazione.

Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria

Accordo di Collaborazione sul tema: Analisi aeroacustica del comportamento "a freddo" (studio della fluidodinamica non reattiva) e "a caldo" (studio della fluidodinamica in combustione), condotta con trasduttori di pressione e diagnostica ottica originale, di un bruciatore sperimentale di tipo "slot-burner" ("ROMULUS"), realizzato per sperimentare la combustione con forti ricircoli di CO_2 (condizioni di combustione EGR). Trattamento dei segnali con tecniche "wavelet". Realizzazione del piccolo bruciatore
Partecipazione alla progettazione di un nuovo bruciatore per turbogas, caratterizzato da ampia flessibilità di carico, basato su una strategia di combustione TVC (Trapped Vortex Combustor).
Il gruppo dell'Università di Roma TRE, collabora da tempo con ENEA in merito allo sviluppo di bruciatori Trapped Vortex, e vanta competenze di altissimo livello nell'analisi aeroacustica di componenti in combustione e nel trattamento dei segnali con tecniche "wavelet".

Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale

Accordo di Collaborazione sul tema: Implementazione nel codice HeaRT di modelli il calcolo delle proprietà termodinamiche e di trasporto di fluidi ad alta pressione, in condizioni supercritiche. Validazione degli stessi con test case relativi a miscele a più componenti.
Il gruppo dell'Università di Roma, ha partecipato allo sviluppo dei modelli del codice ENEA-HeaRT e pertanto vanta competenze di primissimo rilievo, utili per la messa a punto del codice e il suo upgrade.

E' stato inoltre stipulato un contratto di ricerca.

Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile

Il gruppo dell'Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile, vanta specifiche e riconosciute competenze nelle tecnologie di valorizzazione delle scorie di provenienza siderurgica, nelle loro passivizzazione e nel loro riuso in campo civile. ENEA nell'ambito delle attività afferenti alla Parte A ha stipulato con l'Università di Tor Vergata un Contratto di Ricerca che ha avuto per oggetto:

- la caratterizzazione di scorie d'altoforno e studio di processi di agglomerazione dei residui attraverso processi a umido
- la caratterizzazione delle rese del processo di carbonatazione-granulazione, con riferimento a test sperimentali condotti su test-rig VALCHIRIA.

Nell'ambito delle **attività afferenti alla Parte B1**, Sotacarbo ha stipulato contratti con i seguenti partner.

Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali (DIMCM)

L'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali (DIMCM) dell'Università di Cagliari verte sui temi della modellazione e simulazione dei processi di gassificazione a letto fisso e dei successivi sistemi di trattamento del syngas e di cattura della CO_2 , nonché sulla modellazione e il controllo di un impianto di tipologia CCS Post-Combustione dimensionato per trattare la portata di fumi uscente da una centrale di potenza USC di taglia 250 MWe.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Cagliari, vanta una consolidata esperienza nel settore della simulazione di processi industriali complessi, testimoniata con riferimento al tema CCS anche in precedenti collaborazioni con ENEA.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "A.Natta"

Il Dipartimento CMIC del Politecnico di Milano vanta una competenza internazionalmente riconosciuta sui temi della cinetica chimica e della sua modellazione. Il Politecnico ha svolto attività che hanno riguardato la modellazione cinetica della pirolisi e ossido-riduzione dei gas di coda provenienti dalla rigenerazione dei solventi utilizzati per la desolforazione (costituiti principalmente da H_2S, CO_2, COS…) per la produzione di gas di sintesi, e la relativa attività di convalida sperimentale su impianto da laboratorio realizzato presso il Centro Ricerche Sotacarbo.

Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Architettura (DICAAR)

il gruppo di ricerca dell'Università di Cagliari vanta una pluriennale esperienza nel settore dello studio e della caratterizzazione di slurry. L'Università ha svolto studi sperimentali di caratterizzazione delle miscele di acqua e carbone (coal slurries) ottenute attraverso macinazione ad umido, utilizzando tecnologie innovative, basate sull'uso di getti d'acqua ad alta pressione in combinazione con l'energia meccanica.

Carbosulcis S.p.A.

Carbosulcis ha effettuato attività di supporto all'analisi delle informazioni pregresse volte alla caratterizzazione geologica del bacino carbonifero del Sulcis..

La società svolto nel corso degli ultimi 10 anni attività' di studio e caratterizzazione del bacino carbonifero, realizzando anche pozzi profondi che hanno permesso di ottenere carote fino a quote di -800 m.

Università Di Roma Sapienza, Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici (CERI)

Il CERI ha condotto uno studio riguardante il rilievo geostrutturale, in galleria, dell'area del bacino carbonifero del Sulcis ed effettuato il monitoraggio e caratterizzazione geochimica dell'area del bacino carbonifero del Sulcis.
Il gruppo è leader nel settore del monotoraggio geo-chimico e geo-strutturale. Le competenze di eccellenza sono testimoniate dalle innumerevoli partecipazioni a progetti di ricerca internazionali. Vengono condotte nuove indagini geo-strutturali nel Bacino Sulcis

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Le attività oggetto della collaborazione hanno riguardato lo studio della sismicità naturale dell'area del bacino del Sulcis e l'acquisizione di competenze e conoscenze in merito al monitoraggio accurato di piccoli micro-sismi generati dalla iniezione della CO_2.
E' essenziale, ai fini della sicurezza e della accettabilità' sociale, effettuare un monitoraggio accurato di possibili micro-sismi generati dalla iniezione della CO_2. In questo campo INGV e' leader indiscusso, avendo svolto attività' - di studio, monitoraggio ed analisi dei dati - in relazione ai processi di stoccaggio di gas naturale in Italia.

Nell'ambito delle **attività afferenti alla Parte B2**, ENEA ha attivati contratti di ricerca con i seguenti partner universitari.

Università di Cagliari, Dipartimento di Scienze Chimiche (DSCG)

Viene affidata all'Università di Cagliari un'attività di ricerca in merito alla ccaratterizzazione composizionale del syngas proveniente dalla gassificazione di carbone e biomasse.
Il gruppo dell'Università di Cagliari vanta un'esperienza pluridecennale nel campo della Chimica Industriale e di Laboratorio. L'attività scientifica è indirizzata allo studio ed alla caratterizzazione di solidi e liquidi per applicazioni in diversi campi: catalisi, adsorbimento, magnetismo. Il gruppo ha competenze che vanno dalla analisi, alla caratterizzazione e alla sintesi di materiali fino al testing delle loro prestazioni in applicazioni di potenziale interesse industriale. I campi di applicazione vanno dai processi di purificazione di syngas all'impiego di materie prime rinnovabili per l'ottenimento di combustibili e chemical commodity.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia (DIE)

Al DIE del Politecnico di Milano è stata affidata un'attività di ricerca relativa alla sintesi, caratterizzazione e prova di catalizzatori di tipo strutturato in forma di monolite per la produzione di Synthetic Natural Gas da carbone.
Il gruppo di ricerca è leader nel settore della sintesi di catalizzatori di tipo strutturato in forma di monolite.

Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM)

Al DICAM dell'Università di Bologna è stata affidata un'attività di ricerca relativa alla sintesi, caratterizzazione e prova di membrane per la separazione della CO_2 e la purificazione del Synthetic Natural Gas.
Il gruppo ha esperienza nella sintesi e caratterizzazione di membrane per la separazione di gas, caratterizzate da area superficiale per unità di volume molto elevata, modesto ingombro della sezione per la rimozione della CO_2 e costi di esercizio limitati. Specialisti in materiali polimerici, perfluorinati e membrane al palladio.

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per i nucleare di IV generazione

Il programma triennale 2012-2014, modulato sulle esigenze del Paese a seguito dell'incidente di Fukushima e del successivo referendum, prevede attività di R&S incentrate su due macro aree:

- presidio e sviluppo di un sistema di competenze scientifiche in grado di assicurare la corretta gestione delle residue attività nucleari, in particolare sotto il profilo della sicurezza;
- ricerca e sviluppo tecnologico, con ricadute sul tessuto industriale, relative alla fissione di IV generazione.

Il problema della sicurezza nucleare coinvolge tutti i Paesi, prescindendo dall'esistenza di centrali elettronucleari in esercizio, a maggior ragione se entro il limite di 200 km dai confini nazionali. La Commissione Europea ha stabilito che ciascuna nazione debba effettuare una valutazione indipendente dello stato di sicurezza di questi reattori. E' perciò necessario conservare e rafforzare le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca nel settore nucleare, sviluppando in particolare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche dal punto di vista della sicurezza e della sostenibilità.

Rimane chiaro che a seguito del referendum abrogativo riguardante la costruzione e l'esercizio di nuove centrali elettronucleari, si è determinata la necessità di abbandonare le attività di ricerca per lo sviluppo di reattori nucleari fino alla generazione III+. I temi di ricerca riguardano dunque esclusivamente i reattori nucleari di IV generazione in quanto ad elevata sicurezza ed affidabilità e con massimo utilizzo del potenziale energetico del combustibile e controllata gestione dei rifiuti radioattivi.

In particolare le attività sono focalizzate allo sviluppo e implementazione dei sistemi nucleari veloci refrigerati a piombo, Lead cooled Fast Reactor (LFR) e Small Modular Reactor (SMR), su cui l'Italia detiene una posizione di leadership progettuale e tecnologica in Europa, attività che sono inquadrate nelle iniziative internazionali (GIF) ed europee (SNETP, ESNII, EERA) alle quali il nostro Paese ha aderito.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Per la terza annualità del PT 2012-2014, si prevedeva di rendere disponibili, in continuità con il PAR 2013, una serie di prodotti così costituiti:

a) attrezzature, laboratori e prove sperimentali, modelli, programmi e piattaforme di calcolo validati per la progettazione nucleare e le verifiche di sicurezza e sostenibilità del nucleare da fissione;
b) analisi di sistema e di sicurezza di sistemi nucleari e relativi cicli del combustibile;
c) progettazioni e qualifiche di componenti e sistemi per impianti nucleari di quarta generazione;
d) sviluppo di materiali per sistemi nucleari innovativi.

Il progetto si poneva come macro obiettivi lo sviluppo di competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e l'implementazione di collaborazioni internazionali per il nucleare di IV generazione.

Nel contesto dello sviluppo di competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare (Linea Progettuale 1) si è quindi provveduto a mettere a punto metodi e modelli fisico-matematici per la stima e la caratterizzazione dei rilasci e della dispersione di radionuclidi a seguito di sequenze incidentali severe, sviluppare e validare piattaforme di calcolo avanzate per l'analisi neutronica, termo-idraulica e incidentale, procedere alla riduzione delle incertezze associate ai codici di calcolo, sviluppare e qualificare librerie per schermaggio e dosimetria. Si è proseguito il lavoro di sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o pre-emergenza, realizzando studi probabilistici (PSA) e deterministici (DSA) per la stima del rischio da eventi iniziatori esterni (tipo sisma seguito da tsunami), le verifiche di sicurezza e l'analisi di sequenze incidentali. Nell'ambito della qualifica e caratterizzazione sperimentale di componenti critici e strumentazione prototipica, presso le facility sperimentali della SIET si sono realizzate campagne sperimentali per la qualifica di strumentazione innovativa, e per la validazione di modellistica e codicistica. Si è anche proceduto alla preparazione di prove per testare le prestazioni dei tubi a baionetta nel caso dell'acqua.

Relativamente alla implementazione di collaborazioni internazionali per il nucleare di IV generazione (Linea Progettuale 2), il progetto si è incentrato sulla filiera dei reattori veloci refrigerati a piombo - Lead Cooled Fast Reactor - e sui sistemi Small Modular Reactor veloci che riscuotono particolare interesse in Europa e da parte dell'industria nazionale.

Le principali attività di ricerca e sviluppo hanno riguardato lo sviluppo e validazione di codici di calcolo per l'analisi termo-fluidodinamica la progettazione di dettaglio del nocciolo, la progettazione del sistema primario e dei sistemi di rimozione del calore (SG, DHR, RVACS), lo sviluppo di strumentazione e sistemi di controllo a supporto del progetto. Si è inoltre provveduto ad avviare, e in parte completare, la caratterizzazione di acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo, di particolare rilevanza per lo sviluppo della tecnologia degli LFR. Si è implementato ed esercito un laboratorio per la chimica del refrigerante, avviando studi e analisi sui fenomeni base del controllo dell'ossigeno disciolto in metallo liquido.

Infine si sono implementate infrastrutture di ricerca di enorme rilevanza (HELENA), e aggiornate le infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE, LECOR, LIFUS5), con lo scopo sia di caratterizzare lo scambio termico nel nocciolo, sia di caratterizzare sperimentalmente i sistemi di trasporto termico (DHR, SG).

Nell'ambito del progetto ENEA si è quindi dotata delle necessarie infrastrutture, e delle competenze scientifiche e tecnologiche richieste per affrontare in piena autonomia lo sviluppo tecnologico di un sistema nucleare veloce refrigerato a piombo che sia di riferimento internazionale per la filiera LFR-Gen IV.

Si è inoltre inserito nel contesto Gen-IV LFR e SMR il reattore veloce TAPIRO, quale strumento per il supporto alla progettazione neutronica di un sistema LFR o SMR a piombo.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

LINEA PROGETTUALE 1. Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Occorre ricordare che il motivo principale per cui è necessario proseguire con attività di ricerca legate alla sicurezza degli impianti nucleari ed alla stima dei punti di forza e di debolezza dei vari sistemi e componenti critici, è che l'Italia, come Paese Occidentale tecnologicamente sviluppato e allineato agli standard degli altri paesi occidentali, non può essere dipendente da volontà e interessi stranieri nel caso di una emergenza nucleare. L'Italia ha l'obbligo di mantenere vive le conoscenze scientifiche nel campo della fissione nucleare, dando priorità assoluta al mantenimento delle conoscenze nel settore della sicurezza di funzionamento dei sistemi di GEN-II e concentrando i propri sforzi nella ricerca e nella cooperazione internazionale per l'impiego sicuro, anche oltre i suoi confini geografici, del nucleare attuale (GEN-II e GEN-III) e di prossima generazione (GEN-III e GEN-IV).

Come accennato in precedenza, il problema della sicurezza nucleare coinvolge tutti i Paesi, a prescindere dall'esistenza nel proprio territorio di centrali elettronucleari in esercizio. Un certo numero di studi e simulazioni è stato svolto proprio in virtù del fatto che un cospicuo numero di centrali nucleari è presente in vicinanza dei confini nazionali, come si vedrà dalla descrizione delle attività svolte nei vari obiettivi, entro un limite di 200 km di raggio (Figura 280). Permane quindi l'esigenza di conservare, nel nostro Paese, un sistema di competenze scientifiche e di infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca in grado di assicurare la corretta valutazione delle possibili emergenze, creando preventivamente un database di informazioni e ranking sui rischi e sull'impatto che possibili incidenti gravi possono avere sul nostro territorio. Per questo motivo diventa importante concretizzare, valorizzandolo ulteriormente, il percorso di ricerca tracciato nell'arco di questi tre anni di studi. Questo percorso, che troverà una serie di rilevanti indicazioni in termini di quantificazione delle conseguenze derivanti da eventi incidentali in centrali prossime ai confini nazionali, è naturalmente alimentato dalle conoscenze acquisite dai ricercatori con riferimento più generale ai vari sistemi nucleari attualmente funzionanti in Europa, non necessariamente solo con riferimento a quelli localizzati entro i 200 km. E' unanimemente riconosciuto, a livello scientifico internazionale, che spesso, per trarre conclusioni e indicazioni significative su sistemi di una certa taglia e configurazione, sia inizialmente necessario fare ricorso a sistemi analoghi, sebbene non vicini, da cui poi elaborare dati e caratteristiche, anche attraverso processi di scaling.

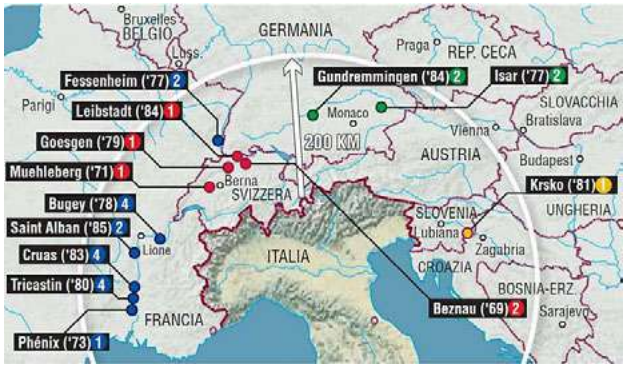


Figura 280. Centrali nucleari presenti entro il limite di 200 km dai confini italiani

Non va infine trascurato il fatto che le ricerche svolte nel quadro della Ricerca di Sistema sono state e saranno molto utili per partecipare, con competenza, ad iniziative e piattaforme Europee come SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) ed ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) per la definizione di una strategia europea sulla produzione economica, sicura e sostenibile dell'energia nucleare. Una tale acquisita capacità ha permesso all'ENEA di essere presente in diversi progetti europei del VII Framework Program EURATOM e ora di Horizon-2020, indirizzati allo sviluppo/validazione di strumenti e metodi innovativi per l'analisi di sicurezza degli impianti nucleari.

Le attività condotte dai ricercatori ENEA in questi progetti fanno riferimento primario agli studi svolti nel quadro del PT 2012-2014 e ad esperienze acquisite nell'ambito di accordi internazionali di collaborazione con vari enti e università e ad accordi bilaterali, in particolare stipulati con le organizzazioni francesi CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ed IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), ma sono arricchite anche dalle attività condotte nell'ambito di accordi di cooperazione internazionale con la US-NRC (United States Nuclear Regulatory Commission), in cui convergono gli interessi di organizzazioni dei vari continenti, impegnate nella ricerca e lo sviluppo della safety nel campo della fissione nucleare.

Grazie alle attività svolte nelle precedenti annualità e sfruttando il background internazionale acquisito, è stato possibile accrescere ulteriormente le conoscenze di base e arricchire l'esperienza precedentemente maturata. Con l'applicazione e la maturazione della ricerca è stato possibile acquisire importanti nozioni sull'uso degli strumenti di calcolo, delle metodologie e delle tecnologie più avanzate in grado di favorire proprio la cercata indipendenza di giudizio in ambito sicurezza, sostenibilità e affidabilità delle concezioni innovative oltre che delle installazioni nucleari attuali.

Le attività di mantenimento e sviluppo competenze nel campo della sicurezza nucleare, condotte in questa terza annualità della linea progettuale 1, hanno avuto come obiettivi:

- acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro utilizzo;
- sviluppo di metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari tenendo conto dell'evento di Fukushima Dai-ichi e dei risultati emersi dagli stress test europei;
- realizzazione di attività sperimentali e studi a supporto della qualifica di sistemi, strumentazione e componenti innovativi e alla validazione di modelli per analisi incidentale di reattori attuali e innovativi.

Le attività del progetto si sono articolate nei seguenti obiettivi:

a. Studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità
b. Valutazione degli incidenti e delle loro conseguenze
c. Sperimentazione e calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza
d. Comunicazione e diffusione dei risultati.

a. Studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità

L'obiettivo prevede l'acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro corretto utilizzo. Questi strumenti, in gran parte oggetto di accordi di collaborazione con gli enti francesi CEA e IRSN e americano USNRC, rappresentano un valido aiuto allo svolgimento delle diverse tematiche relative alla modellistica di base per la realizzazione di librerie di dati nucleari, studi di modelli per il calcolo di sezioni d'urto, aggiornamento di librerie di decadimento per il calcolo dell'attivazione dei materiali sottoposti ad irraggiamento neutronico, codici di neutronica deterministici e Monte Carlo per l'analisi neutronica del reattore. Sono proseguite le attività legate alla security e alla sostenibilità del ciclo del combustibile nucleare, e sono stati approfonditi i metodi per la valutazione degli impianti nucleari sotto l'aspetto della resistenza alla proliferazione nucleare e tecnico-economici di interfaccia safety-security.

a.1 Produzione e validazione di librerie di dati nucleari dedicate ad analisi di schermaggio, danno da radiazione ed attivazione

Generazione e validazione della libreria di sezioni d'urto multi-gruppo accoppiata n/γ VITJEFF32.BOLIB per applicazioni di schermaggio e danno da radiazione in reattori nucleari a fissione

E' stata prodotta e validata una nuova libreria di sezioni d'urto a gruppi accoppiate neutroniche (n) e fotoniche (γ) per applicazioni di fissione nucleare, basata sulla più recente libreria di dati nucleari valutati JEFF-3.2, prodotta da OECD-NEADB e rilasciata nel marzo 2014. Il nome assegnato a tale libreria multi-purpose processata a gruppi energetici fini (199 gruppi neutronici + 42 gruppi fotonici) è VITJEFF32.BOLIB e il formato dei dati prescelto è lo stesso formato AMPX della analoga libreria americana VITAMIN-B7 rilasciata da ORNL nel 2011, basata sulla

libreria americana di dati nucleari valutati ENDF/B-VII.0.

Diversamente da VITAMIN-B7, processata col sistema modulare di processamento dati nucleari AMPX-6.1 non ancora liberamente rilasciato da ORNL, VITJEFF32.BOLIB è stata generata con il sistema di processamento dati nucleari NJOY-2012.53, al momento la più recente versione del sistema NJOY, rilasciata da LANL. VITJEFF32.BOLIB è una libreria pseudo-problem-independent basata sul metodo Bondarenko per il trattamento dell'autoschermo delle risonanze neutroniche e degli effetti di temperatura. Tale metodo prevede di generare ed utilizzare in particolare i fattori di autoschermo f (T,σ_0), funzioni di temperatura (T) e sezione d'urto di background (σ_0). La conversione dei dati nel formato AMPX è stata effettuata tramite il modulo SMILER di una versione corretta ed aggiornata (ENEA-Bologna 2007 Revision/ NEA PSR-0352/06) da ENEA del sistema di processamento dati nucleari americano SCAMPI, prodotto ad ORNL. Si è utilizzata in particolare una procedura di calcolo automatizzata per il processamento dati, messa a punto originalmente in ENEA da alcuni anni con il fondamentale contributo di uno specialista proveniente da IPPE-Obninsk (Federazione Russa). Tale procedura è già stata utilizzata con successo anche per la generazione di precedenti librerie similari (VITJEFF311.BOLIB, VITENDF70.BOLIB, VITJEFF31.BOLIB e VITJEF22.BOLIB) in formato AMPX. Inoltre, attraverso la versione citata di SCAMPI, si possono ad esempio produrre da VITJEFF32.BOLIB librerie collassate ed autoschermate problem-dependent di sezioni urto di lavoro a gruppi larghi, specificamente parametrizzate per reattori BWR o PWR e dedicate ad applicazioni di schermaggio e dosimetria del recipiente in pressione. Librerie del tipo precedente (BUGJEFF311.BOLIB e BUGENDF70.BOLIB) sono già state, ad esempio, precedentemente prodotte da GDN nell'ambito di PAR precedenti.

Si sottolinea poi che VITJEFF32.BOLIB è stata processata in modo strettamente conforme e conservativo rispetto alle raccomandazioni contenute nella normativa americana di riferimento specifico "Neutron and Gamma-Ray Cross Sections for Nuclear Radiation Protection Calculations for Nuclear Power Plants" (ANSI/ANS-6.1.2-1999 (R2009)). VITJEFF32.BOLIB è stata quindi validata, tramite il modulo di trasporto mono-dimensionale XSDRNPM contenuto in SCAMPI e nel sistema modulare di sicurezza nucleare americano SCALE, su circa 80 esperienze integrali di criticità a spettro energetico neutronico termico, intermedio e veloce, tratte dalla banca dati internazionale ICSBEP.

Validazione delle librerie aggiornate di dati di decadimento radioattivo del sistema ANITA-2000 su dati sperimentali prodotti da FNS-JAERI

ANITA-2000 è un "package" per il calcolo dell'attivazione di materiali sottoposti ad irraggiamento neutronico, rilasciato da ENEA alla NEA Data-Bank (NEA 1638) e a ORNL-RSICC (CCC-693), ampiamente validato ed utilizzato in ENEA in passato per calcoli di inventario radioattivo e valutazioni di termini di sorgente per analisi di safety di impianti a fusione nucleare. Il package comprende: a) il codice di attivazione ANITA-4M, basato sul codice originale sviluppato al CEC JRC Ispra, in grado di calcolare l'inventario radioattivo di un materiale esposto ad irraggiamento neutronico; b) due librerie di sezioni d'urto d'attivazione neutroniche; c) una libreria di dati di decadimento (file "fl1") e d) una libreria (file "fl2") contenente gli spettri dei raggi gamma di decadimento emessi dai nuclidi radioattivi, in una struttura energetica a 18 gruppi.

I dati contenuti nelle librerie fl1 e fl2 del package sono basati sulla libreria di decadimento FENDL/D-2.0. Queste librerie sono state aggiornate nella precedente annualità del PAR sulla base dei dati della più recente libreria valutata JEFF-3.1.1/RDD (Radioactive Decay Data Library).

Nel corso della presente annualità le librerie aggiornate sono state validate tramite il confronto fra i risultati dei calcoli effettuati con il codice ANITA-4M ed i valori sperimentali di calore di decadimento misurati alla fine degli anni '90 al Fusion Neutronic Source (FNS) del Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) (attualmente JAEA, Tokai, J). La libreria di sezioni d'urto di attivazione utilizzata nei calcoli è EAF-2010 del package EASY-2010.

Nelle misure effettuate presso ENEA, campioni di 32 diversi materiali (Al, B_4C, $BaCO_3$, Bi, CaO_3, CF_2, Co, Cr, Cu, Fe, Inconel, K_2CO_3, Mn, Mo, Na_2CO_3, Nb, Ni, NiCr, Pb, Re, S, SiO_2, SnO_2, $SrCO_3$, SS304, SS316, Ta, Ti, V, W, $Y2O_3$, Zr) sono stati sottoposti all'irraggiamento di un flusso di neutroni da 14 MeV. Gli irraggiamenti sono stati effettuati in due serie temporali, della durata di 5 minuti e 7 ore, rispettivamente. I calori di decadimento sono stati misurati a vari tempi dopo il termine dell'irraggiamento. I calcoli con ANITA-4M sono stati effettuati utilizzando le composizioni dei campioni (wt%) e lo spettro neutronico nella struttura a 175 gruppi VITAMIN-J forniti dal gruppo sperimentale. Sono stati effettuati due tipi di calcoli per confronto: 1) utilizzando le librerie originali incluse nel package ANITA-2000, cioè la libreria fl1 basata su dati FENDL/D-2 e la libreria di sezioni d'urto di attivazione neutronica FENDL/A-2, 2) usando la nuova libreria di decadimento fl1 basata su dati JEFF-3.1.1e la libreria di sezioni d'urto di attivazione basata su EAF-2010 del package EASY-2010.

Le attività dei temi inseriti nella task a.1 sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2014/125 e RdS/PAR2014/126.

a.2 Metodi Monte Carlo e deterministici per analisi di sicurezza nocciolo

Progettazione di strumentazione per il monitoraggio del livello di degradazione di un nocciolo di PWR durante un incidente severo

L'ambito in cui l'attività si configura è quello di consulenza e supporto all'IRSN (Istituto di Radioprotezione e Sicurezza Nucleare) per calcoli di irraggiamento per la progettazione di reattori PWR. L'oggetto delle valutazioni è principalmente costituito dai flussi neutronici e di radiazioni gamma - con relativi spettri e dosi - sulla strumentazione elettronica e i relativi cablaggi situati all'interno del vano del vessel e a vari livelli di profondità all'interno e al di sotto del calcestruzzo sacrificale nella parte sottostante il nocciolo.

La preparazione del modello di calcolo MCNP (nocciolo di equilibrio HZP fornito dall'IRSN) e degli strumenti patch di calcolo per MCNP è già stata oggetto di attività nelle precedenti annualità. Nella presente annualità questi sono stati impiegati in modo da produrre i risultati richiesti. Una prima fase si è svolta a partire dalla produzione dei risultati a inizio dicembre 2014, fino alle ultime valutazioni a inizio marzo 2015. Il criterio di convergenza per i risultati Monte Carlo è stato quello che abitualmente si impiega in ambito di progettazione: l'errore statistico deve essere trascurabile rispetto alle incertezze legate al modello geometrico e a quelle insite nei dati generali dei materiali e a quelli inerenti le reazioni nucleari.

Ulteriori calcoli sono stati effettuati per analizzare il modello alla luce dei risultati già ottenuti. Le principali variazioni rispetto al modello iniziale sono state legate allo spettro di generazione dei neutroni ad opera del Pu239, l'impiego di una sorgente omogenea di neutroni nel nocciolo (con l'obiettivo di confrontare i risultati ottenuti dall'IRSN).

Valutazioni particolari hanno stimato l'impatto dell'impiego del modello KERMA per il calcolo della dose. Una verifica delle ipotesi ad esso legate fanno emergere come il modello KERMA sovrastimi la dose (25 -40%), nel caso in cui siano collocati sulla superficie del calcestruzzo; all'interno invece, la dose reale è ben calcolata. A contatto con gli isolanti in ossido di zirconio (ZrO_2), la dose reale dovrebbe risultare sottostimata.

Calcoli supplementari sono stati svolti finalizzati come segue:

- analisi delle posizioni dove sono generate le radiazioni gamma che maggiormente contribuiscono alla dose (principalmente nel calcestruzzo sacrificale stesso);
- contenuto in acqua del riflettore in acciaio (rappresentato dal modello con canali di refrigerante) è stato incrementato dell'1%;
- un'analisi è stata condotta per cercare di comprendere le differenze fra gli spettri gamma ottenuti dall'IRSN (impiegando ENDF/B-7) e quelli ottenuti da ENEA (impiegando JEFF-3.1).

A inizio maggio 2015 sono stati forniti i risultati di flusso neutronico e di irraggiamento gamma verso la parte inferiore (più sottile) del recipiente in pressione dell'EPR, come da valutazioni richieste.

Oltre alle valutazioni del problema mediante un classico approccio disaccoppiato (un calcolo di auto-valore in cui vengono memorizzati i siti di fissione secondo una discretizzazione spaziale a cui segue un calcolo in sorgente fissa), in aprile è stata iniziata una campagna di simulazioni per generare risultati equivalenti impiegando un'unica valutazione, comprendente anche il calcolo di autovalore.

Una nuova attività è stata avviata durante il mese di agosto per il calcolo dei coefficienti di vuoto, prima in un reattore refrigerato a sodio (ESFR) e conseguentemente in un reattore ad acqua bollente (BWR). La procedura di calcolo prevede l'impiego del nuovo algoritmo.

Valutazioni, con codici deterministici, dei fenomeni di tilt azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di sicurezza del nocciolo

L'esperienza operativa maturata con i PWR di seconda generazione ha mostrato che ad inizio ciclo alcune configurazioni di nocciolo possono essere affette da un disequilibrio azimutale statico della potenza, conosciuto come "power tilt", la cui origine, pur non essendo ancora precisamente e pienamente compresa, dipende ragionevolmente dalla combinazione casuale di numerosi parametri. In presenza di combustibile fresco e a piena potenza, il power tilt, definito come differenza relativa tra la potenza media di un quadrante e quella calcolata su un quarto di nocciolo, oscilla tra 2,2 e 3,5% per i reattori francesi CPY da 900 MWe e tra 2,0 e 2,5% per i reattori da 1300 MWe. Questa distorsione di potenza comporta una riduzione del "Departure from Nucleate Boiling Ratio" e dunque una riduzione dei margini di sicurezza termoidraulica sul combustibile.

Il presente lavoro suggerisce di stimare il tilt azimutale del flusso attraverso misure differenziali del valore di antireattività delle barre di controllo in quei sistemi che non permettono, a bassa potenza, misure dirette di distribuzione di flusso e potenza (ad esempio attraverso l'utilizzo di camere mobili). La correlazione tra tilt e

variazione del worth delle barre di controllo rispetto al caso pienamente simmetrico, è stata valutata sia numericamente, con riferimento al nocciolo del PWR di terza generazione proposto nel Benchmark UAM, sia teoricamente attraverso la Teoria Classica delle Perturbazioni (CPT).

Il lavoro mostra infatti che, nonostante alcune approssimazioni minori e le difficoltà dovute alla dimensione abbastanza piccola del campione di misura, la CPT può fornire un supporto teorico efficace per analizzare il problema della misura dei tilt di potenza. È evidente che prima di un qualsiasi utilizzo per scopi pratici, questa metodologia deve essere generalizzata e confermata per tutte le configurazioni di nocciolo di interesse.

Le attività dei temi inseriti nella task a.2 sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2014/127 e RdS/PAR2014/128.

a.3 Metodi per verifiche di sostenibilità

Resistenza alla proliferazione, nuclear security e sostenibilità del ciclo del combustibile

In continuità con le attività dei precedenti Piani Triennali è proseguito lo sviluppo e il monitoraggio di attività e metodologie che interessano valutazioni di resistenza alla proliferazione e protezione fisica, nuclear security e altri elementi di sostenibilità del ciclo del combustibile.

Nel contesto NEA è continuato il contributo ENEA legato alle valutazioni di sostenibilità del ciclo del combustibile e analisi di opzioni di cicli avanzati, con riguardo alle incertezze nelle assunzioni generali di scenari energetici, oltre alle valutazioni su esperimenti integrali per migliorare le conoscenze su attinidi minori.

Riguardo alle tematiche di non proliferazione, è proseguita la partecipazione ai gruppi di lavoro GIF Proliferation Resistance and Physical Protection (PR&PP-WG) e IAEA-INPRO. Per la parte nuclear security, le attività legate al processo del Nuclear Security Summit rimangono prioritarie, assieme a quelle svolte in ambito IAEA.

Contributo alla piattaforma IGD-TP e altre iniziative internazionali sulla gestione dei rifiuti radioattivi

Lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita costituisce oggi la soluzione tecnicamente e scientificamente più valida per la loro gestione definitiva. Questa soluzione garantisce per tempi geologici la protezione dell'uomo e dell'ambiente dagli effetti delle radiazioni ionizzanti emesse dai rifiuti, in tutte le fasi del ciclo di vita del deposito stesso, e permette di non trasmettere l'onere della loro gestione alle generazioni future.

L'ENEA contribuisce alla discussione, in ambito europeo e internazionale, delle modalità di progettazione e gestione del deposito geologico, attraverso la partecipazione alla piattaforma tecnologica europea "Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform" IGD-TP e ad altre iniziative quali il progetto GEOSAF della IAEA e il Comitato per la gestione dei rifiuti radioattivi della OECD-NEA (RWMC).

ENEA sintetizza annualmente le iniziative europee sulla tematica del deposito geologico per i rifiuti radioattivi, fornendo una visione strategica delle attività più strettamente collegate alia ricerca energetica italiana ed alle necessità del Paese.

Le attività dei temi inseriti nella task a.3 sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2014/129 e RdS/PAR2014/130.

b. Metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali

L'obiettivo prevede lo sviluppo di metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari tenendo conto dell'evento di Fukushima Dai-ichi e delle informazioni provenienti dagli stress test europei. In questa terza annualità è continuata l'attività di ricerca impostata alla raccolta di coefficienti e parametri integrali per il calcolo "fast" del termine sorgente in reattori LWR, allo studio integrale di sequenze "Beyond Design Basis accident" (BDBA) su reattori di tipo PWR, selezionati tra quelli presenti in prossimità delle nostre frontiere, al calcolo e valutazione della sequenza incidentale nell'unità 1 della centrale di Fukushima Dai-ichi, anche attraverso invio sul posto di un ricercatore per la miglior raccolta dati e informazioni, al proseguimento e finalizzazione delle procedure per la realizzazione di un database esperto, all'applicazione di approcci di tipo probabilistico e deterministico per la stima del rischio di eventi incidentali esterni (vedi Fukushima). Si è accresciuta l'esperienza degli utilizzatori dei codici integrali e meccanicistici per la simulazione T/H dell'intero impianto e di specifici componenti, sono state eseguite analisi di pre- e post-test a supporto di programmi sperimentali per la validazione e la verifica dei progressi nell'affidabilità della risposta dei codici integrali ASTEC e MELCOR, si è dato il via allo sviluppo di modellistica avanzata per la valutazione del rilascio e della diffusione dei

contaminanti radioattivi. CIRTEN ha contribuito a queste attività con la partecipazione delle università di Pisa, Bologna, Roma "Sapienza" e Palermo.

b.1 Analisi incidentale e valutazioni di sicurezza per reattori BWR e PWR di centrali prossime ai confini nazionali

Calcoli di inventari di nocciolo per le centrali frontaliere a combustibile misto UOx-MOx e valutazione del termine sorgente in condizioni incidentali severe per alcune sequenze di particolare interesse

L'attività svolta si delinea come una logica prosecuzione di quelle svolte nelle due precedenti annualità, finalizzate ad accrescere le competenze in merito all'acquisizione delle metodologie necessarie per realizzare calcoli d'inventario di nocciolo (IC) ed alla valutazione fast-running di termine sorgente (TS) per impianti nucleari ad acqua leggera (LWR) in condizioni incidentali severe per ciascuna delle 26 centrali distanti dal confine nazionale meno di 200 km (centrali frontaliere).

L'aggiornamento realizzato in quest'ultima annualità ha permesso di ottenere conoscenze in merito al comportamento neutronico di un combustibile ad ossidi misti (MOX) ed al termine sorgente ad esso associato. Nel dettaglio, il documento è stato impostato in due parti.

In una prima fase, dopo una preliminare ricerca bibliografica sulle caratteristiche dei sistemi MOX, è stata realizzata:

a) mediante l'utilizzo delle sequenze funzionali T-NEWT e T-DEPL della suite di SCALE 6.1.3, un'analisi computazionale del comportamento neutronico dei combustibili ad ossidi misti. Tale analisi ha portato a verificare, per la configurazione di assembly ad ossidi misti Areva AFA-3G, l'andamento del Kinf con il burn-up, lo spettro neutronico a BOL e MOC del ciclo di equilibrio, le mappe di potenza relativa per assembly accoppiati UOX-MOX e l'influenza della concentrazione di boro sulla reattività del sistema;
b) mediante l'utilizzo del codice stand-alone ORIGEN-ARP della suite di SCALE 6.3.1, si è proceduto alla valutazione della potenza di decadimento e dell'inventario di nocciolo per un PWR a 900 MWe - assimilabile ad una delle 15 centrali frontaliere - in condizioni di full-MOX e 30% MOX.

Nella seconda parte del lavoro si è svolta un'analisi preliminare della letteratura regolatoria "open-source" americana in merito alla determinazione rapida del termine sorgente per combustibile MOX. In particolare, sono stati analizzati i documenti tecnici SAND2008-6665 e SAND2011-0128 dei laboratori nazionali SANDIA degli Stati Uniti.

L'analisi condotta ha permesso di effettuare un aggiornamento dei coefficienti di rilascio per gruppi di radionuclidi presenti nella metodologia di calcolo del TS determinata nella precedente annualità per noccioli al 40% MOX. Si è, infine, eseguito un calcolo di TS per un combustibile al 40% MOX adottando una delle sequenze incidentali severe per PWR a maggior impatto radiologico secondo quanto suggerito dalla norma regolatoria americana NUREG-1228.

Si può concludere che un sistema MOX, rispetto ad un sistema UOX e per una configurazione ad un solo assembly, può essere bruciato a valori più elevati di burnup anche se a BOL risulta KMOX < KUOX. L'inventario ad ossidi misti presenta un'attività iniziale minore ed una potenza di decadimento maggiore rispetto ad un sistema UOX. La valutazione ed il calcolo del TS a partire da inventari ad ossidi misti ha mostrato la necessità dell'utilizzo dei coefficienti di rilascio aggiornati rispetto alle valutazioni, che sono risultate essere sovrastimanti, sino ad oggi utilizzate e presenti nella norma regolatoria americana NUREG-1465.

Valutazione del comportamento di noccioli PWR e del livello di confidenza dei risultati ottenuti con l'uso di codici meccanicistici e/o integrali mediante il calcolo di sequenze incidentali in reattori PWR con riferimento al reattore della centrale di TMI-2

A completamento dell'attività svolta nelle precedenti annualità sono stati eseguiti calcoli parametrici con ASTEC (contributo CIRTEN-Università di Bologna) e MELCOR (contributo CIRTEN-Università di Pisa) con riferimento all'analisi della sequenza incidentale severa di SBLOCA (Small Break LOCA) già considerata precedentemente per il reattore TMI-2 (Figura 281) allo scopo di:

- spiegare le ragioni delle rilevanti discrepanze osservate nel confronto dei risultati dei due codici e indotte dai diversi modelli e parametri di degradazione nocciolo impiegati.
- valutare il livello di confidenza dei risultati prodotti dai due codici nell'analisi di incidenti severi.

Inoltre è stata verificata la possibilità di arrestare il processo di degradazione nocciolo attraverso misure di "Accident Management" con attivazione (ritardata) del sistema di refrigerazione di emergenza.

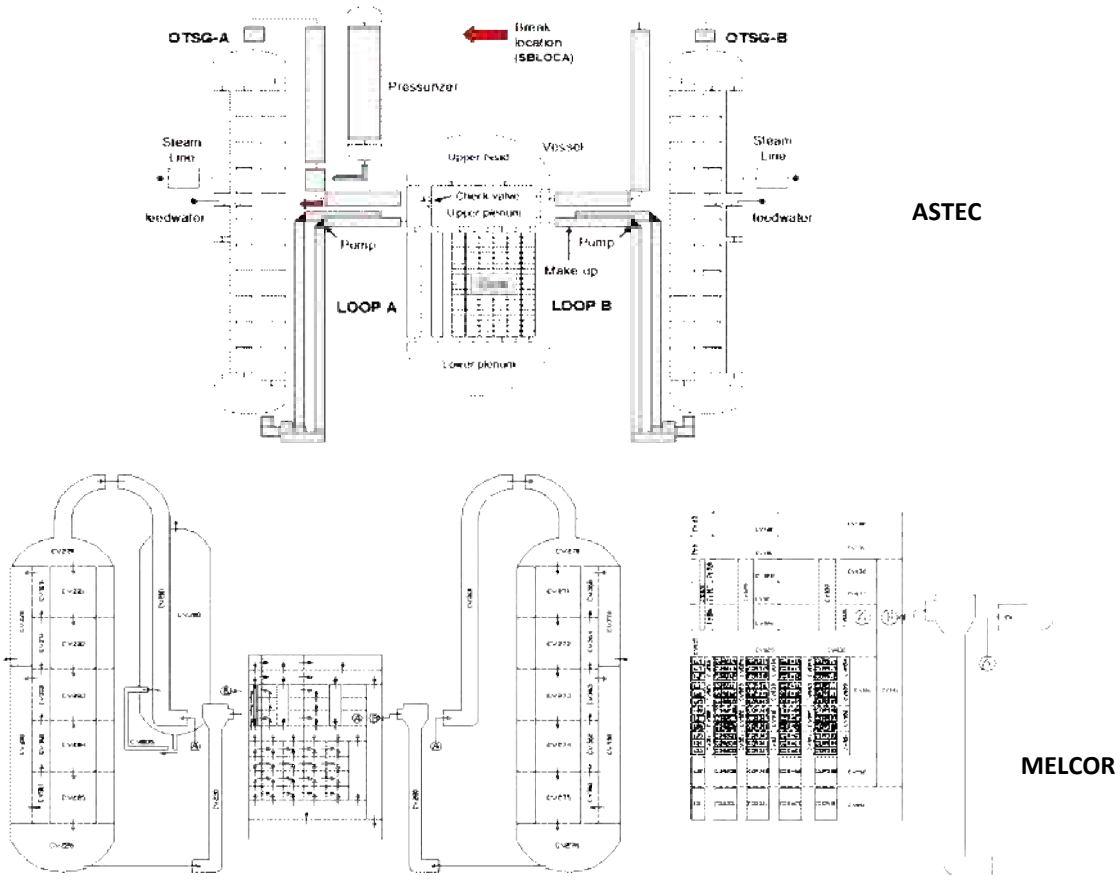


Figura 281. Modellazioni del reattore PWR-900 di TMI-2 con l'uso dei codici ASTEC e MELCOR

In primo luogo sono stati eseguiti alcuni calcoli di sensibilità, con il codice ASTEC, che hanno messo in evidenza l'importanza dei singoli parametri di degradazione nocciolo, in input al codice, sui risultati della sequenza incidentale severa, sia in termini di fusione del nocciolo che di produzione di idrogeno.

Successivamente, la sequenza incidentale di SBLOCA è stata calcolata considerando gli stessi parametri e modelli di degradazione in input ai due codici per verificare la possibilità di ridurre le notevoli discrepanze osservate in calcoli precedenti, basati su parametri standard di degradazione, suggeriti dagli sviluppatori dei singoli codici. I risultati di tali analisi hanno confermato l'importanza relativa dei parametri e modelli utilizzati sull'evoluzione dell'incidente, calcolata con i due codici. Tuttavia, rimangono alcune significative differenze nel confronto dei risultati dei due codici che non sembrano ridursi in maniera sostanziale rispetto ai calcoli precedenti.

Per quanto riguarda i calcoli di scenari con intervento ritardato del sistema di raffreddamento di emergenza, sono stati considerate due diverse condizioni di danneggiamento: nocciolo lievemente e altamente degradato. Anche in questo caso i due codici hanno mostrato un comportamento sostanzialmente diverso. Mentre con ASTEC l'arresto della degradazione è praticamente immediato a seguito del raffreddamento, con MELCOR la prima fase di raffreddamento comporta un'accelerazione del processo di degradazione che si arresta solo in una seconda fase.

In ogni caso entrambi i codici sono coerenti nel prevedere il successo dell'intervento del sistema di emergenza, attraverso il contenimento e raffreddamento del nocciolo degradato, evitando così la rottura del vessel e la propagazione dell'incidente.

Studio integrale di sequenze incidentali con riferimento a centrali prossime ai confini nazionali dotate di reattori del tipo BWR e PWR

Gli incidenti di Fukushima, Chernobyl e Three Mile Island hanno focalizzato l'interesse di ogni nazione tecnologicamente progredita ad approfondire le conoscenze sulle strategie necessarie per la mitigazione degli incidenti classificati "severe accidents".

Al fine di dimostrare l'adeguatezza della strategia di gestione dell'incidente, sono state effettuate svariate analisi

per la gestione degli incidenti severi, partendo dalla individuazione della successione degli eventi (sequenza incidentale), dei danni al nocciolo del reattore, delle sue (eventuali) fasi di degradazione, del periodo di grazia e, nel caso di fallimento dei sistemi di emergenza e delle varie barriere, del rilascio dei prodotti di fissione all'ambiente esterno.

Sebbene l'energia nucleare non sia parte del mix energetico italiano, centrali nucleari sono disposte ai confini italiani, pertanto analisi di possibili incidenti severi e la conseguente valutazione di possibili rilasci da centrali frontaliere viene classificata attività di importanza strategica per la previsione degli scenari di rischio, la pianificazione dell'attività di risposta alle emergenze e la gestione post-incidentale al fine di ridurre al minimo i danni in caso di presenza di materiale radioattivo disperso in aria e depositato al suolo dentro i nostri confini.

Nel quadro delle attività che l'ENEA svolge nell'ambito delle analisi degli incidenti severi, lo scopo è di analizzare, utilizzando il codice MELCOR, acquisito nell'ambito del Programma di Ricerca della USNRC Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP), transitori di interesse in reattori frontalieri (PWR e BWR).

Per quanto riguarda i reattori di tipo PWR, prendendo come riferimento un generico reattore da 900 MWe, è proseguito lo sviluppo della nodalizzazione MELCOR e sono stati analizzati tre differenti transitori del tipo "Beyond Design Basis accident":

- Short term Station Blackout (SBO) non mitigato, con possibile rottura dei tubi a U del GV (Steam Generator Tube Rupture - SGTR) indotta da stress termici;
- Loss of Feedwater non mitigato;
- Large Break Loss of Coolant Accident (LBLOCA) non mitigato.

Tali scenari incidentali, visto che sono del tipo non mitigato, determinano fenomeni di degradazione nocciolo con conseguente rottura del vessel; ciò porta alla presenza di materiale radioattivo nel contenimento del reattore con successivo fallimento della barriera di contenimento, visto lo scenario di tipo severo ipotizzato.

Questi tre transitori sono stati analizzati al fine di caratterizzare la risposta del reattore di riferimento con tre differenti eventi iniziatori e valutare i conseguenti termini sorgente.

Di particolare interesse è risultato essere il transitorio del tipo "short term Station Blackout (SBO)" con possibile rottura dei tubi a U del generatore di vapore (Steam Generator Tube Rupture - SGTR) indotta da stress termici, perché tale scenario può provocare un "by pass" del contenimento e una conseguente fuoriuscita di contaminanti radioattivi attraverso le valvole di sicurezza del sistema secondario.

Per quanto riguarda i reattori di tipo BWR, partendo dall'attività svolta nell'annualità precedente e avendo come riferimento la nodalizzazione MELCOR del reattore di Peach Bottom, sono state apportate tutte le modifiche necessarie per simulare l'unità 1 della centrale giapponese di Fukushima Dai-ichi e il conseguente transitorio. I risultati verranno successivamente confrontati con i dati sperimentali disponibili in letteratura per valutare l'accuratezza del codice per future analisi sui reattori di tipo BWR frontalieri.

In relazione alla valutazione dell'accuratezza dei codici, attività di ricerca sono state condotte al fine di analizzare e caratterizzare le cause di incertezza nei risultati prodotti dagli strumenti di calcolo. Particolare attenzione è stata posta alle problematiche di "scaling" che si determinano durante il processo di validazione dei codici.

Infine, considerando l'attenzione che la comunità internazionale rivolge verso i reattori avanzati del tipo Small Modular Reactor (SMR), possibili problematiche, considerando le attività svolte sulla termoidraulica di sistema con il codice TRACE, acquisito nell'ambito del Programma di Ricerca della USNRC Code Applications and Maintenance Program (CAMP), sono state in breve analizzate e proposte per future attività di ricerca concernenti la validazione del codice MELCOR per reattori avanzati di tipo passivo.

Le attività dei temi inseriti nella task b.1 sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2014/131, RdS/PAR2014/132 e RdS/PAR2014/133.

b.2 Analisi della risposta di modelli di dispersione e diffusione di contaminanti rilasciati in atmosfera e implementazione della banca dati per valutazioni di sicurezza e supporto alla emergency preparedness - fase 3

Istruzione del database esperto - Fase 3: Inserimento dell'orografia

Da alcuni anni ENEA sta lavorando alla realizzazione di un database e di una serie di moduli funzionali e di calcolo a supporto dell'analisi rapida delle conseguenze off-site di ipotetici incidenti nucleari severi, con rilascio di materiale radioattivo in atmosfera per gli impianti posti a meno di 200 km di distanza dal confine nazionale.

La struttura del database e dei relativi moduli di interfaccia e calcolo è stata pensata avendo in mente la logica del

percorso di computo necessario alla stima rapida delle conseguenze off-site (dose alla popolazione) e si compone di 5 macro-blocchi (Figura 282): 1) Dati di impianto; 2) Inventari di nocciolo; 3) Termine sorgente (ST); 4) Trasporto in atmosfera e 5) Calcolo di dose.

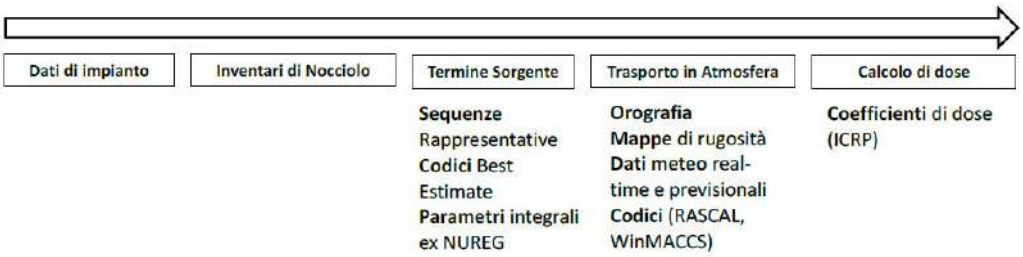


Figura 282. Diagramma della logica di calcolo per le conseguenze off-site

Di tali macro-blocchi, il numero 1 ed il numero 2 sono già stati approntati, mentre i rimanenti tre sono in fase di completamento. In particolare, per quanto riguarda il macro-blocco 3, esso si compone a sua volta di tre sotto-blocchi: 3.1) Raccolta di sequenze incidentali rappresentative; 3.2) Interfacce input/output a codici di tipo "Best Estimate"; 3.3) Sottoinsieme di parametri per il calcolo rapido del ST a partire dagli inventari di nocciolo. Di questi tre sotto-blocchi, il 3.3 è già pronto.

Il macro-blocco 4 è costituito da 4 sotto-blocchi: 4.1) Mappe orografiche dei siti frontalieri; 4.2) Mappe di rugosità dei siti frontalieri; 4.3) Codice per il popolamento dei file di dati meteorologici; 4.4) Interfacce a codici fast-running (RASCAL) o di altro tipo (WinMACCS). Di questi sotto-blocchi, il 4.3 è completato ed il 4.4 è in lavorazione. Oggetto di questa fase del progetto è la creazione delle mappe orografiche e di rugosità per popolare i sotto-blocchi 4.1 e 4.2.

Infine, il quinto macro-blocco è incorporato nelle funzionalità del codice fast-running US-NRC RASCAL ed al momento non sono previsti moduli funzionali specifici realizzati da ENEA. In funzione ed in ragione di ciò, le mappe necessarie ai sotto-blocchi 4.1 e 4.2 sono state realizzate nei formati necessari al loro utilizzo per il codice RASCAL.

Per quanto riguarda la produzione delle mappe, l'elaborazione dei dati è stata interamente realizzata con un sistema GIS. Il GIS, con i suoi potenti strumenti di analisi spaziale, ha permesso una rapida analisi dei dati a differenti risoluzioni. Le basi di partenza sono state le mappe orografiche del Corine Land Cover del 2006 e della rugosità, opportunamente rielaborate. Tenendo conto della risoluzione molto alta di queste mappe di partenza, circa 100x100 m a pixel, tutte le successive mappe sono state create con un alto grado di precisione, dall'area più grande di 320x320 km intorno ad ogni centrale, fino a quella più piccola di 32x32 km, tutte con una griglia di 22x22 quadrati.

La risoluzione finale di ogni "quadrato" di queste nuove mappe varia dai 14545x14545 m ai 1454x1454 m a pixel, quindi molto più bassa delle basi di partenza. Tutte le mappe sono state inoltre "riproiettate" ad una delle proiezioni geografiche più usate in Italia, la UTM Zona 32 Nord (Universal Transverse of Mercator), conosciuta anche come UTM32N, con ellissoide WGS84.

A titolo di esempio, sono state eseguite elaborazioni per i siti di Krsko in Slovenia e Gundremmingen in Germania, con tutte le mappe realizzate per le 4 differenti aree intorno ad ogni sito, 32, 80, 160 e 320 km, e per le diverse tipologie di dati, orografia e rugosità.

Dispersione e diffusione di contaminanti radioattivi rilasciati con continuità in atmosfera a seguito di incidente nucleare grave e valutazione delle concentrazioni nel territorio fino a distanze di 300 km dalla sorgente

In questa tematica sono state condotte attività di sviluppo modelli da inserire nel codice RADCAL-III mod. N. Gli innovativi modelli in sviluppo sono in grado di calcolare le concentrazioni radioattive nelle aree urbane e ad esse circostanti tenendo conto degli ostacoli naturali e artificiali presenti nelle aree urbane, dei loro diversi layout architettonici, e delle diverse condizioni meteorologiche locali.

Il lavoro svolto, classificato come fase di realizzazione modello e valutazione della loro congruenza fisico-matematica, è ora concluso. La struttura modulare e tutti i modelli sono pronti per la fase 2, che sarà dedicata al calcolo delle concentrazioni radioattive dovute a diversi scenari di incidenti con riferimento a reattori presenti nell'intorno dei confini nazionali, e ad una serie di confronti, ove possibile, con altri codici per scopi di convalida, come WinMACCS e RASCAL.

In origine, RADCAL è stato sviluppato per valutare l'impatto di inquinanti emessi sui porti e le zone circostanti in cui è prevista la presenza di unità militari straniere dotate di motori a propulsione nucleare. RADCAL-II è stato utilizzato come strumento complementare, per il confronto con i risultati del codice HOTSPOT, per aiutare le autorità alla identificazione del livello di rischio radioattivo, in caso di rilascio incidentale da detto naviglio, al fine di rivedere il piano di emergenza nazionale, da emettere come "Relazione tecnica", oggetto di valutazione da parte di apposito comitato, ai sensi dell'articolo 9 della D.Lgs.230 / 95. RADCAL-II non è codice di libero accesso.

RADCAL-III è la versione "civile" di RADCAL-II e non rappresenta una banale traduzioni dei modelli in esso presenti, ma una vera e propria struttura appositamente progettata per valutare le conseguenze esterne di scenari incidentali causati da un evento grave.

La nuova struttura è stata progettata per valutare due situazioni diverse. La prima è studiata nell'ambito del progetto internazionale EDEN (End-user driven DEmo for cbrNe), finanziato dall'Unione Europea, nell'ambito del Settimo programma quadro. Questo lavoro di ricerca si propone di sviluppare e validare modelli all'interno di RADCAL-III per la valutazione di rilascio incidentale e di natura terroristica, di materiale radioattivo in ambiente come conseguenza dello scoppio di una bomba sporca. Una dimostrazione tematica, organizzata da ENEA, è prevista alla fine di settembre 2015. Questa parte della struttura RADCAL-III è chiamata «modulo R» ("Radiological Module").

L'altra parte della struttura RADCAL-III è denominata «modulo N» ("Nuclear Module") e rappresenta l'oggetto del lavoro in fase di svolgimento nel PAR.

Vale la pena notare che tutti i modelli in sviluppo si riferiscono al rilascio di inquinanti radioattivi da una centrale nucleare (modalità "puff"). Questa precisazione è necessaria per mettere in evidenza che il nuovo approccio matematico adottato è fortemente diverso da quello comunemente usato per descrivere rilasci di stato stazionario in vari altri codici esistenti. Questi nuovi modelli sono pensati per permettere all'utente di indagare le conseguenze causate da inquinanti radioattivi rilasciati in condizioni transitorie e non necessariamente a quote di camino. Si possono operare studi con rilascio a partire da 1 m dal livello del suolo e la zona di dispersione è rappresentata dall'atmosfera fino allo strato limite planetario (PBL), perché l'evento inizia a (praticamente) livello terra e quando gli inquinanti vengono trasportati lontano dal "punto zero" sono così violentemente dispersi che gli effetti dell'impatto con il PBL non sono così significativi come nel caso di un pennacchio dovuto da rilascio continuo in quota. I modelli a puff in RADCAL-III si basano su un approccio euleriano al fine di superare i limiti intrinseci che caratterizzano i modelli comunemente usati, tipo il GPM (Gaussian Plume Model) in cui non è possibile analizzare situazioni di calma di vento o molto prossime alla sorgente di rilascio.

Altro rilevante valore aggiunto è la possibilità di operare stime in presenza di ostacoli naturali e artificiali e di diverse configurazioni di tessuto urbano.

Correzioni di campo corto sono risultate necessarie per superare i limiti indotti dallo sviluppo puramente analitico. Per questo, sono stati utilizzati dati sperimentali disponibili da prove sperimentali eseguite in galleria del vento. Questo al fine di tenere in debito conto la presenza di turbolenza atmosferica e ostacoli naturali o artificiali in opportuna scala (montagne, edifici, etc.).

In caso di rilasci da centrali nucleari, generalmente il territorio interessato è molto esteso, perché il pennacchio generato può essere trasportato da venti a lunghe distanze dalla sorgente. RADCAL-III mod. N permette di eseguire calcoli di concentrazioni atmosferiche in aria e al suolo in aree urbane e circostanti spazi privi di ostacoli rilevanti (mare, aperta campagna, etc.) fino a distanze massime orizzontali dalla sorgente classificabili come sottoclasse meso-alfa (200-2000 km). La validazione dei modelli è prevista a partire dalla prima annualità del prossimo piano triennale.

Valutazioni della risposta di modelli avanzati di dispersione gassosa e diffusione di aerosol e particolati radioattivi per confronto con quelli adottati in Calpuff e Calmet

In questa tematica sono stati svolti studi di valutazione della risposta di modelli avanzati di dispersione per confronto con quelli adottati in Calpuff e Calmet.

I principali dati esterni richiesti per eseguire uno studio con il codice Calpuff riguardano: a) l'orografia del terreno e l'uso del suolo per il dominio di interesse; b) le condizioni meteorologiche per il periodo in esame; c) la caratterizzazione delle sorgenti di emissione in termini di geometria e tipologia di inquinanti. Se sono noti i dati emessivi della sorgente, la possibilità di utilizzare i modelli diffusionali è subordinata alla disponibilità dei dati meteorologici e di uso del suolo, rappresentativi dell'area oggetto di studio, secondo un ben definito formato.

Le attività svolte hanno riguardato la messa a punto di una procedura che permetta l'uso integrato dei modelli gestiti dal processore Calmet, attraverso l'uso dei pre-processori geofisici e meteorologici TERREL, CTGPROC e

MAKEGEO, con i modelli dispersivi di Calpuff.

La prima fase del lavoro ha riguardato la gestione dei dati necessari per la definizione delle caratteristiche geomorfologiche del territorio, attraverso il Digital Elevation Model (DEM), che tiene conto, nell'andamento della superficie geodetica, dei vari oggetti insistenti sul terreno (elevazione del terreno con presenza di vegetazione, edifici, etc.). Per questa attività sono stati impiegati i dati topografici "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM), ottenuti dalla NASA con grado di risoluzione di 1 arc-second (30 m). Tali dati sono stati scaricati come immagini in formato digitale GeoTIFF dal sito http://earthexplorer.usgs.gov/. Il dominio ricopre un'area di interesse di circa 9.35E5 km^2, definita tenendo in considerazione le coordinate geografiche delle centrali nucleari dislocate in Francia, Svizzera, Germania e Slovenia e una distanza minima dai confini nazionali di circa 250 km.

Poiché alcune zone delle varie griglie utilizzate per ricoprire il dominio di interesse sono risultate mancanti di dati, i file digitali sono stati modificati per ottenere una mappatura completa di tutta l'area in esame. Successivamente, si è proceduto alla validazione delle modifiche effettuate. I file SRTM, insieme ai dati di costa, sono stati poi processati con il programma TERREL.

Per la definizione digitale dell'uso suolo si è fatto ricorso al "Land Use Land Cover" (LULC). Per tale attività è stato impiegato il file raster "Corine Land Cover" (CLC), messo a punto per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio a livello comunitario, con una risoluzione di 250 m. Il CLC utilizzato consente di avere informazioni sul mosaico Europeo all'anno 2006. La classificazione dell'uso del suolo è stata ricodificata e resa compatibile con il formato "U.S. Geological Survey" (USGS). Ciò è stato fatto operando opportune modifiche nel file fortran CTGPROC. Le modifiche effettuate consentono la lettura e gestione dei dati CORINE e la riclassificazione secondo le categorie previste in Calmet.

I dati elaborati con TERREL e CTGPROC sono stati processati con il programma MAKEGEO per la generazione del file GEO.DAT. Questo file contiene tutti in dati spaziali necessari per definire gli effetti cinematici del terreno sul campo di vento tramite l'aggiunta di componenti verticali indotte dall'orografia sulla base dei modelli adottati da Calmet.

Nella seconda fase dei lavori, si è studiato il formato dei dati meteorologici e il modo con cui tali dati sono codificati per il processamento con i programmi READ62 e SMERGE. Il pre-processore READ62 permette di generare il database UP.DAT, che contiene i dati dei profili verticali del vento per il dominio di interesse, il pre-processore SMERGE fornisce, invece, il SURF.DAT, che raccoglie i dati meteorologici delle stazioni a terra (velocità e direzione vento, temperatura, pressione, umidità relativa, pioggia, etc.). I database ottenuti attraverso la procedura messa a punto nell'ambito dell'attività svolta costituiscono la base necessaria per la successiva definizione dell'input Calpuff.

Le attività dei temi inseriti nella subtask b.2 sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2014/134, RdS/PAR2014/135 e RdS/PAR2014/136.

b.3 Applicazione di metodologia PSA e DSA del tipo "Risk-Informed" per la stima del rischio di eventi esterni

Analisi probabilistica degli specifici aspetti di sicurezza, e implementazione dei relativi modelli, con riferimento alle informazioni disponibili dall'incidente alla centrale di Fukushima Dai-ichi

Come follow-up degli studi finalizzati all'analisi di sicurezza e rischio degli impianti nucleari alla luce dell'incidente alla centrale nucleare giapponese di Fukushima Dai-ichi, si è proceduto alla identificazione e processamento degli aspetti critici relativi all'analisi probabilistica di sicurezza (PSA, Probabilistic Safety Assessment), con il completamento dell'analisi di sicurezza "Risk-Informed" a fronte di eventi esterni ed in particolare: 1) alla valutazione del rischio relativo a siti con molte unità; 2)all'analisi degli aspetti del PSA "level2", tesi alla valutazione del source term.

Per quanto riguarda gli studi relativi al punto 1, si è proceduto alla: a) Analisi degli eventi iniziatori; b) Identificazione delle dipendenze e delle interazioni tra i sistemi; c) Definizione di nuove misure per il rischio; d) Esempio illustrativo relativo all'incidente di perdita di alimentazione esterna.

Per quanto riguarda gli studi relativi al punto 2, si è proceduto alla: a) Definizione dei Plant Damage States; b) Identificazione dei modi di guasto del Contenimento; c) Valutazione del ruolo dei sistemi passivi per gli incidenti severi; d) Valutazione del ruolo dell'operatore ed affidabilità umana; e) Implementazione delle strategie per la mitigazione degli incidenti severi.

Verifiche di sicurezza, attraverso calcoli deterministici connessi alla funzione di contenimento, per valutare la risposta degli impianti all'incidente di riferimento

A complemento di quanto sviluppato con il PSA e nell'ottica di un approccio integrato probabilistico-deterministico, è stata eseguita una valutazione del "safety margin" dell'edificio di contenimento, che rappresenta l'ultima barriera fisica contro eventuali rilasci di radioattività alla popolazione ed all'ambiente esterno. La determinazione del margine di sicurezza si rende necessaria in particolare per gli impianti nucleari esistenti, i quali sono stati progettati e costruiti con criteri divenuti obsoleti dopo l'evento incidentale di Fukushima.

In particolare, analizzando tale sequenza incidentale, sono stati individuati e valutati gli aspetti più importanti suscettibili di approfondimento ai fini della verifica strutturale di sicurezza del contenimento.

Le attività dei due temi inseriti in questa task sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS/PAR2014/137.

c. Sperimentazione e calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza

E' proseguita la campagna di attività sperimentali e di studi a supporto di rilevanti tematiche sulla sicurezza. In questa terza annualità, le attività sono state indirizzate principalmente allo studio per la sperimentazione di un sistema per la rimozione del calore residuo e alla validazione e verifica della risposta dei codici CATHARE2 e TRACE con riferimento al programma sperimentale SPES2. CIRTEN ha contribuito a queste attività con la partecipazione dell'Università di Palermo e dei Politecnici di Torino e Milano. Contributi sono stati forniti anche dalla società SIET.

c.1 Studi relativi alla simulazione integrale di sistema presso gli Impianti SIET

Preservare la capacità di progettazione ed interpretazione di campagne sperimentali attraverso l'utilizzo degli strumenti numerici più idonei e validati è essenziale sia per le verifiche di sicurezza dei reattori attuali sia per confermare la validità dei principi su cui si basa il progetto di sicurezza dei reattori innovativi. Nella corrente annualità tale obiettivo è stato perseguito attraverso un'attività di validazione-verifica (V&V) dei codici termo-idraulici di sistema e relativi modelli utilizzando i dati sperimentali già disponibili della facility SPES2 (simulatore integrale AP600).

Sono stati effettuati studi per chiarire e risolvere le problematiche di simulazione dei transitori SPES2 incontrate con i codici CATHARE2 e TRACE nel corso della precedente annualità. Gli studi sono stati condotti da ENEA sul codice francese CATHARE2 e dall'Università di Palermo sul codice americano TRACE. Il lavoro è consistito: nell'ottimizzazione dei modelli di calcolo (input deck) utilizzati per le precedenti analisi di post-test, nel rifacimento di tali analisi e nel confronto dei risultati ottenuti con quelli precedenti e con i dati sperimentali.

L'utilizzo dei test della campagna sperimentale condotta sul finire degli anni 90 sulla facility SPES2 (simulatore dell'impianto a maggior sicurezza intrinseca e passiva AP600) ha permesso di valutare i due codici su fenomenologie rilevanti per il progetto della sicurezza nei sistemi innovativi, che in particolare coinvolgono l'utilizzo di sistemi passivi. Tali sistemi, anche alla luce dell'evento di Fukushima, rivestono un ruolo di forte interesse internazionale.

Sulla base degli spunti ottenuti nella scorsa annualità, l'ENEA ha apportato delle migliorie al noding CATHARE. In particolare si è deciso di nodalizzare il downcomer anulare DWC_ANN con l'elemento 3D, di sdoppiare il downcomer tubolare e di modificare la piscina che rappresenta l'IRWST (In-containment Refuelling Water Storage Tank) per consentire di descrivere al meglio il fenomeno della circolazione naturale. L'input deck così modificato è stato utilizzato per la simulazione dello stesso transitorio incidentale analizzato lo scorso anno, consistente nella rottura di due pollici sulla linea di iniezione B dei sistemi di emergenza Direct Vessel Injection (DVI).

I risultati dell'analisi condotta, confrontati con quelli precedenti e con i dati sperimentali, hanno messo in luce la migliorata capacità del modello CATHARE di descrivere il comportamento dell'impianto in condizioni incidentali. La maggior discrepanza ancora presente riguarda il funzionamento del sistema di rimozione del calore di decadimento nel quale, a differenza di quanto accade nel test, la circolazione naturale si blocca qualche centinaio di secondi dopo l'intervento per riprendere subito dopo con valori di portata paragonabili a quelli sperimentali. Tale fenomeno sembrerebbe imputabile alla difficoltà, dovuta alla struttura del codice CATHARE, di simulare il corretto valore della rugosità interna dei tubi che, essendo utilizzata per il calcolo delle perdite di carico distribuite, influisce fortemente sull'innesco della circolazione naturale.

L'Università di Palermo ha invece sviluppato una versione migliorativa ed ottimizzata del modello di calcolo per il codice TRACE dell'impianto sperimentale SPES-2, grazie all'adozione di nuovi modelli teorico-numerici ed alla revisione del noding dell'impianto. Con questo nuovo modello è stato ricalcolato il transitorio relativo alla rottura della linea da 2" che connette la Cold Leg con la Core Make-up Tank. I risultati ottenuti a mezzo del nuovo

modello, confrontati con i dati sperimentali ed i risultati ottenuti nella precedente annualità, risultano soddisfacenti oltre che dal punto di vista qualitativo (come già mostrato nelle simulazioni per il PAR2013) anche dal punto di vista quantitativo.

Le attività sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS/PAR2014/138.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Nel PAR2014, per quanto riguarda la strumentazione, l'attività ha riguardato la messa a punto di una metodologia deterministica/statistica per l'interpretazione dei segnali dello Spool Piece per la misura della portata bifase in deflussi con un più ampio intervallo di valori della frazione di vuoto ed in presenza di regimi di transizione dei deflussi bifase.

Gli studi relativi ai componenti critici sono stati indirizzati alla valutazione, sia sperimentale che numerica, di un'ulteriore tipologia di scambiatore di calore da utilizzare all'interno di sistemi di sicurezza passivi per gli impianti nucleari innovativi.

Sviluppo e qualificazione della strumentazione per i deflussi bifase

Le attività di ricerca teorico-sperimentale svolte dal Dipartimento Energia (DEP) del Politecnico di Torino sono state dedicate alla caratterizzazione della strumentazione per la misura della portata in un deflusso bifase. Tale strumentazione, che consiste in uno "Spool Piece" formato da un Venturi per la misura delle cadute di pressione ed una sonda ECP (Electrical Capacitance Probe) per la misura del grado di vuoto, è stata sviluppata per la misura della portate di fuga in simulatori integrati come lo SPES3. La sonda ECP è uno strumento prototipico concepito e testato da SIET nel corso dei PAR precedenti.

Studi condotti dal Politecnico di Torino nei PAR precedenti hanno mostrato la possibilità di utilizzare la misura delle cadute di pressione valutate dal Venturi per ricavare le portate delle due fasi una volta noto il modello di flusso bifase. Tale informazione può essere ricavata dal segnale della sonda ECP, ma occorre sviluppare una metodologia che permetta di interpretarlo correttamente. Nel corso del PAR 2013, il DEP aveva testato lo "Spool Piece" in configurazione orizzontale, con un deflusso bifase aria-acqua ad elevati gradi di vuoto, e sviluppato una prima metodologia per l'analisi del segnale e la modellazione dello "Spool Piece" utilizzando anche precedenti dati per deflusso verticale.

Nella corrente annualità i risultati disponibili insieme ad una nuova campagna di prova di estensione temporale dei dati acquisiti sono stati analizzati sia in termini deterministici (valori medi e loro dipendenza dalle condizioni di prova), sia stocastici (densità di probabilità) per una più corretta interpretazione dei segnali della sonda ECP.

Si è effettuata un'analisi di dettaglio dei dati sperimentali disponibili e il confronto con i nuovi dati ottenuti, dando più importanza all'analisi dei segnali elettrici acquisti e alla loro dipendenza dalle condizioni di prova. La loro conversione in grandezze fisiche (pressioni differenziali, portate, frazioni di vuoto) è stata considerata essenzialmente al fine di stimare la congruenza fisica delle informazioni estratte dalla procedura di prova.

L'analisi della risposta degli strumenti è stata approfondita tramite lo studio del comportamento dinamico in regime statico (prove di livello) e in deflusso bifase. Il lavoro ha avuto lo scopo di verificare la sensibilità degli strumenti alle variazioni del deflusso bifase e il rapporto effettivo segnale/rumore. Sulla base di queste analisi si è quindi definita una nuova metodologia per l'interpretazione dei segnali della sonda ECP che, dall'analisi sistematica dei segnali delle coppie di elettrodi e delle loro deviazioni rispetto alle mappe di riferimento, consente di caratterizzare la probabile distribuzione delle fasi e quindi la frazione di vuoto.

Valutazione di sistemi passivi per la rimozione del calore di decadimento in reattori SMR

In linea con quanto svolto nel PAR 2013, in cui le attività sono state indirizzate al confronto tra scambiatori di calore elicoidali e scambiatori di calore a piastra con microcanali, nel corso di questa ultima annualità è stato svolto uno studio mirato ad un confronto, dal punto di vista termo-idraulico, di generatori di vapore/scambiatori con tubi elicoidali ed a baionetta. Tale studio è stato svolto in collaborazione tra il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino e il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano.

Per questa prima fase dello studio, il reattore di riferimento per il quale sono stati sviluppati i modelli di GV, analizzati con il codice di sistema RELAP5-3D, è stato il reattore modulare di piccola taglia SMART. Lo studio ha preso avvio dalla definizione di un'analisi comparata per individuare i limiti di applicabilità e i criteri per la definizione vincolata del problema. In un secondo tempo è stata definita la geometria dei generatori di vapore per il reattore di riferimento e selezionata la metodologia con la quale sono stati rappresentati i componenti all'interno del codice di sistema.

L'analisi di simulazione ha riguardato due distinte condizioni di funzionamento del componente: 1) a pieno carico (condizioni di normale operazione) e 2) a carico ridotto (condizioni incidentali di rimozione del calore di decadimento).

Per lo studio della risposta a carico ridotto sono state svolte 130 simulazioni RELAP a diverse condizioni di funzionamento stazionario per l'individuazione della mappa di funzionamento del componente sotto l'ipotesi di regolazione di potenza a temperatura media costante per il fluido primario. Alla luce dei risultati ottenuti è stato possibile effettuare il confronto per individuare i vantaggi e gli svantaggi delle due configurazioni.

Una seconda fase dello studio, eseguita in sinergia con il tema relativo alla "Sperimentazione a supporto della caratterizzazione di scambiatori con tubi a baionetta", è stata dedicata all'identificazione di una possibile configurazione di generatore di vapore a tubi a baionetta per un SMR integrato, facendo riferimento al modulo base di tubo HERO-2, impiegato in SIET per i test termoidraulici. Inoltre, è stato condotto uno studio RELAP di performance per tale generatore di vapore, in configurazione scambio termico fluido primario-fluido secondario, quale base di giustificazione e supporto delle prove sperimentali.

Infine, a conclusione dello studio e con l'obiettivo di approfondire nel prossimo futuro la dinamica di funzionamento di questi generatori di vapore per il loro utilizzo in sistemi di rimozione della potenza di decadimento, si è proceduto a: 1) Calcoli di progettazione preliminare per la costruzione di una facility sperimentale che potrebbe essere installata ex-novo presso i laboratori del Politecnico di Torino; 2) Identificazione delle ipotesi preliminari circa la possibilità di utilizzo di una facility sperimentale già presente presso SIET, realizzata nei PAR precedenti, impiegata per lo studio di sistemi passivi a circolazione naturale, connessi a generatori di vapore a tubi elicoidali.

Sperimentazione a supporto della caratterizzazione di scambiatori con tubi a baionetta

ENEA, con l'ausilio della Società SIET, ha svolto attività di sperimentazione a supporto della caratterizzazione di scambiatori con tubi a baionetta. Nel corso di precedenti annualità, presso i Laboratori SIET, era stato realizzato e testato un circuito di prova per generatori di vapore a tubi elicoidali. Questo circuito è stato adattato ed utilizzato nella corrente annualità per testare dei generatori di vapore con tubi a baionetta.

La sezione di prova, chiamata HERO-2, costituita da due tubi a baionetta, è stata messa a disposizione da ENEA, mentre SIET si è occupata del montaggio e della realizzazione delle prove. Ogni tubo a baionetta è costituito da un tubo interno, che convoglia il liquido in ingresso, e un tubo esterno riscaldato elettricamente. Nell'intercapedine tra i due tubi si realizza la generazione di vapore (Figura 283).

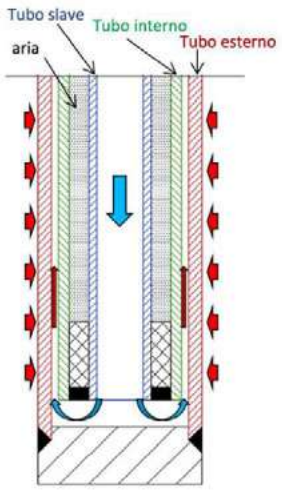


Figura 283. Schema di funzionamento di un tubo a baionetta

Il riscaldamento è stato realizzato con un totale di 210 resistori elettrici che avvolgono i due tubi esterni per tutta la loro lunghezza. Ogni tubo è stato suddiviso in due zone di riscaldamento controllato indipendentemente. La potenza totale netta per ogni tubo è di circa 22 kW. La pressione di progetto della coppia di tubi a baionetta, in previsione di futuri utilizzi, è di 180 bar, ma l'attuale facility è in grado di operare a una pressione di 70 bar ed una portata di 0.1 kg/s per tubo.

L'impianto è in grado di alimentare la sezione di prova con acqua sottoraffreddata o satura e allo scarico della sezione di prova è presente un sistema di separatori e valvole in grado di attuare il controllo della pressione d'uscita. Il principale limite di sicurezza è rappresentato dalla massima temperatura ammissibile per i riscaldatori esterni di 350°C.

I test termoidraulici che sono stati condotti hanno consentito la creazione di un prezioso database finalizzato alla caratterizzazione dello scambio termico, e alla rilevazione e quantificazione delle instabilità termoidrauliche dei tubi in specifiche condizioni operative. Per garantire la rappresentatività dei test e la loro fattibilità, ENEA ha condotto una serie di simulazioni preliminari con il codice di sistema RELAP5 al fine di determinare la matrice di prova.

Grazie al controllo accurato delle condizioni al contorno e ad apposita strumentazione, il database è un'ottima banca dati per la qualifica di codici di calcolo utilizzati a supporto della progettazione e per l'analisi incidentale dei reattori.

Nella corrente annualità i dati provenienti dalla campagna sperimentale sono stati utilizzati per una verifica preliminare del modello termoidraulico impiegato nella fase di pre-test. Tali dati permetteranno inoltre di confermare ed approfondire il confronto delle prestazioni tra tali generatori di vapore e quelli a geometrie diverse (es. tubi elicoidali) alle diverse condizioni di interesse per reattori SMR.

Le attività dei temi inseriti nella Task c.2 sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2014/139, RdS/PAR2014/140 e RdS/PAR2014/141.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Trattandosi dell'annualità conclusiva del PTR 2012-2014, si è reputato opportuno riportare sinteticamente informazioni sull'intera attività svolta nel triennio, nell'ambito della linea progettuale 1, ai fini di una valida comunicazione e diffusione pubblica dei risultati della ricerca.

La forma di divulgazione più concreta, immediata e diretta, in questi tre anni di PAR, è consistita nella emissione di 60 rapporti tecnici, in cui sono stati raccolti i risultati delle ricerche condotte nei 36 mesi di riferimento (ottobre 2012- settembre 2015). La diffusione dell'informazione scientifica è stata favorita dalla stretta collaborazione con il consorzio interuniversitario CIRTEN e l'Industria, nello specifico la SIET di Piacenza.

I ricercatori impegnati nella LP1 hanno prodotto memorie scientifiche pubblicate su riviste nazionali e internazionali e sono stati organizzati seminari e convegni. Tutta la documentazione tecnica prodotta nell'ambito della Ricerca di Sistema è di libera consultazione sul sito ENEA.

Nelle diverse annualità l'ENEA si è impegnata a diffondere le attività di ricerca svolte nell'ambito dell'Accordo di Programma, con l'organizzazione di diversi meeting e workshop, a cui hanno partecipato tutti i soggetti interessati allo sviluppo delle attività, in particolare i ricercatori di ENEA, CIRTEN e SIET.

Nel corso della prima annualità sono stati inoltre organizzati un'iniziativa a carattere informativo/divulgativo presso l'università di Palermo e un incontro internazionale, come positiva ricaduta della ricerca svolta nel PAR, per ampliare i contenuti dell'accordo bilaterale di collaborazione con IRSN e per promuovere attività comuni di ricerca sul tema della "Nuclear and Radiological Emergency Response & Preparedness".

Nella seconda annualità del PAR, a Bologna si è svolto un workshop, in data 29 aprile 2014, che ha visto la partecipazione di ENEA, CIRTEN e SIET. Il giorno successivo si è tenuto un seminario tematico su "Application of the Proliferation Resistance & Physical Protection Methodology to Nuclear Systems".

Al fine di presentare le attività programmate nella terza annualità del PAR, in data 27 aprile 2015 si è svolto un workshop a cui sono stati invitati i principali contributori (ENEA, CIRTEN e SIET) per presentare e discutere collegialmente il lavoro programmato. Il giorno successivo si è tenuto, presso l'Aula Magna della Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna, un seminario tematico dal titolo: "Il Carbonio-14 nei rifiuti radioattivi destinati al deposito", al fine di presentare una revisione delle attività di ricerca nazionali ed internazionali su questa tematica.

Come chiusura delle attività del progetto B.3.1 in data 11 settembre 2015, è stato infine organizzato un convegno con l'obiettivo di presentare i risultati conseguiti dai ricercatori dei vari laboratori ENEA coinvolti (Brasimone, Bologna, Casaccia) ottenuti in collaborazione con CIRTEN e SIET. Tale evento ha inoltre avuto lo scopo di aprire un confronto tra la ricerca e il tessuto industriale nazionale.

LINEA PROGETTUALE 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

Nell'ambito della linea relativa al nucleare di IV generazione le attività si sono focalizzate sulla tecnologia dei reattori a piombo a causa dell'interesse e della competenze espresse dall'industria Italiana e in virtù della rilevanza internazionale del parco di apparecchiature sperimentali presenti in ENEA: reattore TAPIRO per dati nucleari, impianti CIRCE, NACIE, LIFUS5 e HELENA per termoidraulica, analisi di sicurezza e qualifica componenti, e impianti per prove materiali in piombo.

Si sono dunque supportate nell'ambito del progetto le attività di ricerca e sviluppo finalizzate alla costruzione del reattore dimostrativo a piombo denominato ALFRED e oggetto del consorzio internazionale FALCON ("*Fostering Alfred Construction*"), cui hanno aderito ANSALDO NUCLEARE, ENEA e ICN (Romania).

A tale scopo si è lavorato su tre aree di intervento, tutte afferenti allo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR refrigerati a piombo, che rappresentano altrettanti ambiti di criticità per ALFRED.

a. Progettazione di Sistema e Analisi di Sicurezza

a.1 Progettazione Nocciolo LFR

La necessità di disporre di dati nucleari accurati per gli attinidi minori è stata evidenziata in molti studi recenti sui sistemi GEN IV. Ad esempio, la notevole massa atomica degli attinidi può giocare un ruolo fondamentale negli

studi di fattibilità di cicli di combustibile innovativo. In tale ambito, particolare risalto è stato dato all'importanza che avrebbero eventuali esperienze integrali, in reattori di ricerca, finalizzate all'inferenza delle sezioni d'urto di attinidi minori.

In questo contesto, nell'ambito di un gruppo di esperti della NEA focalizzato sui dati di esperienze integrali per la gestione degli attinidi minori, è stata avviata una collaborazione tra ENEA e CEA per lo studio di fattibilità di una campagna di irraggiamenti presso il reattore di ricerca RSV-TAPIRO presente nel C.R. Casaccia dell'ENEA (Figura 284). Questo studio è stato suddiviso in due parti: la prima parte ha riguardato la caratterizzazione neutronica del

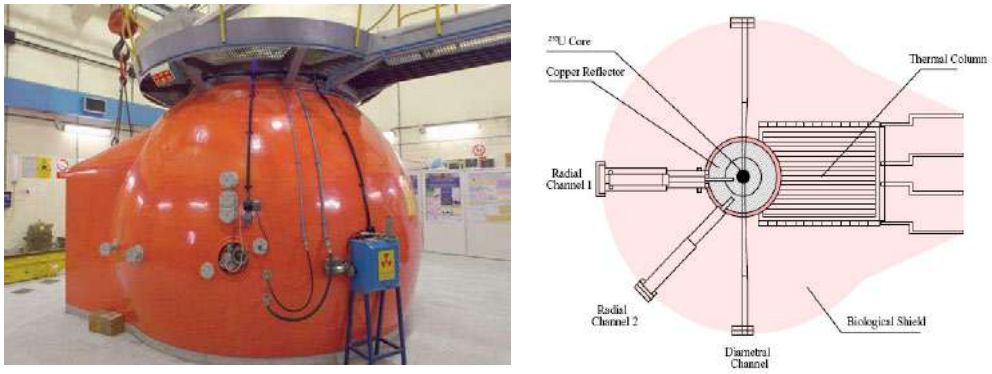


Figura 284. Reattore TAPIRO

reattore TAPIRO attraverso l'utilizzo di diversi codici di calcolo (ERANOS deterministico, Serpent e MCNP Monte Carlo) applicando entrambe le metodologie di calcolo deterministica e stocastica; la seconda parte ha riguardato la schematizzazione di alcuni campioni di attinidi minori prodotti dal CEA, caricati con diversi isotopi e precedentemente utilizzati per la campagna sperimentale francese OSMOSE, utilizzati per la misura delle diverse sezioni d'urto medie mediante l'attivazione dei campioni.

Per la caratterizzazione neutronica sono stati analizzati due diversi canali sperimentali presenti nel reattore TAPIRO, il canale diametrale passante, che attraversa il nocciolo fisso, e il canale tangenziale, tangente il nocciolo fisso. Con l'ausilio dei codici di calcolo sopra citati, sono state analizzate le traverse di flusso e lo spettro neutronico in diverse posizioni del reattore, unitamente ai tassi di fissione e cattura di diversi attinidi minori. Gli attinidi minori analizzati sono Pu239, Pu240, Pu242, Np237, Am241, Am243, Cm243 (l'analisi è stata estesa anche a U235 e U238). I risultati mostrano generalmente un buon accordo tra le due metodologie sebbene l'approccio deterministico preveda una modellizzazione geometrica semplificata rispetto all'approccio stocastico. Di contro i codici stocastici presentano problemi di bassa statistica laddove l'intensità del flusso neutronico risulta essere ridotta. Oltre a questi confronti è stato possibile anche confrontare la sezione d'urto media dei vari isotopi, che fornisce informazioni integrali differenti spostandosi dal centro nocciolo verso la periferia del sistema, unitamente al rapporto cattura/fissione.

La fattibilità di questa esperienza dipende da diversi fattori, tra cui il livello di attività raggiunto dai campioni a seguito dell'irraggiamento (questo influenza direttamente il tempo di raffreddamento dopo il quale è possibile estrarre dal canale i campioni senza rischi radiologici per gli operatori) e l'energia della radiazione gamma emessa. Quest'ultima informazione è fondamentale per la stima del tasso di conteggio e influenza direttamente il tipo di detector necessario per la misura. Sono state considerate quattro differenti posizioni all'interno del canale diametrale per l'irraggiamento dei campioni: centro nocciolo, una distanza equivalente alla posizione del tangenziale, centro riflettore e centro schermo biologico. Per quest'analisi preliminare sono stati scelti, in accordo con il CEA, sei campioni OSMOSE.

Una volta raccolti in letteratura i dati necessari e valutata l'efficienza del detector scelto (un HPGE della ORTEC, presente in Casaccia) attraverso una modellizzazione Monte Carlo del sistema di conteggio con MCNP, l'analisi di attivazione è stata svolta con l'ausilio del codice FISPACT. Si è assunto un ciclo di irraggiamento settimanale, scelto come esempio, composto da 5 ore di irraggiamento e 19 ore di raffreddamento ripetuto 4 giorni, ed al quinto giorno 5 ore di irraggiamento e 2 ore di raffreddamento. Per ogni detector, al termine di questo ciclo di irraggiamento, è stata valutata l'attività dei campioni, unitamente ai tassi di conteggio associati, in base all'efficienza del detector, alla catena di decadimento dell'isotopo attivato, al tipo di radiazione gamma che è possibile rivelare con il detector, all'energia e all'intensità della radiazione emessa per ciascun nuclide.

Sebbene le caratteristiche del flusso neutronico varino a seconda delle metodologie di calcolo adottate (deterministica e stocastica), i valori di attività ottenuti per tutti i campioni in tutte le posizioni del reattore

mostrano un andamento decrescente a partire dal centro nocciolo fino a raggiungere lo schermo biologico. L'analisi effettuata indica tassi di conteggio complessivamente molto elevati, conseguenza diretta dell'elevato tasso di attivazione dei campioni a seguito del ciclo scelto. In conclusione tali risultati sembrano confermare la fattibilità dell'esperienza sebbene sia comunque necessaria un'analisi di dettaglio prima del passaggio alla fase sperimentale.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/190.

Relativamente allo sviluppo del codice ERANOS, il lavoro di validazione finora svolto nell'ambito dello sviluppo delle tecniche di analisi perturbativa non lineare del campo neutroni/nuclidi ha fornito risultati molto promettenti.

La metodologia per il calcolo perturbativo di funzionali della densità neutronica e di quella dei nuclidi che evolvono durante l'evoluzione (burn-up) del nocciolo è stata sviluppata secondo la teoria delle perturbazioni generalizzate su base euristica (HGPT). Essa viene pertanto definita HGPT-BU e può essere applicata a studi relativi all'evoluzione temporale del campo nonlineare neutroni/nuclidi in sistemi critici, o sottocritici. I funzionali di interesse possono riguardare, in particolare:

- gli isotopi del combustibile a fine ciclo. In questo caso il metodo potrebbe essere utilizzato per l'analisi della vita del nocciolo durante il burn-up ed essere quindi ricercati valori ottimali di parametri di progetto oppure strategie ottimali di caricamento del combustibile;
- la fluenza ad un tempo e punto stabiliti. In questo caso il metodo potrebbe essere usato per analizzare il danneggiamento sui materiali con la vita del reattore;
- la radiotossicità delle scorie a lungo termine;
- il controllo residuale (riserva di reattività) a fine ciclo. L'analisi di questa quantità può essere di particolare interesse in studi volti ad estendere il ciclo di vita del reattore.

I risultati ottenuti con i vari test eseguiti dimostrano la validità del metodo HGPT-BU per analisi perturbative e di sensitività nel campo accoppiato neutroni/nuclidi.

Per tutti i test realizzati ci si è limitati a calcoli di cella a uno o due gruppi. I calcoli di cella sono adeguati per studi parametrici di progetto o di scenario in cui vengono analizzati gli effetti a medio e lungo termine di diversi feed di combustibile e opzioni di riciclo. Studi di evoluzione del combustibile che tengano conto delle dimensioni spaziali del reattore, di interesse per analisi di progetto dettagliato, implicano più calcoli di cella, in relazione al numero di zone in cui il nocciolo viene suddiviso, in ciascuna delle quali le densità dei nuclidi e del flusso neutronico vengono assunte costanti. La connessione tra i calcoli nelle singole celle implica il ricalcolo dei flussi reali ed aggiunti in tutto il sistema ad ogni step mediante i moduli di calcolo diretto già implementati e validati nel codice ERANOS.

In alcuni test, per i calcoli di confronto tra metodo diretto e metodo aggiunto (HGPT-BU) è stato utilizzato il metodo delle differenze finite. Tale metodo può richiedere un numero di step temporali di calcolo relativamente elevato, particolarmente per il metodo diretto. Per i calcoli aggiunti il numero di step può rimanere contenuto (36 nei casi considerati nei test per precisioni tra l'1 e l'8%). Per i calcoli diretti potranno invece essere utilizzati i moduli di calcolo del burn-up già esistenti che richiedono generalmente un numero di step limitato.

In relazione al calcolo del controllo residuo, il controllo in generale può essere definito diversamente rispetto a quello usato nei test: per esempio può corrispondere alla concentrazione di veleno (boro) sciolto nel refrigerante, o, nel caso di un sistema sottocritico, all'intensità della sorgente neutronica prodotta dall'acceleratore.

Dal punto di vista del metodo HGTP una definizione diversa del controllo non comporta comunque difficoltà di rilievo, consistendo semplicemente in una semplice correzione della funzione importanza associata al campo neutronico in funzione del tipo di controllo considerato.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/191.

Relativamente alla progettazione del nocciolo, dopo l'analisi critica della configurazione di ALFRED, si è pervenuti ad un nuovo possibile arrangiamento in cui sono state corrette tutte le criticità emerse. L'ultimo passo, necessario ad una nuova configurazione di riferimento, consiste nella completa caratterizzazione neutronica della stessa, così da ricavare gli arricchimenti e le zone di arricchimento che consentano di garantire l'operabilità della macchina per i tempi previsti e nel rispetto dei limiti di progetto.

Le modifiche investigate nella precedente annualità dell'AdP, sono state quindi implementate nei modelli di simulazione neutronica (per entrambi i codici deterministico ERANOS e statistico MCNP) e termoidraulica (ANTEO+). L'aggiornamento di tali modelli ha riguardato anche le proprietà fisico-chimiche dei materiali previsti per il nocciolo, e le condizioni operative per ogni suo componente.

In relazione alle diverse librerie di dati nucleari implementati nell'installazione dei due codici già citati, sono stati dedotti i criteri per la comparazione dei risultati, e fissate le condizioni più favorevoli per ottenere al contempo lo sfruttamento sinergico del potenziale complementare dei due strumenti di analisi, e l'uso del set di dati nucleari più aggiornato, dunque ritenuto più affidabile.

La caratterizzazione del nocciolo è dunque stata eseguita anticipando l'analisi termoidraulica (inclusiva della propagazione delle incertezze ad essa associate), così da dedurre il valore obiettivo dell'appiattimento della distribuzione di potenza che consente il rispetto dei limiti di progetto – con particolare riferimento al limite sulla temperatura massima di guaina.

Il lavoro si è inoltre posto l'obiettivo di definire le caratteristiche di stabilità dinamica del reattore ALFRED. In particolare si è cercato di costruire una mappa in grado di determinare i confini della zona di stabilità del reattore in funzione di alcune caratteristiche chiave di progetto del medesimo.

Lo scopo di questa attività è di fare da ponte tra le esigenze dei diversi progettisti del reattore e di fornire a loro dei parametri che possano fare da vincolo alle diverse scelte progettuali. Ad esempio il progettista di neutronica troverà utile conoscere come risponde il reattore in funzione dei principali parametri neutronici (tempo medio di generazione, costanti di decadimento dei precursori, incidenza dei neutroni ritardati) e dei coefficienti di controreazione neutronica. Nello stesso tempo il progettista termoidraulico troverà d'interesse conoscere come i parametri termoidraulici (portate massiche, temperature, costanti di tempo del sistema) determinano le caratteristiche di risposta dinamica e le interconnessioni tra circuito primario e secondario, fino all'interfaccia tra il reattore e la rete elettrica.

Con questa procedura si intende definire, da subito, le caratteristiche dinamiche per aiutare i progettisti nell'ottica del cosiddetto "co-design", dove dinamica e controllo partecipano fin da subito a definire le caratteristiche di progetto del reattore.

L'attività svolta è stata sviluppata in due fasi distinte. Nella prima fase è stato sviluppato un modello analitico del reattore ALFRED (utilizzato come reattore di riferimento nell'ultima configurazione disponibile) tramite un sistema di equazioni differenziali ordinarie lineari, con il quale è stata effettuata una analisi di stabilità asintotica utilizzando la tecnica del luogo delle radici. Nella seconda fase è stato sviluppato un simulatore del reattore ALFRED (utilizzando la tecnica "object - oriented"), di tipo non lineare, per verificare se le previsioni del modello analitico potevano ritenersi attendibili alla luce di un simulatore più dettagliato e con fenomeni non lineari. Le analisi svolte nella prima fase e nella seconda sono state effettuate a inizio e a fine ciclo del reattore (BoC – EoC). In questo modo è stato realizzato un tool molto flessibile per coadiuvare lo sviluppo della nuova configurazione del reattore ALFRED.

I risultati principali di questo lavoro consentono di stabilire le principale caratteristiche dinamiche del reattore e forniscono utili indicazioni ai progettisti sulle isole di stabilità, fornendo loro dei vincoli, dei limiti e delle performance dinamiche nelle scelte dei diversi parametri progettuali della nuova configurazione di ALFRED.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/192.

Uno dei punti critici del progetto del reattore ALFRED consiste nell'individuazione di una strategia di ricarica che consenta di assicurare il continuo ed efficace raffreddamento degli elementi esausti, durante la loro estrazione dal nocciolo e fino alla loro deposizione in piscina di raffreddamento. Criticità complicata dal layout dello stesso elemento di combustibile, per via dell'estensione fino al cielo di pila della parte strutturale di questo.

Partendo dalla valutazione della distribuzione delle temperature di guaina in funzione della potenza quando l'elemento è raffreddato in aria per circolazione naturale, si è proceduto nell'identificare la temperatura massima accettabile per la durata delle operazioni di ricarica del combustibile (tempo di movimentazione in aria). Incrociando le informazioni sulla dipendenza funzionale della temperatura massima dalla potenza residua, e sulla temperatura massima accettabile, segue la potenza residua da traguardare per acconsentire alla movimentazione degli elementi.

Stante la rapidità con cui decadono i prodotti di fissione a breve emivita, la potenza residua decresce - già nelle prime ore - a circa l'1% della potenza nominale dell'elemento, quando irraggiato in pila. Per quanto meno rapidamente decresca la potenza residua, una volta decaduti i prodotti di fissione a brevissima vita media, grazie al design dell'elemento di ALFRED – particolarmente favorevole all'instaurarsi di circolazione naturale, il valore accettabile di potenza smaltibile dall'azoto può essere raggiunto in un tempo approssimativamente di una settimana.

Considerando pertanto il tempo che sarebbe necessario ad effettuare le operazioni di movimentazione del combustibile per trasferirlo nell'area di parcheggio, e alla fonte di possibili errori di manipolazione e

malposizionamento ad esse associate, si conclude che, per ALFRED, l'in-vessel storage sia da considerarsi da non perseguire.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/193.

a.2 Analisi di sicurezza

In relazione alle attuali linee di ricerca sulla sicurezza dei reattori veloci di IV generazione raffreddati a piombo, e in continuazione con le attività svolte per il PAR 2013, nell'ambito delle attività a supporto alla progettazione del combustibile nucleare, l'attività svolta si è posta il duplice obiettivo:

- di aggiornamento del codice di fuel pin performance Transuranus con riferimento alla versione LFR-oriented messa a punto in precedenza per l'analisi dei reattori veloci a piombo;
- di carattere applicativo e metodologico (tramite l'impiego di suddetta versione del codice) per la modellazione e l'analisi termo-meccanica delle barrette di combustibile adottate nel reattore a piombo scelto come riferimento (ALFRED), al fine di ottimizzarne il design e le caratteristiche di sicurezza.

L'attività svolta, per quanto riguarda il primo punto, ha previsto una revisione critica e di aggiornamento di alcuni modelli fenomenologici del combustibile, in particolare per quanto riguarda la ridistribuzione del plutonio e il rilascio dei gas di fissione in condizioni di transitori di potenza (burst release). Per quanto riguarda la modellazione e l'analisi termo-meccanica delle barrette di combustibile, tramite la suddetta versione del codice Transuranus, è stata effettuata un'analisi di performance delle barrette di combustibile del reattore di riferimento, in condizioni nominali.

L'attenzione è stata focalizzata sui fenomeni caratteristici della vita della barretta in reattore, nell'intento di:

- verificare il rispetto dei limiti di design preliminari;
- individuare eventuali criticità, tramite un'analisi di sensitività dedicata ad alcuni aspetti significativi, per i quali la modellazione esistente presenta tuttora diverse incertezze, e volta alla definizione di uno scenario penalizzante per la performance;
- ottimizzare alcuni parametri di progetto della barretta di combustibile.

I risultati principali di questo lavoro forniscono indicazioni utili al progetto del reattore di riferimento e, più in generale, al miglioramento della sicurezza intrinseca dei reattori a piombo. Si ritiene che tra i risultati conseguiti quelli di maggiore interesse siano i seguenti:

- attenta valutazione, nelle condizioni di normale funzionamento, dell'evoluzione del comportamento in reattore del sistema "guaina-combustibile" (in particolare, del processo di chiusura dell'intercapedine tra guaina e pastiglie di combustibile e della successiva dinamica di contatto tra guaina e combustibile);
- miglioramento del design di barretta e della sua performance;
- individuazione di soluzioni costruttive finalizzate al conseguimento di margini di sicurezza più ampi.

È inoltre proseguito lo studio, in continuità con lo scorso PAR, sulla valutazione e verifica di correlazioni di conducibilità termica per combustibili tipo MOX. Infatti, tra la miriade variabili che governano i processi ed i meccanismi che avvengono nelle barrette di combustibile durante il loro irraggiamento in reattore, il profilo di temperatura nella pastiglia è senza dubbio una di quelle più importanti. Risulta pertanto di cruciale importanza per ogni strumento computazionale utilizzato per simulare il comportamento integrale delle barrette essere in grado di simulare il profilo di temperatura di barretta il più accuratamente possibile.

In particolare, l'attività ha come scopo l'assessment delle correlazioni di conducibilità dei MOX implementate nel codice TRANSURANUS ed è stata svolta in due passi sostanziali:

- comparazione tra le correlazioni MOX del codice, correlazioni disponibili in letteratura e dati sperimentali;
- verifica del codice sulla base di barrette selezionate da database sperimentali sia per LWR (2 barrette da IFA-597) che FBR (2 barrette da HEDL-P-19) con lo scopo di testare le correlazioni di conducibilità MOX e gli altri parametri integrali che affliggono la simulazione della temperatura di pastiglia.

Il lavoro ha mostrato che il codice TRANSURANUS è in grado di simulare la temperature e la conducibilità di combustibili MOX-LWR con buona accuratezza. Dall'altra parte è stata rilevata la possibilità di miglioramento delle correlazioni per FBR quali ad esempio:

- l'inclusione di un fattore correttivo che tenga conto del rapporto O/M;
- l'inclusione di un fattore correttivo che tenga conto della percentuale di Pu;
- un miglioramento del fattore che tiene conto della dipendenza da temperatura alle alte temperature (sopra 1600°C).

Come primo step, è stato introdotto il temine dipendenza alta temperatura sulla base del modello suggerito da

Baron-Hervé, ricompilato il codice e ritestato sulle barrette FBR.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2014/194.

Per quanto riguarda lo sviluppo e validazione di un approccio e di modelli per la analisi di sicurezza dei reattori veloci di IV generazione, l'attività tecnica è stata multi-physics e multi-scale e ha tratto beneficio dalla disponibilità dei dati sperimentali misurati nel reattore EBR-II durante l'esecuzione dei test sperimentali: protected (SHRT-17) ed unprotected (SHRT-45r) loss of flow.

L'attività ha richiesto uno sforzo sinergico di differenti competenze tecniche, dalla fisica del reattore, alla termoidraulica di sistema, alla fluidodinamica computazionale. Partendo da quanto svolto nell'ambito della precedente annualità, si sono portate a termine le seguenti attività:

1. Il modello RELAP5-3D©, sviluppato e utilizzato nell'ambito del PAR-2013, è stato migliorato e qualificato attraverso la simulazione del test SHRT-17 (post-test analisi). L'analisi dei risultati ha evidenziato la capacità del codice di simulare i principali fenomeni del transitorio, rilevanti per la sicurezza, e messo in luce le limitazioni. Questo è evidenziato dal confronto tra dati sperimentali e risultati calcolati.
2. Il modello CFX della fuel assembly XX09 è stato messo a punto ed impiegato, partendo dalle condizioni al contorno fornite dalla termoidraulica di sistema (RELAP5-3D©), per le analisi di post-test dell'esperimento SHRT-17, effettuando calcoli stazionari e di transitorio. Questo ha consentito la simulazione tridimensionale del fuel bundle e un dettagliato confronto con tutte le termocoppie installate nel canale strumentato XX09.
3. Messa appunto di una metodologia per l'analisi del nocciolo di reattori veloci refrigerati a metalli liquidi, mediante codici di calcolo 3D neutronici. Questa è consistita nelle attività di seguito riportate.
   - lo sviluppo di un modello neutronico 3D Monte Carlo del reattore, usando come codice di riferimento MCNP6. Tale modello è stato sviluppato con un livello di dettaglio molto elevato, ogni pin è stata modellata singolarmente, anche le parti in acciaio del riflettore sono state riprodotte secondo la geometria originale. Il modello completo comprende 45 composizioni diverse distribuite su tre piani assiali per le 87 sub-assembly di combustibile e le 10 barre di controllo, e una composizione, per le 330 sub-assembly di blanket. Da questo modello è stato ottenuto il valore di k-eff e la distribuzione di potenza da usare come riferimento per il modello nodale 3D a pochi gruppi.
   - il calcolo delle sezioni d'urto omogeneizzate a 33 Gruppi (i gruppi energetici sono gli stessi usati dal codice di reticolo ERANOS) utilizzando il codice di reticolo sviluppato dal "Oak Ridge National Laboratory" (ORNL) "SCALE". Generando diversi modelli 2D per il fuel, le CR e il riflettore, è stata costruita una libreria di sezioni d'urto per tutto il nocciolo escludendo la zona del blanket.
   - la libreria delle sezioni d'urto è stata poi implementata nel modello 3D sviluppato usando il codice neutronico del "Idaho National Laboratory" (INL) PHISICS.

Tutta l'attività svolta è stata presentata al "Third Research Coordination Meeting of the IAEA Coordinated Research Project on benchmark analyses of an EBR-II shutdown heat removal test", organizzato da ENEA e tenutosi a Bologna dal 23 al 27 Marzo 2015.

Il completamento dell'attività tecnica sarà completata con la finalizzazione delle analisi relative al test SHRT-45r. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/195.

Per le attività relative alla strumentazione neutronica di monitoraggio dei reattori LFR (Lead Fast Reactor), partendo dalla strumentazione commercialmente disponibile si sono proposti miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza delle tecnologie di rivelazione quando applicate ai sistemi veloci a piombo. Come riferimento è stato preso il reattore dimostrativo ALFRED, la cui modellazione è stata completata in ogni sua parte, consentendo un calcolo più verosimile di spettri neutronici e gamma nelle posizioni d'interesse per l'installazione degli strumenti. La strumentazione commercialmente disponibile (camere a fissione e SPND) si è dimostrata non completamente adeguata alle esigenze di monitoraggio del reattore studiato, evidenziando la necessità di studiare soluzioni progettuali innovative che siano corredate anche da esperienze sperimentali in flussi neutronici veloci. In particolare:

- le camere a fissione si dimostrano essere più adeguate a monitorare la potenza 0 e la salita in potenza, data la loro elevata sensitività al flusso neutronico; il monitoraggio delle potenze dalle centinaia di kW in avanti richiede la rimozione delle sonde, per questioni di durabilità del tempo e massimo rateo di dose gamma tollerabile; a seconda del posizionamento prescelto e del range di potenza che si intende investigare, sono possibili ottimizzazioni attraverso modifiche funzionali, di layout e di materiali;
- i SPND-pronti si dimostrano, tecnologicamente, strumenti semplici, efficaci, resistenti e sicuri per il

monitoraggio della potenza nominale; sono da investigare, tuttavia, ottimizzazioni di tali strumenti per le condizioni di reattore LFR, al fine di ottenere migliori prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore nel range delle alte potenze; sono, inoltre, da investigare ulteriormente i limiti di bruciamento ammissibili per tali strumenti;
- i rivelatori al diamante non sono mai stati applicati alla reattoristica convenzionale, essendo stati concepiti più per esigenze di ricerca per neutronica delle alte energie. La caratteristica che li rende interessanti è la loro resistenza in ambienti sostanzialmente ostili in senso radiologico; occorre comunque notare che essi non sono adatti ad applicazioni in-vessel, a causa delle temperature e dei troppo elevati flussi neutronici. La loro applicazione può essere solo ex-vessel;
- la strumentazione di monitoraggio della salita in potenza (camere a fissione) va estratta e riposta nell'approccio alla potenza nominale; ne segue che, a seconda del posizionamento, va concepito un sistema di movimentazione rapido, efficace e sicuro. I SPND possono essere posizionati i maniera fissa, perché non si richiede la loro rimozione durante le variazioni di potenza del reattore.

È stata sviluppata una concettualizzazione delle innovazioni applicabili alla strumentazione di tipo SPND a risposta pronta, delineando disegni innovativi che saranno approfonditamente studiati nel prosieguo del lavoro. La disponibilità del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può consentire lo studio delle principali caratteristiche di prestazione degli strumenti commerciali e innovativi, garantendo così una preziosa e indispensabile esperienza sperimentale.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2014/196.

La sicurezza ed il controllo della reattività (condizione stabile) nei reattori a metalli liquidi devono essere garantiti in ogni condizione di esercizio e di incidente. In tale ambito è stato studiato il fenomeno della "core compaction" che rappresenta uno degli eventi base di progetto. Tale fenomeno è ad oggi poco noto, in base a quanto evidenziato dall'analisi dello stato dell'arte e messo in luce nelle attività svolte nell'ambito delle precedenti annualità.

Lo scopo dell'attività è stato analizzare in dettaglio il Cylindrical Inner Vessel e le componenti più importanti, in particolare i "fuel assemblies"- FAs del reattore ALFRED.

A causa dell'elevato onere computazionale legato al dettaglio con il quale è stato realizzato il modello FEM le analisi di transitorio dinamico sono state eseguite su un semi-modello (condizione di simmetria assiale).

L'esecuzione delle analisi dinamiche ha previsto pertanto:

1) Upgrading dei modelli numerici (realizzati mediante l'utilizzo del codice MSC®Marc) sviluppati in maniera preliminare nel corso del PAR2013 con un dettaglio tale da poter rappresentare con maggior accuratezza la propagazione dei carichi dinamici fino ai FAs.
2) Nello studio è stato utilizzato un FRS coerente con l'input sismico usato nel PAR2012.
3) Determinazione delle condizioni al contorno, iniziali e della tipologia di interconnessione delle strutture (vincoli di contatto).
4) L'analisi dinamico-strutturali di modelli geometricamente complessi ha previsto l'esecuzione di analisi non lineari. Sono state prese in considerazione le condizioni di contatto che si ritengono possano influenzare il comportamento dinamico delle strutture mediante fenomeni di vibrazione e/o di natura hertziana.

I risultati, in termini di spostamenti, tensioni, e accelerazioni, indotte dalla sollecitazione sismica (FRSy= 0,28g e FRSx,z~ 0,26 a fronte di un PAG 0.3 g assunto nel PAR 2012) hanno evidenziato una deformazioni localizzata di alcuni FAs, dell'inner vessel e dell'upper plate.

L'entità dello spostamento orizzontale è risultato dell'ordine di qualche centimetro mentre nel piano verticale è stata osservata una inflessione (buckling in condizione di compressione multipla).

Inoltre l'andamento delle tensioni evidenzia che:

- una deformazione plastica limitatamente estesa interessa i FAs posizionati nel settore periferico radiale;
- criticità nel design dell'inner vessel (messe già in evidenza nel PAR 2013) in corrispondenza dei bocchelli delle tubazioni primarie;
- deformazione della parte superiore dell'upper plate e dell'ICV.

L'analisi ha messo in luce le problematiche ancora aperte, i cui aspetti più importanti sono sintetizzabili in: analisi del sistema di bloccaggio dei FAs, dei sub-assembly, influenza delle forze e tipologie di contatto esistenti (nel PAR 2014 descritte con il metodo di Coulomb), delle vibrazioni, e influenza delle variazioni delle proprietà del materiale la variazione radiale e assiale della temperatura.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/197.

a.3 Rilascio e migrazione prodotti di fissione

Relativamente allo studio dell'interazione tra combustibile, prodotti di fissione e refrigerante in sistemi LFR, in continuità con quanto ottenuto nei precedenti PAR, si è conclusa la valutazione di metodi teorici per la stima di parametri termodinamici necessari per la valutazione della composizione all'equilibrio termodinamico del sistema fuel-coolant. In particolare, sono stati individuati tre metodi semi-empirici (Miedema e sue estensioni, Witusiewicz-Sommer, legge di Kopp e sue modificazioni) per la stima dell'entalpia di formazione e soluzione di composti binari e ternari, ossidi e intermetallici, con buona accuratezza, e dell'entropia e del calore specifico di composti binari intermetallici seppur con un minor accordo col dato sperimentale. Non sono stati tuttora individuati metodi per la valutazione dell'entropia e del calore specifico nel caso di ossidi e composti ternari. Parallelamente è stata valutata la stima dei medesimi parametri applicando la teoria del funzionale di densità (DFT) combinato con l'approssimazione del gradiente generalizzato (GGA). L'approccio DFT-GGA è stato applicato allo studio delle proprietà termochimiche in fase gas con Gaussian09 e in fase cristallina mediante l'utilizzo del codice VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package), avvalendosi del supporto del centro di super-calcolo CINECA. I risultati ottenuti mostrano come l'approccio DFT, seppur con un maggior onere computazionale, sia più accurato dei metodi semi-empirici. L'attività svolta nei diversi progetti PAR ha ulteriormente confermato la convinzione che la chimica quantistica computazionale può essere un valido strumento per studiare in maniera semi-sistematica composti attinidi di interesse in ambito nucleare. Il lavoro svolto ha evidenziato come una delle principali criticità sia la mancanza di informazioni termochimiche sperimentali con le quali validare i metodi teorici proposti e definirne il livello di accuratezza.

Grazie alle informazioni termodinamiche stimate con i metodi sopra descritti, è stato implementato un database che è stato utilizzato per la valutazione della composizione all'equilibrio termodinamico del sistema fuel-coolant mediante un codice di tipo SOLGASMIX-PV basato sulla minimizzazione dell'energia libera di Gibbs del sistema. Sono stati studiati, alle temperature di interesse per i casi di funzionamento nominale ed incidentale ULOF, sistemi semplificati quali sistemi binari come Pb e combustibile metallico, Pb e combustibile ossido fresco, fino ad arrivare a considerare sistemi più complessi quali Pb e MOX (ossido misto di U e Pu) fresco ed irraggiato. Il sistema Pb-MOX irraggiato è stato simulato aggiungendo al MOX La, Cs e Sr, quali rappresentanti dei prodotti di fissione che si generano nel fuel. Al fine di operare un continuo controllo sulle previsioni teoriche, i composti individuati dal codice come presenti nel sistema all'equilibrio termodinamico sono confrontati con i diagrammi di fase sperimentali, se disponibili in letteratura. I risultati ottenuti sui sistemi binari più semplici sono incoraggianti, poiché coerenti con le informazioni che si possono ricavare dai relativi diagrammi di stato. Lo studio dei sistemi più complessi ha invece evidenziato delle limitazioni del codice, ed in particolare l'incapacità di descrivere i composti non stechiometrici e quelli che decompongono, come è il caso degli ossidi di Pu, che impedisce pertanto lo studio dei sistemi contenenti MOX. L'attività condotta ha comunque dimostrato come l'analisi termodinamica rappresenti uno strumento efficace che consente di ricavare rapidamente informazioni sulla stabilità chimica del sistema oggetto di studio.

Si è condotto uno studio preliminare delle caratteristiche di una facility per l'esecuzione di prove sperimentali in piombo fuso con sostanze chimiche in grado di riprodurre il comportamento chimico-fisico di elementi e composti presenti nel combustibile nucleare irraggiato, con particolare attenzione alla preparazione dei campioni e alle tecniche analitiche da utilizzarsi per ricavare informazioni circa l'interazione chimica del sistema.

Inoltre, al fine di ottenere informazioni sperimentali utili alla validazione degli approcci teorici sopra descritti, sono state definite esperienze di tipo sperimentale volte alla determinazione di parametri termodinamici, non disponibili in letteratura, ma di interesse per lo studio dell'interazione chimica tra combustibile e refrigerante in reattori veloci refrigerati con piombo liquido. In particolare, si è valutato lo studio dei sistemi La-Pb e Sr-Pb mediante calorimetria a scansione differenziale (DSC), con l'obiettivo di determinare il calore specifico, non disponibile in letteratura, di alcuni loro composti intermetallici. A tal fine, sono stati scelti i materiali (forma fisica e purezza), le condizioni di preparazione dei campioni (atmosfera inerte, proporzioni tra reagenti e temperature di reazione) e le tecniche analitiche più adatte ad ottenere l'informazione desiderata e ad effettuare i dovuti controlli.

Relativamente alle prove di solubilità di prodotti di fissione volatili nel piombo fuso e rilascio dal medesimo, sono state realizzate esperienze con cloruro di cesio, ioduro di cesio e cloruro di stronzio.

Relativamente ai materiali usati per la cattura dei prodotti di fissione volatili, il MOF-5 [Metal Organic Framework, formula chimica: $Zn_4O(C_8H_4O_4)_3$] è stato preparato secondo uno dei metodi descritti in letteratura, operando sotto cappa chimica a temperatura ambiente. Ai fini di una completa caratterizzazione, sono state eseguite le seguenti

analisi: SEM-EDS, spettro XRD, spettro RAMAN, termogravimetria. I risultati delle suddette analisi sono in linea con quanto riportato in letteratura. Inoltre, i risultati dei primi esperimenti volti a determinare la capacità di "cattura" del MOF-5 nei confronti dello iodio volatile rivelano che la molecola è in grado di trattenere una quantità di iodio pari al 100% del proprio peso, vale a dire un ordine di grandezza maggiore rispetto alle zeoliti comunemente impiegate allo scopo, confermando in tal modo alcuni dati di letteratura.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/198.

b. Materiali e Fabbricazioni

b.1 Qualifica, modellazione e analisi di coating e materiali strutturali per sistemi LFR

Il piombo e la lega eutettica piombo-bismuto ad alta temperatura sono molto corrosivi per gli acciai e la compatibilità degli acciai con il piombo liquido rappresenta il problema principale nello sviluppo di sistemi che impiegano questi refrigeranti.

Una tecnica per la protezione della corrosione per gli acciai inossidabili adottata nei reattori ad uso militare sviluppati in Unione Sovietica si basa sul controllo dell'ossigeno disciolto nel metallo fuso: mantenendo la concentrazione di ossigeno attorno al valore 10^{-6} wt% si mantiene uno strato di ossido superficiale di ferro e cromo che limita a valori trascurabili i tassi di dissoluzione dei componenti dell'acciaio.

Il controllo della concentrazione dell'ossigeno disciolto per la protezione dalla corrosione è tuttavia di difficile applicazione a reattori di potenza per usi civili poiché comporta il non facile compito di monitorare il contenuto di ossigeno e mantenerlo a valori dati su volumi molto grandi con geometrie estremamente complicate. Inoltre la tecnica non è efficace per temperature superiori ai 450 °C, poiché a queste temperature c'è un cambiamento nei meccanismi di corrosione e si osservano gravi attacchi.

E' quindi necessario adottare delle misure aggiuntive per proteggere quelle parti del reattore come le camicie del combustibile, wrappers e spacers che potrebbero raggiungere temperature fino a 650°C. In questa direzione, seguendo un approccio consolidato per la protezione dei materiali dalla corrosione, si stanno sviluppando trattamenti superficiali e rivestimenti al fine aggiungere la resistenza alla corrosione a materiali dalle proprietà note e codificate dalle normative internazionali per impieghi nucleari.

Nei precedenti PAR è stata avviata un'attività sperimentale volta allo sviluppo di ricoperture per la protezione dei materiali strutturali da metallo liquido pesante. L'attività sperimentale si è concentrata su due linee di attività, la prima su rivestimenti passivanti basati su leghe Fe-Cr-Al, la seconda su rivestimenti multistrato costituiti da un deposito intermedio di buffer basato su leghe FeCrAl e FeCrAlY e da un rivestimento esterno di Al_2O_3.

Sintesi di rivestimenti

Si è proceduto alla messa a punto del processo di deposizione di rivestimenti allumina *former* attraverso:

1) Termospruzzatura: deposizioni HVOF (High Velocity Oxy Fuel) di rivestimenti FeCrAlY
2) Diffusion coating*:* alluminizzazioni per *pack cementation*

Si è poi realizzato il rivestimento di provini col protocollo ottimizzato per attività di caratterizzazioni e testing.

Per la ottimizzazione dei parametri di deposizione per termospruzzatura, la campagna sperimentale ha considerato la messa a punto delle proprietà del rivestimento critiche per la sua prestazione in esercizio (protezione da corrosione in bagno di piombo), quali assenza porosità e controllo delle tensioni residue, lavorando su alcuni parametri di processo quali pressione nella camera di combustione, barrel, distanza substrato/barrel. I rivestimenti per termospruzzatura sono stati eseguiti impiegando polveri FeCrAlY disponibili sul mercato. A seguito della deposizione è stata verificata la possibilità di eseguire lavorazioni standard di rettifica dei rivestimenti termospruzzati per ridurne la rugosità. Sono stati quindi prodotti provini da sottoporre a successivo testing.

Relativamente ai processi di alluminizzazione per pack cementation, è stata eseguita una campagna di ottimizzazione dei parametri di alluminizzazione su due substrati in acciaio, T91 e 15-15 Ti. Per entrambi i substrati obiettivo delle campagne sperimentali è stato realizzare il desiderato arricchimento superficiale in Al rendendo il trattamento di diffusion coating compatibile con il ciclo di trattamento termico dell'acciaio. E' stata quindi variata la composizione della miscela di alluminizzazione in termini di precursore Al e percentuale del sale attivatore. Quali precursori di Al sono state utilizzate leghe di Al al fine di produrre rivestimenti a bassa attività, caratterizzati da minore fragilità. E' stato valutato l'effetto della preparazione superficiale del substrato sulla rugosità finale del rivestimento alluminuro.

Il trattamento di alluminizzazione per il substrato T91 per 12 ore a 750 °C ha prodotto uno strato spesso complessivamente circa 15 μm composto da uno strato esterno FeCrAl ed uno strato interno per diffusione nel substrato. Il trattamento di alluminizzazione per il substrato 15-15 Ti per 45 min a 1050 °C ha prodotto uno strato spesso complessivamente circa 80-100 μm composto da uno strato esterno FeCrAl ed uno strato interno per diffusione nel substrato.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/199.

Riguardo alla linea di sviluppo di rivestimenti compositi Al_2O_3 amorfa/nanocristallina mediante tecniche di deposizione per ablazione laser (PLD) si è provveduto:

- allo sviluppo dei rivestimenti su supporti cilindrici. Nell'ambito delle precedenti annualità era stato progettato e realizzato un portacampioni manipolatore, finalizzato alla deposizione di rivestimenti su supporti cilindrici, erano stati quindi prodotti i primi campioni cilindrici rivestiti;
- alla produzione di provini da trazione e provini per prove di corrosione di acciaio DS4 ricoperti

Sono prodotti e sottoposti a diverse prove differenti tipi di campione. I cilindri di 15-15Ti, ricoperti di di Al_2O_3 1 μm) con e senza un buffer layer di 400 nm di FeCrSi, sono stati sottoposti a prove di corrosione, a 550 °C per 1000 h in condizioni "dissolutive". In entrambe i casi non si osserva corrosione. Con il buffer layer una certa quantità di Pb rimane aderente al cilindro, senza buffer layer questa quantità è trascurabile.

Sono state effettuate prove di ciclaggio termico; considerando anche le prove di corrosione in Pb stagnante su piattine, risulta che il buffer layer, che era stato introdotto per accomodare la differenza di dilatazione termica tra film e substrato, in realtà costituisce un punto di debolezza; le prestazioni migliori si ottengono senza il buffer layer, se la preparazione dei substrati è ottimizzata.

Sono stati prodotti i campioni per le prove di corrosione in Pb presso ENEA; le prove sono state effettuate, la post analisi dei campioni è in corso.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/200.

Relativamente alla caratterizzazione di materiali strutturali ricoperti, la campagna sperimentale è stata volta alla caratterizzazione microstrutturale e meccanica delle seguenti tipologie di campioni:

- rivestimenti PLD di allumina su substrati in acciaio 316, 316L e 15-15 Ti (lamierini e substrati cilindrici), con e senza buffer layer (FeCrAlY, FeCrSi), as-deposited, sottoposti a ciclaggi termici in Ar, sottoposti a irraggiamento con ioni pesanti (16 dpa) sia a temperatura ambiente che a 550°C;
- campioni Al2O3(RF sputtering)/FeCrAl (arc-PVD)/ 316 sottoposti a irraggiamento con ioni pesanti (16 dpa) sia a temperatura ambiente che a 550°C;
- rivestimenti di FeCrAlY (HVOF)/acciaio testimone;
- Diffusion Coating ottenuti via Pack Cementation su 15-15 Ti e T91 realizzati da CSM.

Sono state condotte analisi SEM/EDS e XRD su campioni 5 μm Al_2O_3 (PLD)/ 500 nm FeCrAlY/316 e Al_2O_3(RF)/ FeCrAl (arcPVD)/ 316 as-deposited e sottoposti a irraggiamento con ioni pesanti. Dalle caratterizzazioni SEM/EDS è risultato che nei campioni PLD l'irraggiamento a RT causa la rimozione del rivestimento con esposizione del substrato in acciaio in alcune zone di dimensioni di circa decine di μm invece a seguito dell'irraggiamento a 550 °C non sono presenti zone in cui il rivestimento di allumina è stato rimosso. L'analisi XRD ha rilevato la presenza di diverse fasi cristalline nei rivestimenti PLD di allumina irraggiati non presenti nel rivestimento as-deposited: Al_2O_3 (romboedrica), γ-Al_2O_3 (cubica) ed δ-Al_2O_3 (tetragonale) a seguito dell'irraggiamento a RT e corindone (romboedrica), γ-Al_2O_3 (cubica), e Al_2O_3 (cubica) a seguito dell'irraggiamento a 550°C. L'analisi XRD su campioni irraggiati a 550°C e a RT ha rilevato inoltre un picco molto intenso a circa 2q circa 46° non identificato nella procedura di search match e che non corrisponde a nessuna delle fasi cristalline costituite da Al e O; Fe e Cr; Fe e Al; Fe, Cr e Al, le cui schede JCPDS sono registrate nella database PCPDFWIN.

Dalle analisi SEM/EDS e XRD condotte sui campioni Al_2O_3(RF)/ FeCrAl (arc PVD)/ 316 è risultato che l'irraggiamento non modifica in modo significativo la microstruttura del rivestimento di Al2O3 e che non ha influenza sulle fasi presenti nel campione as-deposited. In dettaglio l'allumina rimane amorfa e non subiscono variazioni le fasi cristalline attribuibili al FeCrAl identificate dalle schede JCPDS relative a AlCrFe2, AlFe3, AlFe.

Sono state effettuate prove di microdurezza Vickers su campioni PLD di allumina su substrati cilindrici in acciaio 316L e 15-15Ti con e senza buffer layer in FeCrSi, as-deposited e sottoposti a ciclaggi termici in Ar. Dalle prove è risultato che:

- la durezza del campione 5 µm Al_2O_3/316L è maggiore rispetto a quella dell'acciaio 316L, i valori ottenuti per il campione con minor spessore del rivestimento (1µm Al_2O_3/316L) sono invece confrontabili con quelli dell'acciaio;
- a seguito del ciclaggio termico in Ar i campioni mostrano valori inferiori di durezza;
- a seguito del ciclaggio termico in Ar i campioni aventi il buffer layer (1 µm Al_2O_3/200 nm FeCrSi/ 316L ciclato) mostrano valori di microdurezza maggiori dei corrispettivi senza buffer layer (1 µm Al_2O_3/316L ciclato).

Sono state effettuate osservazioni al microscopio ottico di campioni FeCrAlY (HVOF)/acciaio testimone rettificati. I rivestimenti risultano compatti (spessori 100-150 µm) e con la tipica microstruttura dei coating HVOF. Si osserva la presenza di zone scure associabili molto probabilmente alla formazione di ossidi. La superficie superiore mostra un profilo estremamente regolare esito del processo di rettifica.

Sono state effettuate osservazioni al microscopio ottico di:

- Diffusion Coating su 15-15 Ti utilizzando granuli di Al/Co: zona alluminizzata di circa 70-80 µm, presumibilmente il coating risulta maggiormente arricchito in Al nella parte più esterna per uno spessore di circa 20 µm (confermare con eds e microdurezza in sezione)
- Diffusion Coating su 15-15 Ti utilizzando granuli di Al/Cr: zona alluminizzata di circa 50-60 µm, presumibilmente il coating risulta maggiormente arricchito in Al nella parte più esterna per uno spessore di circa 10 µm (confermare con eds e microdurezza in sezione)
- Diffusion Coating su T91 utilizzando granuli di Al/Cr: zona alluminizzata di circa 10 µm. Visto lo spessore ridotto della zona alluminizzata sono necessarie indagini SEM
- Diffusion Coating su T91 utilizzando granuli di Al/Co: zona alluminizzata di circa 20 µm. Visto lo spessore ridotto della zona alluminizzata sono necessarie indagini SEM.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2014/201.

Irraggiamento con ioni pesanti per la simulazione del comportamento sotto irraggiamento neutronico

A completamento delle attività di cui sopra, sono continuate le sperimentazioni volte a simulare il comportamento e la stabilità microstrutturale e dimensionale sotto irraggiamento neutronico mediante prove di irraggiamento con ioni pesanti.

In particolare i campioni ricoperti con Al_2O_3 sono stati irraggiati con ioni Ni fino a 450 dpa, senza significative criccature o delaminazioni. Le indagini TEM e XRD mostrano la progressiva comparsa di picchi attribuibili a Al_2O_3 in fase delta (tetragonale). E' stato sviluppato un modello che permette di interpretare la peculiare evoluzione delle proprietà meccaniche (incremento dei moduli elastici, incremento e poi decremento della durezza) in termini di nucleazione di nanocristalli dall'amorfo, ed evoluzione della frazione cristallina e della dimensione dei nanograni.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/202.

Prove di creep-rupture

Ad integrazione delle attività di caratterizzazione di materiali strutturali ricoperti e operanti in piombo, sono state effettuate prove termomeccaniche a lungo termine di "creep-rupture" su materiali strutturali ricoperti simulando le condizioni operative tipiche del sistema LFR.

In particolare dopo il completamento e la messa in esercizio della sezione di prova in piombo, sono state eseguite delle prove nelle seguenti condizioni del materiale di 15-15 Ti:

- 550°C; 400MPa; in aria;
- 550°C; 558MPa; in aria;
- 550°C; 558MPa; in Pb.

I risultati delle prove sono stati quindi elaborati e confrontati fra loro. L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2014/203.

In continuità con le attività svolte sullo sviluppo della lega austenitica doppio-stabilizzata, è stato fabbricato presso iul Centro Sviluppo Materiali (CSM) un lingotto di acciaio speciale a bassa attivazione, con composizione chimica dettata da ENEA e denominata DS4. Il lingotto prodotto è stato sottoposto ad un processo di laminazione piana a caldo fino ad uno spessore di 20 mm e successivamente a freddo fino ad uno spessore di 15 mm (20% di riduzione a freddo) presso gli impianti pilota del CSM. Tra la laminazione a caldo e quella a freddo è stata eseguita una ricottura di solubilizzazione (1135 °C per 5 minuti) allo scopo di "addolcire" il materiale prima della lavorazione a

freddo.

Due serie di campioni sono state fabbricate, una relativa allo stato solubilizzato, l'altra relativa allo stato incrudito. Scopo della prima fase del lavoro è la valutazione dell'effetto del processo di laminazione a freddo sulla microstruttura e sulle proprietà meccaniche (durezza e trazione) dell'acciaio DS4. La fase successiva prevede la caratterizzazione completa del materiale per ciò che riguarda le proprietà a creep, a corrosione e sotto irraggiamento con Ioni. Sui laminati (sia allo stato solubilizzato che incrudito) si sono eseguite analisi ottiche, prove di durezza HV, prove di trazione.

I risultati mostrano un affinamento della dimensione del grano austenitico a seguito del processo di deformazione a freddo. Tale affinamento è più evidente in prossimità delle superfici esterne e giustifica la maggior durezza lì registrata. La dimensione del grano nel solubilizzato varia da 35 a circa 50 µm e nel laminato a freddo varia da 30 a 35 µm. Tali caratteristiche hanno influito sulle variazioni delle proprietà meccaniche registrate sul materiale prima e dopo la laminazione a freddo.

Nell'ambito del lavoro si è anche provveduto alla realizzazione dei campioni per la caratterizzazione della lega; nello specifico tale caratterizzazione riguarderà le proprietà a corrosione (Pb fluente, 10-5 wt% O_2), la resistenza a creep (sia prove standard creep-rupture nei laboratori del Brasimone che biassiale a 650 °C nei laboratori di Urbana, USA), l'irraggiamento con Ioni e l'interazione con coating PLD allumina amorfa (IIT). Riguardo all'irraggiamento con Ioni è già stato condotto un turno dei tre accordati grazie alla proposta inoltrata a LNL nell'ambito di questo PAR.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2014/204.

b.2 Studi ed esperienze sulla chimica del refrigerante e sulla fabbricazione di componenti

Nell'ambito delle attività del presente PAR, ENEA ha condotto attività relative alla corrosione in piombo statico di acciai di riferimento per sistemi LFR (austenitici 15-15Ti e 316L e ferritico/martensitico T91) e ricoprimenti di interesse (TiN, Ta e quelli a base di Al). Lo studio è effettuato alla temperature di esercizio scelte per il materiale e a concentrazioni differenti di ossigeno nel piombo per valutare l'effetto dell'ossigeno sull'ossidazione e sulla resistenza alla dissoluzione degli acciai.

È stato studiato il comportamento in piombo liquido di rivestimenti di Ta, Al_2O_3 e di TiN in condizioni di alto e basso ossigeno a temperature di 480 e 550°C. Il ricoprimento di Ta è stato ottenuto con metodo CVD da Tantaline (Danimarca), il ricoprimento di Al_2O_3 dall'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) con tecnica PLD e il ricoprimento di TiN dal CSM con tecnica arc-PVD.

Le prove di corrosione in piombo con alta concentrazione di ossigeno sono state eseguite in un forno a muffola senza atmosfera protettiva deossigenante (concentrazione di ossigeno tra 10^{-3} e 10^{-4} % in peso nell'intervallo di temperatura 480-550°C). Le prove di corrosione in piombo con bassa concentrazione di ossigeno sono state eseguite all'interno di capsule dedicate. Le condizioni di basso ossigeno nel piombo sono state raggiunte utilizzando una miscela deossigenante argon/H_2 ottenuta miscelando Ar puro da bombola e H_2 puro prodotto da generatore elettrolitico. La concentrazione di H_2 nella miscela creata è stata stimata al 15%; essa ha permesso di ottenere una concentrazione di ossigeno nel piombo compresa tra 10^{-8} e 10^{-9} % in peso.

Il rivestimento CVD-Ta, depositato su campioni di acciaio, si presenta compatto e con spessore omogeneo di 50-60 µm. Prove in piombo a 480 °C con alto ossigeno e per 1000 ore di esposizione hanno indicato che il Ta possiede scarsa resistenza all'ossidazione. Prove in piombo a 480 e 550 °C con basso ossigeno per 1000 ore non hanno invece mostrato evidenze di fenomeni di ossidazione o dissoluzione del rivestimento. Visto la scarsa resistenza del Ta all'ossidazione, ulteriori prove in basso ossigeno con tempi di esposizione maggiori sono necessarie per verificare l'eventualità di una ossidazione a esposizioni più lunghe.

Per il rivestimento PLD-Al_2O_3 sono state condotte due prove in piombo a 550°C con basso ossigeno e per 1000 ore: la prima riguardante un mono-layer di PLD- Al_2O_3 (spessore 1µm) e la seconda riguardante un double-layer con strato interno di FeCrSi (buffer layer, ottenuto con RF sputtering e spessore 0.4µm) e strato esterno di PLD- Al_2O_3 (spessore 1µm). Le prove non hanno mostrato fenomeni di corrosione o degradazione del rivestimento per entrambe le tipologie di rivestimento. Il rivestimento mono-layer di PLD- Al_2O_3 ha indicato inoltre scarsa bagnabilità da parte del piombo.

Il rivestimento PVD-TiN, depositato su campioni di acciaio, presenta una certa difettosità. Lo spessore del rivestimento, quando presente, è tuttavia omogeneo e pari a 5-10µm. Prove in piombo a 480°C con alto ossigeno e per 1000 ore di esposizione hanno indicato che il TiN subisce un forte assottigliamento dello spessore dovuto ad ossidazione. Prove in condizioni di basso ossigeno sono necessarie per verificare l'eventualità di una ossidazione anche in queste condizioni.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/205.

Relativamente ai fenomeni di corrosione in piombo fluente, si sono considerati alcuni acciai e rivestimenti di interesse per i sistemi LFR: gli acciai austenitici 15-15Ti(Si) e 15Cr-25Ni (DS4) e i rivestimenti Al_2O_3 e TiN. Gli acciai austenitici 15-15Ti(Si) e DS4 sono stati prodotti da OCAS (Belgio) e da CSM rispettivamente; i rivestimenti di Al_2O_3 e TiN sono stati prodotti da IIT e CSM rispettivamente.

Lo studio è stato condotto presso l'impianto a piombo fluente LECOR situato presso il C.R. ENEA Brasimone. L'impianto è un circuito non isotermo a metallo liquido con ramo caldo e ramo freddo disposti in conformazione a "8". Il ramo caldo e il ramo freddo scambiano tra loro calore grazie all'installazione sul circuito di uno scambiatore di recupero (economizzatore). Sul ramo caldo sono installati la sezione di prova e la sezione di riscaldamento, mentre sul ramo freddo sono installati il serbatoio di stoccaggio, il vaso di espansione contenente la pompa di circolazione e lo scambiatore di calore ad aria o refrigeratore.

La sezione di prova è costituita da un ramo flangiato posizionato verticalmente e contenente al suo interno quattro tubi aperti. All'interno dei tubi, campioni cilindrici (8 per tubo) sono impilati verticalmente e tenuti in asse e separati l'uno dall'altro grazie a distanziali. Durante il funzionamento, il metallo liquido, alla temperatura di 550 °C, scorre all'interno dei tubi dall'alto verso il basso lambendo lateralmente i campioni. A monte della flangia è posizionato un sensore per il monitoraggio in continuo dell'ossigeno nel metallo liquido. Inoltre in uscita dal ramo di prova è posizionato un misuratore induttivo di portata.

Sono state eseguite operazioni di messa a punto dell'impianto LECOR e attività preparatorie necessarie per l'avvio della campagna sperimentale sull'impianto. Esse comprendono alcune modifiche meccaniche apportate all'impianto, il lavaggio dell'impianto con soluzione di acido acetico e acqua ossigenata e la riparazione del sensore di ossigeno. Una volta portata a termine la messa a punto dell'impianto, i campioni di acciaio, con e senza ricoprimento, saranno esposti in piombo liquido a 550 °C e con velocità compresa tra 0,3 e 1 m/ e per diversi tempi di esposizione (1000, 4000 e 8000 ore). La data prevista di avvio dell'impianto è ottobre 2015.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/206.

c. Termoidraulica del Refrigerante

c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si è proseguito con le attività di caratterizzazione del Generatore di Vapore (GV) del DEMO-LFR. Il lavoro svolto nella prima fase ha avuto lo scopo di sviluppare un modello RELAP5-3D della facility sperimentale CIRCE in cui è stata installata la sezione di prova HERO (Figura 285).

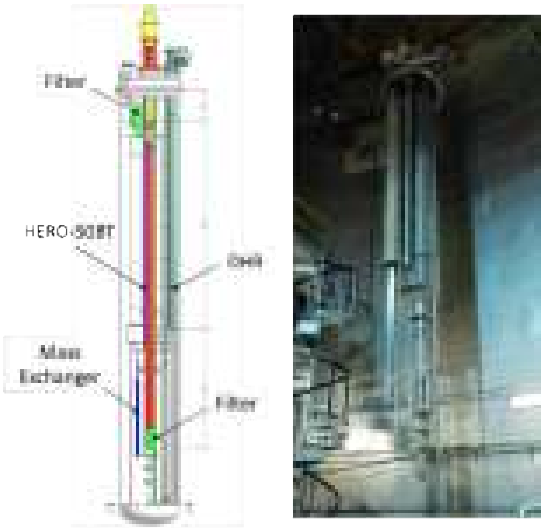


Figura 285. Sezione di prova HERO-CIRCE

Successivamente è stato avviato il commissioning dell'impianto di prova HERO-CIRCE. Il circuito secondario della sezione di prova è stato il maggior focus. In particolare:

- è stato realizzato un design concettuale del secondario basandosi su un ciclo aperto con preriscaldo dell'acqua in pressione di alimento mediante riscaldamento elettrico del tubo stesso (electrical direct heating);
- è stato progettato un tubo di 24 m in geometria spirale da utilizzare per il preriscaldo dell'acqua. La costruzione dello stesso e del suo contenimento è stato affidato a LIMAINOX e il manufatto è stato accettato da ENEA;
- si è provveduto alla scelta di una pompa a pistone (200 bar) dotata di smorzatore di oscillazioni;
- si è provveduto alla scelta di un convertitore AC/DC della potenza 500 kW;
- si è provveduto alla scelta di una valvola di regolazione fine e di due valvole on/of per acqua/vapore ad alta pressione (180 bar, 450°C);
- è stato realizzato un collettore con 7 tubi di uscita, progettato a 450°C e 180 bar;
- è stata selezionata la strumentazione (termocoppie) dell'intero circuito.

Nella prossima annualità si prevede di completare il commissioning del secondario e provvedere alla

progettazione e pianificazione della campagna sperimentale.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/207.

Con riferimento alla caratterizzazione sperimentale del GV prototipico di ALFRED tramite la sezione di prova HERO, uno dei problemi irrisolti è rappresentato dalla misura, con precisione accettabile, del livello raggiunto dalle fasi liquida e vapore all'interno del tubo a baionetta.

Nel PAR2013 si è avviato uno studio teorico e sperimentale per l'applicazione di una nuova tecnica riflettometrica per la misura del livello. Nella presente annualità è stato effettuato lo studio di fattibilità, la progettazione preliminare e di dettaglio per la realizzazione di un impianto di produzione d'acqua satura e vapore saturo per prove sperimentali inerenti applicazioni ad alta pressione e temperatura (fino a 180 bar e 357 °C).

L'impianto VAPORETTO (SWINGER) sarà potrà essere impiegato per:

- test di componentistica termoidraulica di piccola taglia;
- sperimentazione di componenti termoidraulici innovativi;
- sperimentazione di strumentazione/sensori per ambienti ad alta temperatura e pressione;
- sperimentazione di nuovi sistemi di controllo;
- sperimentazioni di termofluidodinamica.

L'impianto potrà essere utilizzato essenzialmente in due modalità fisiche:

- Modo A: loop liquido in pressione: alla sezione di prova può essere prelevato liquido con i parametri di portata, pressione e temperatura previsti dal progetto.
- Modo B: loop mandata vapore-ritorno liquido: per esperimenti di scambio termico con "sorgente calda" a temperatura costante, sfruttando la condensazione del vapore. È possibile variare la temperatura di adduzione e la potenza erogabile come vapore sull'esperimento nei range previsti dal progetto.

Il progetto effettuato ha impiegato la componentistica già disponibile in ENEA: serbatoio a pressione; piping, raccorderia e valvole; patrona scaldante e quadro di controllo; Sensoristica Rosemount p,T, livello; stazione produzione aria compressa ed accumulo.

Su tale base è stato effettuato uno studio di fattibilità e un progetto preliminare e di dettaglio che ha portato alla individuazione della componentistica necessaria per il completamento dell'impianto. Le attività di studio e progetto svolte durante questa annualità sono consistite in:

- Studio di processo;
- Studio del piping;
- Progetto preliminare del software del sistema di controllo;
- Predisposizione acquisti e quotazioni;
- Redazione progetto esecutivo;
- Layout per la posa in opera strutture;
- Layout cablature;
- Progetto preliminare prove di esercizio;
- Valutazione del progetto "chiavi in mano".

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/208.

Relativamente alla sperimentazione termoidraulica a supporto dell'analisi di sicurezza, si è affrontato uno dei principali problemi di sicurezza del progetto di reattore nucleare refrigerato a metallo liquido, che consiste nella rottura dei tubi del generatore di vapore. Tale evento può implicare la propagazione di un'onda di pressione nel vessel principale che può causare, direttamente o indirettamente, il danneggiamento di strutture interne al vessel del primario. In caso di grandi o piccole perdite, il vapore rilasciato dal secondario del reattore, a pressione più elevata, può essere trascinato dal flusso principale verso l'ingresso del core, causando inserzioni di reattività. Un altro aspetto rilevante è il fatto che tale evento potrebbe avere un impatto sul sistema di controllo della chimica del refrigerante primario, compromettendone l'affidabilità ed il buon funzionamento.

L'obiettivo della presente attività è stato quello di progettare e predisporre l'implementazione di un esperimento per testare un sistema capace di identificare in tempo reale la presenza di una piccola rottura nel tubo del generatore di vapore. Tale sistema ha lo scopo di prevenire il prolungato funzionamento del reattore in caso di piccole perdite, o il degradare della piccola perdita in SGTR: quindi diminuire la probabilità di quello che è, ad oggi, considerato l'incidente di riferimento per la sicurezza del reattore LFR.

L'attività consiste nell'up-grade dell'impianto LIFUS5 istallato al centro sperimentale ENEA del Brasimone. Durante il PAR-2014:

- si è progettata la configurazione del nuovo impianto, identificando la strumentazione da installare e il funzionamento, attraverso la simulazione della linea di iniezione con il codice RELAP5 e del sistema interazione con il codice SIMMER-III;
- si è proceduto con l'acquisto di parte della strumentazione necessaria per l'esperimento e si è predisposta ed avviata la gara per la fornitura della sezione di prova e delle modifiche di impianto.

Non si è potuto procedere all'acquisto dei componenti principali dell'impianto poiché la gara indetta da ENEA è stata non aggiudicata per assenza di offerte congrue. Di conseguenza parte delle attività sono state svolte con personale ENEA acquisendo sul mercato quanto disponibile.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/209.

Nell'ambito dello studio delle conseguenze di un evento di Steam Generator Tube Rupture (SGTR), in una configurazione rilevante per reattori di quarta generazione refrigerati a metallo liquido pesante, è stata inoltre svolta l'attività di progettazione della sezione di prova da installarsi nell'apparecchiatura sperimentale a piscina in grande scala denominata CIRCE e la definizione della relativa campagna sperimentale.

L'analisi numerica di pre-test, condotta con il codice SIMMER IV (3D), contribuisce alla progettazione come fonte di rilevanti informazioni per l'esecuzione efficace ed in sicurezza dei test programmati.

Il codice tridimensionale SIMMER IV è definibile un codice CFD coarse mesh. Tale natura richiede un'elevata potenza di calcolo, crescente con il numero delle celle componenti il modello geometrico, in particolare per le analisi di scenari in cui acqua liquida cambia fase interagendo con liquido a minor pressione e maggior temperatura. Le grandi dimensioni dell'apparecchiatura sperimentale CIRCE (d_{int} 1170 mm, altezza 8500 mm) e la complessità della sezione di prova da installarvi (4 fasci tubieri da 31 tubi ciascuno) hanno richiesto, per ottenere risultati in tempi ragionevoli, l'adozione di un modello geometrico semplificato (34020 celle). Nel quale solo i tubi del fascio tubiero oggetto della rottura sono stati modellati.

È stato analizzato l'effetto della rottura del tubo d'acqua del fascio tubiero esterno, rottura cioè in posizione "media". Sono state raggiunte le condizioni iniziali di portata d'acqua di alimento (70 g/s, 200 °C e 16 bar) e di LBE (80 kg/s, 350 °C), per mezzo della calibrazione delle perdite di carico nella linea di alimento, atte a simulare la valvola di regolazione prevista sperimentalmente. Al termine di tale procedura (circa 40 s dall'inizio del transitorio) la rimozione di pareti virtuali (SIMMER IV) ha realizzato l'iniezione d'acqua nella piscina di LBE.

L'acqua evaporando ha pressurizzato il recipiente in pressione CIRCE, con un rateo medio di circa 0,8 bar/s, raggiungendo la pressione di taratura del primo disco di rottura da 2'' (6 bar) a circa 47,5 s. La portata di acqua nella linea di alimento mostra un picco di circa 1,4 kg/s al momento della rottura, stabilizzandosi ad un valore di circa 0,8 kg/s fino alla chiusura dell'alimentazione (a circa 54,5 s). Durante lo scarico dal disco di rottura, da 47,5 a 54,5 s circa, si ha iniezione di acqua/vapore nella piscina di LBE, ciò comporta una lenta depressurizzazione, raggiungendo 5 bar a 54,5 s. La pressione si riduce con un rateo maggiore (circa 0,2 bar/s) in seguito alla chiusura della linea di alimento.

Tali risultati mostrano che a seguito della rottura la pressione di 6 bar nel gas di copertura di CIRCE, corrispondente a circa 12,5 bar sul fondo del recipiente (la cui pressione di progetto è 16 bar), vengono raggiunti in circa 7 min e 5 s. Tale intervallo di tempo è sufficientemente ampio per consentire l'esecuzione dei test senza mettere a rischio l'integrità strutturale dell'apparecchiatura sperimentale CIRCE.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/210.

Relativamente agli studi sull'accoppiamento dei codici di calcolo, è stato svolta un'attività di sviluppo, miglioramento e qualifica preliminare di un'interfaccia software per l'accoppiamento two-way, con schema implicito, tra il codice termoidraulico di sistema RELAP5-3D e il codice di fluidodinamica computazionale ANSYS CFX. L'ultimo contributo a tale attività, in particolare, è consistito nell'applicazione, a fini di verifica e validazione, alla simulazione di esperimenti di circolazione naturale e assistita di metalli liquidi effettuati sull'apparecchiatura sperimentale NACIE (ENEA Brasimone).

Si è inoltre provveduto ad estendere le funzionalità dell'interfaccia di accoppiamento, migliorandone le prestazioni, e ampliandone la base di qualifica. In particolare, si è provveduto a:

- ottimizzare lo schema di accoppiamento per il calcolo parallelo (per quanto riguarda la parte CFD della simulazione accoppiata);

- implementare nuove funzioni sull'interfaccia grafica, per generalizzarne l'utilizzo e consentire un controllo più user friendly del setup del calcolo accoppiato;
- effettuare nuove simulazioni di esperimenti (di NACIE o altra apparecchiatura sperimentale indicata da ENEA) per validare lo strumento.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/211.

Relativamente alla verifica e validazione sull'accoppiamento del codice di calcolo RELAP5/Mod. 3.3 e il codice di fluidodinamica computazionale ANSYS FLUENT, lo scopo del presente lavoro è stato quello di contribuire allo sviluppo e alla qualifica della tecnica di accoppiamento tra un codice di CFD e un codice termoidraulico di sistema.

Il lavoro è stato strutturato in due parti, in quanto come codice di CFD sono stati utilizzati sia FLUENT sia STAR-CCM+, mentre per il codice di sistema è stato utilizzato in entrambi i casi il RELAP5.

Per quanto riguarda STAR-CCM+, sono state eseguite due simulazioni relativamente ad una prova sperimentale di PLOHS+LOF eseguita sull'apparecchiatura CIRCE con DHR. Per la prima simulazione le condizioni al contorno imposte nel codice di CFD sono state estratte dai dati sperimentali. Nella seconda simulazione le condizioni al contorno sono state invece ottenute dai calcoli svolti con il codice di sistema RELAP5 in modo da eseguire un accoppiamento "one-way" tra i due codici.

Il dominio computazionale considerato per il codice di CFD è 2D e assial-simmetrico. Sono state svolte simulazioni preliminari al fine di verificare la corretta implementazione delle condizioni al contorno e per avere un'indicazione iniziale sulla capacità del codice di riprodurre la stratificazione termica. I risultati ottenuti sono in buon accordo con quelli di un precedente lavoro nel quale si è fatto uso dell'accoppiamento "one-way" tra il codice di CFD Fluent e il codice termoidraulico di sistema RELAP5.

Per quanto riguarda il codice FLUENT, sono state effettuate simulazioni accoppiate con il codice di sistema RELAP5 utilizzando la metodologia "two way", già utilizzata per la simulazione di prove sperimentali eseguite sull'apparecchiatura NACIE.

Le simulazioni effettuate in questo lavoro riguardano prove sperimentali di circolazione forzata di LBE per diversi livelli di portata di argon in ingresso al riser (gas lift). Inizialmente è stato messo a punto il modello RELAP5 stand-alone della facility per adattarlo alla configurazione accoppiata.

Il dominio CFD creato ha una configurazione 2D assial-simmetrica e simula la piscina della facility e il DHR. Sono state effettuate diverse analisi riguardanti la sensitività della mesh, e il modello di turbolenza usato. Il miglior compromesso tra dettaglio dei risultati e costo computazionale prevede l'uso di una mesh quasi completamente strutturata con 242500 celle e del modello di turbolenza k-e con "standard wall function". La rimanente parte della facility (circuito ICE + PHX) è stata simulata dal codice di sistema RELAP5.

La notevole differenza con il lavoro di accoppiamento effettuato negli anni precedenti su NACIE risiede nel fatto che il dominio CFD simula adesso un volume molto ampio (pool) con presenza di una cover gas. È stato dunque necessario, oltre ad usare il modello VOF di Fluent per tener conto della presenza del gas, modificare la logica con cui i due codici (Fluent e RELAP5) scambiano tra di loro le variabili termodinamiche (pressioni, temperature e portate) alle interfacce.

Il codice di accoppiamento è stato realizzato tramite un'interfaccia Matlab innovativa che prevede l'uso di Fluent come Server la cui esecuzione viene gestita direttamente tramite appositi comandi da Matlab. In questo modo non si rende più necessario l'uso delle "User Define Functions" (UDF). Ciò comporta la possibilità di non dover chiudere e riavviare Fluent ad ogni iterazione con un notevole vantaggio in termini di velocità di calcolo (stimato in circa 4/5 volte rispetto al metodo precedente).

I risultati ottenuti del sistema accoppiato e del modello RELAP5 stand-alone mostrano un ottimo accordo con i dati sperimentali. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/212.

Per quanto attiene all'accoppiamento del codice di calcolo CATHARE e il codice di fluidodinamica computazionale FEM-LCORE tramite la piattaforma SALOME, sono stati condotti alcuni test inerenti all'accoppiamento dei codici per la simulazione combinata del circuito primario e della regione core-plenum di un reattore nucleare di IV generazione raffreddato con metallo liquido.

Nell'ambito di un approccio multi-scala e multi-fisica viene descritto lo sviluppo di una interfaccia mediante una classe ad oggetti in linguaggio c++ per i moduli tridimensionali FEMLCORE e per il codice monodimensionale di sistema CATHARE che permette il trasferimento di dati da un codice all'altro attraverso un programma supervisore. La soluzione numerica viene ottenuta utilizzando il "defective coupling approach". In questo

approccio il problema viene modellizzato su tutto l'impianto con una maglia monodimensionale che va a sovrapporsi anche sui domini tridimensionale con lo scopo di avere una soluzione del codice di sistema su tutto il dominio indipendentemente dal calcolo tridimensionale. Questa soluzione monodimensionale viene poi corretta nelle regioni sovrapposte mediante sorgenti nelle equazioni della conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Le sorgenti imposte sono quelle necessarie per ottenere un perfetto accordo nei punti di interfaccia dei codici tra i valori medi di ingresso e uscita ottenute dal calcolo tridimensionale FEMLCORE ed i valori da imporre al circuito monodimensionale in CATHARE. Viceversa la soluzione del codice CATHARE genera le condizioni al contorno per il moduli FEMLCORE. I formati di input-output per le griglie computazionali e le soluzioni sono in formato Med, il formato supportato dalla piattaforma SALOME. I dati vengono scambiati ad ogni passo iterativo non lineare e temporale attraverso un codice supervisore scritto in linguaggio C ++ che permette l'estrazione, la conversione e l'introduzione dei dati dai due formati locali in quelli della libreria MEDMED. La generazione delle griglie viene eseguite sulla stessa piattaforma insieme alla visualizzazione dei risultati sia per il codice FEMLCORE che per CATHARE.

Vengono eseguiti due test di accoppiamento. Nel primo test sono stati considerati un semplice reattore tridimensionale con core in geometria cartesiana e circuito primario che consiste di una pompa ed uno scambiatore di calore. Nel secondo test viene considerato un modello di reattore più realistico, con core, plenum inferiore e plenum superiore. Sono stati accoppiati moduli FEMLCORE con modello 3D-CFD e 3D-poroso con moduli monodimensionali di CATHARE AXIAL e VOLUME per ottenere la configurazione desiderata. Il “defective coupling approach” si è dimostrato robusto e stabile permettendo lo studio dei campi di velocità, pressione e temperatura nei domini monodimensionali e tridimensionali e permettendo anche di valutare facilmente la differenza tra il calcolo monofase da solo e il calcolo multi scala accoppiato mono-tridimensionale.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/213.

Relativamente alla validazione del codice CATHARE2, e dato l’interesse verso i sistemi nucleari innovativi raffreddati a metallo liquido (piombo, piombo-bismuto), è stata aperta una collaborazione tra ENEA e CEA che ha riguardato la modifica del codice termoidraulico di sistema CATHARE per simulare reattori raffreddati a metallo liquido pesante. Questo codice nato per LWR (Light Water Reactor) è stato modificato per trattare diverse tipologie di refrigeranti tra cui il sodio, inoltre, fa parte di una piattaforma di simulazione in fase di sviluppo (SALOME) che comprende codici CFD (Computational Fluid Dynamics), codici termomeccanici e neutronici, che in prospettiva potrebbe diventare un riferimento per gli studi di sicurezza anche di reattori innovativi di IV generazione.

Le proprietà termofisiche implementate sotto forma di correlazioni provengono dall’Handbook (2007) di riferimento per le caratteristiche dei metalli liquidi. Questa metodologia lascia spazio a un prossimo aggiornamento delle stesse correlazioni poiché recentemente è stata rilasciata una nuova versione dell’Handbook (2015) in cui le proprietà dei metalli liquidi sono state riesaminate.

In questo contesto ha avuto inizio l’attività di verifica e validazione del codice modificato attraverso il confronto con dati sperimentali provenienti dalla facility Sudcoreana HELIOS, forniti all’interno del benchmark internazionale LACANES, in cui ENEA partecipa con il codice RELAP5, e dalla facility ENEA NACIE. Durante queste attività, CATHARE ha dimostrato buone capacità di simulazione sia in convezione forzata sia naturale.

Nella presente annualità l’attività ha riguardato in primo luogo la verifica degli stati stazionari raggiunti da CATHARE in due test di circolazione naturale a diversa potenza condotti sulla facility HELIOS, anche in confronto con il codice RELAP5. La seconda parte ha riguardato una revisione della simulazione dinamica di un test in circolazione naturale di NACIE (Test 301), già simulata nella precedente annualità e confrontata con i dati sperimentali. In particolare è stata testata l’ultima versione del codice, CATHAREv2.5_3mod2.1, che è la prima versione provvista nativamente delle proprietà termodinamiche dei metalli liquidi pesanti, rilasciata ufficialmente dal team di sviluppo. L’attività è stata svolta da solo personale ENEA.

Il modello di HELIOS, sviluppato in precedenti attività, è stato migliorato ma a causa della mancanza dell’olio come fluido termovettore in CATHARE, il circuito secondario è stato simulato con le condizioni di scambio termico ottenute da simulazioni RELAP5. Il modello è stato calibrato con l’approccio “calorimetrico” suggerito nel benchmark. Le portate di circolazione naturale valutate a 15 kW e 9,8 kW sono risultate in buon accordo con i dati sperimentali. Alcune incongruenze nelle rilevazioni sperimentali, in particolare nei bilanci termici dello scambiatore di calore, porteranno entro breve a nuovi dati sperimentali, anche in vista della chiusura delle attività del benchmark LACANES.

Nella simulazione del Test 301, le principali fonti di incertezza nelle simulazioni riguardavano la mancanza di informazioni sulle procedure di prova, la conducibilità della polvere di acciaio posta nell’intercapedine tra primario

e secondario, e alcune incertezze riguardanti il regime di funzionamento del circuito secondario.

La revisione di alcune perdite di carico concentrate prototipiche, anche supportate da calcoli CFD all'interno del benchmark, hanno portato a una sovrastima della portata di circolazione naturale e quindi a una riduzione sui salti termici nel core e nello scambiatore. La sovrastima della portata risulta comunque in linea con quanto ottenuti dagli altri partner e con altri codici all'interno del benchmark LACANES. Un limite di CATHARE riscontrato in queste simulazioni è l'impossibilità di impiegare l'opzione di stratificazione delle temperature all'interno dei moduli 1D (pipe); il problema potrebbe essere legato all'implementazione dei metalli liquidi e sarà oggetto di indagine. Ciononostante, CATHARE si è dimostrato capace di approssimare sia qualitativamente che in parte quantitativamente gli andamenti delle principali grandezze fisiche rilevate durante il transitorio.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2014**/**214.

Il codice FRENETIC (Fast REactor NEutronics/Thermal-hydraulICs) è stato sviluppato a partire dal 2011 come uno strumento di calcolo per la modellazione dei transitori accoppiati del tipo neutronico/termoidraulico, principalmente nei reattori refrigerati a metallo liquido costruiti in geometria esagonale a fascio di combustibile chiuso.

Un obiettivo fondamentale del codice è di effettuare l'analisi in maniera efficace e con un basso costo computazionale, con una risoluzione utile per gli studi di progetto e le analisi di sicurezza. Il codice comprende due moduli computazionali – il modulo neutronico ed il modulo termoidraulico – i quali, attraverso un meccanismo di accoppiamento, riescono a descrivere l'evoluzione della distribuzione di potenza e della distribuzione di temperatura nel nocciolo del reattore. Il modulo neutronico risolve le equazioni della diffusione multigruppo con neutroni ritardati mediante un metodo nodale ed effettua l'integrazione nel tempo con il metodo quasi-statico. Il modulo termoidraulico risolve le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia per il refrigerante e di conservazione dell'energia per il materiale solido. Il lavoro svolto in questo periodo ha l'obbiettivo di ampliare le capacità del codice di modellare diversi fenomeni fisici e quello di proseguire le attività di validazione.

In particolare, nel modulo termoidraulico sono stati implementati due nuovi modelli. Il primo è un modello per lo scambio termico in una geometria di fascio in cui il refrigerante scorre anche nell'intercapedine costituita da due guaine esagonali e concentriche, nota come «box-in-the-box». Il secondo è un modello per la conduzione radiale del calore nelle barrette di combustibile in cui le equazioni rilevanti vengono risolte con il metodo agli elementi finiti. Questi modelli sono stati validati rispetto a dati sperimentali misurati in un transitorio dell'Experimental Breeder Reactor-II (EBR-II) dell''Argonne National Laboratory, ottenuti nel contesto di un progetto di ricerca coordinata (coordinated research project, CRP) gestito dall'International Atomic Energy Agency (IAEA) e riguardante il benchmark fra diversi codici di calcolo.

Per quanto riguarda il modulo neutronico, è stato sviluppato ed è stato implementato un modello per il calore residuo che viene prodotto dalle reazioni di fissione. Con questo modello, il codice è in grado di valutare il ritardo temporale associato alle variazioni della potenza da fissione. La metodologia sviluppata per risolvere le equazioni rilevanti è compatibile con ognuno dei solutori già implementati (theta-metod, quasi-statico e cinetica puntiforme). La consistenza tra i modelli è stata dimostrata attraverso opportuni calcoli di verifica.

Infine, il codice complessivo è stato applicato all'analisi di un transitorio del reattore EBR-II, sempre nel contesto del CRP dell'IAEA. Il transitorio consiste in una perdita di refrigerante senza SCRAM del reattore, il quale riduce da solo la propria potenza fino a spegnersi per effetto delle controreazioni intrinseche risultanti dalla sua progettazione. In particolare, la simulazione di questo transitorio costituisce la prima attività di convalida accoppiata neutronica/termoidraulica del codice FRENETIC. Nonostante il modello semplificato del reattore, il codice ha dimostrato di essere in grado di modellare correttamente l'evoluzione globale della potenza e della temperatura misurata in alcuni fasci dotati di strumentazione.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/215.

c.2 Studi sperimentali per lo scambio termico nei sistemi LFR e SMR

L'impianto a metallo liquido pesante HELENA (Figura 286) è stato definito e progettato con lo scopo di realizzare una "multipurpose facility" che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo fluente.

In particolare, gli ambiti nel quale si inserisce l'attività di ricerca e sviluppo prevista sull'impianto HELENA, riguardano:

- caratterizzazione scambio termico in sistemi a metallo liquido pesante;
- termo-fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti;
- caratterizzazione componenti prototipici;
- qualifica e caratterizzazione strumentazione;
- qualifica e validazione codici di calcolo di fluidodinamica computazionale (CFD);
- qualifica e validazione codici di sistema;
- prove di corrosione con controllo dell'ossigeno.

Il nuovo layout, proposto da ENEA permette di recuperare il piombo fluente dalla baderna della pompa meccanica di circolazione dell'impianto. Tale upgrade consentirà il funzionamento continuativo dell'impianto stesso senza arresti tecnici per il reintegro del piombo perso.



Figura 286. Impianto HELENA

Sono state individuate una serie di upgrade da implementare sull'impianto HELENA per garantirne il corretto funzionamento e migliorare la strumentazione ed il processo. Tali migliorie verranno implementate nel corso della prossima annualità. Quindi verrà messo in esercizio HELENA con I primi test sulla pompa di circolazione. A seguire verrà progettato, realizzato ed implementato un sistema di controllo per l'ossigeno nei loop (OCS) a metallo liquido pesante fluente

Il sistema porterà una notevole innovazione nella gestione delle facility e permetterà di tenere sotto controllo I parametri chimici del sistema in relazione anche alla formazione ossidi (operabilità impianti) e prove di corrosione (parametri di caratterizzazione)

Una volta installato l'OCS, si procederà a prove di corrosione materiali caratterizzate con una misura del tenore di ossigeno disciolto.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/216.

Relativamente all'impianto a metallo liquido pesante NACIE-UP, progettato con lo scopo di realizzare una "multipurpose facility" che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo-bismuto (LBE) fluente, si è provveduto ad un upgrade dell'esistente impianto NACIE (Figura 287), di cui rimane integro il vaso di espansione e tubazioni collegate, ed il circuito ausiliario a gas. In particolare, gli ambiti nel quale si inserisce l'attività di ricerca e sviluppo prevista sull'impianto NACIE-UP, riguardano:

- caratterizzazione scambio termico in sistemi a metallo liquido pesante;
- termo-fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti;
- caratterizzazione componenti prototipici;
- qualifica e caratterizzazione strumentazione;
- qualifica e validazione codici di calcolo di fluidodinamica computazionale (CFD);
- qualifica e validazione codici di sistema.



Figura 287. Facility NACIE-UP

Il report completo [RdS/PAR2014/217] documenta l'upgrade dell'impianto e descrive i test sperimentali effettuati sull'impianto nel corso del 2015. Una ampia matrice di prova è stata portata avanti per la caratterizzazione dello scambio termico nel Fuel Pin bundle Simulator da 250 kW-19 pin installato. Il bundle è un mock-up elettrico del fuel assembly di MYRRHA ed è strumentato con circa 80 termocoppie per la misura di temperature di parete, di fluido e coefficienti di scambio. Nel rapporto è anche documentato l'algoritmo di post-processamento ed analisi di errore messo a punto per estrarre al meglio le informazioni scientifiche più rilevanti. I risultati sono stati interpretati alla luce della procedura di post-processamento.

Sono stati effettuati anche i primi test di transizione dalla circolazione assistita alla circolazione naturale. Sia questi ultimi test che l'intera matrice di caratterizzazione del FPS verrà ripetuta nel corso del 2015-1016 a seguito di un ulteriore up-grade migliorativo dell'impianto.

È stato inoltre un ampio studio di fluidodinamica computazionale (CFD) sulla sezione di prova, effettuato in fase di

pre-test nell'identico range sperimentale di portate. Lo studio ha permesso una caratterizzazione preliminare del FPS e l'implementazione di alcune modifiche della matrice di prova sperimentale.
Il modello CFD include i dettagli del filo avvolto e considera lo scambio termico coniugato convettivo/conduttivo sul wrap di acciaio del FPS. Si adotta un modello di turbolenza con risoluzioni alla parete spinte e 35 milioni di nodi alla massima portata prevista di 7 kg/s. Il modello risulterà utile anche nella fase di post-test dei risultati sperimentali.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporti RdS/PAR2014/217 e RdS/PAR2014/218.

Infine, la facility a metallo liquido pesante SOLIDX (SOLIDification eXperiment) è stata definita e concettualizzata con lo scopo di realizzare una prima apparecchiatura che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo fluente, investigando il fenomeno del congelamento del metallo liquido. La facility utilizzerà direttamente il piombo come fluido, lavorando quindi a temperature elevate a cavallo dei 330 °C (Temperatura di congelamento).

La facility SOLIDX è stata concettualizzata secondo lo schema riportato nel P&ID (Figura 288). I dettagli della fornitura vengono descritti attraverso i sottosistemi principali:

- Il serbatoio di prova strumentato S100;
- Il sistema di fill&drain composto da:
- linea di fill&drain
- valvola V101 linea drenaggio;
- serbatoio di stoccaggio S200.

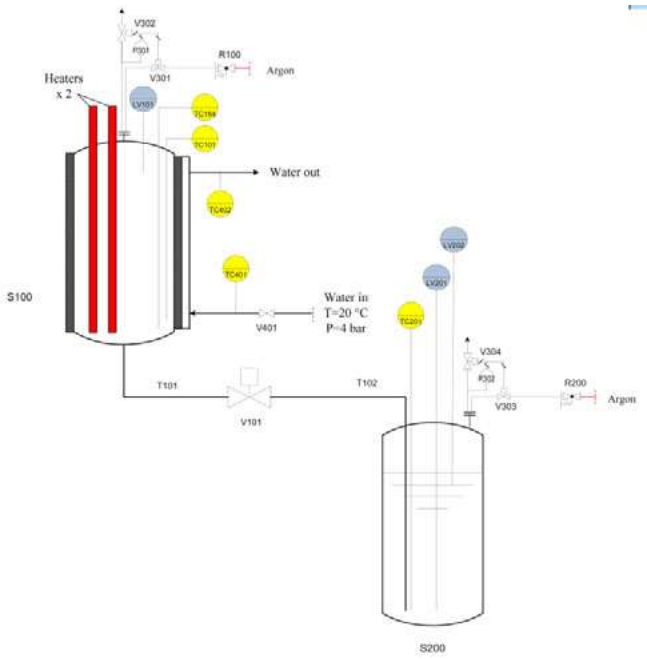


Figura 288. P&ID Facility SOLIDX

Il serbatoio di prova S100 costituisce la vera e propria sezione di prova all'interno del quale verrà congelato il piombo durante la campagna sperimentale. Il serbatoio è composto da tre tubi concentrici con il piombo all'interno del tubo di diametro inferiore e della polvere di acciaio nel primo gap. Il gap esterno è invece refrigerato con acqua alla pressione di rete. La presenza simultanea di 2 canne scaldanti da 2500 W poste in posizione asimmetrica e di 4 settori refrigerabili separatamente, consentono un a grande varietà di condizioni sperimentali. 64 termocoppie poste su 16 livelli monitorano il fluido internamente e consentono di stabilire con buona approssimazione la posizione del fronte di solidificazione. Una specola posta sulla flangia superiore consentirà di potere osservare il pelo libero del piombo. La facility è stata progettata in modo da essere completamente smontabile con la strumentazione termocoppie appoggiata a tubi pieni saldati alla flangia superiore. In tal modo si garantisce la facilità di gestione e di upgrade.

La facility sarà assemblata e resa operativa prima della fine del 2015. Nel corso della presente annualità sono stati acquisiti i componenti per il quadro di acquisizione e controllo DACS, ed è stata definita la logica di controllo per operare sulla facility e realizzare le prove sperimentali.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2014/219.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Nell'ambito dell' AdP ENEA-MSE, è stato organizzato da ENEA, un Workshop Nazionale ad accesso libero dal titolo "LFR-Gen IV: Stato attuale della tecnologia e prospettive di sviluppo" finalizzato a :

- analizzare lo stato attuale della tecnologia dei sistemi LFR partendo dal lavoro svolto in ambito ADP;
- supportare la programmazione delle attività future, definendo le priorità di intervento in ambito italiano ed europeo;
- armonizzazione le strategie di sviluppo mediante l'incontro di tutti gli stakeholder italiani.

Il Workshop ha quindi condiviso lo stato dell'arte dei sistemi LFR tra gli stakeholder italiani definendo al contempo, in maniera condivisa e sinergica con il contesto Europeo, le linee di intervento future in ambito LFR.

Nell'ambito del workshop sono state discusse tutte le questioni di maggior rilevanza per la progettazione e implementazione dei sistemi LFR/ADS, spaziando dalla progettazione del nocciolo, al combustibile nucleare, alla componentistica nucleare, alla chimica del refrigerante, alla termoidraulica e all' analisi di sicurezza.

Inoltre, nell'ambito del ciclo di convegni tematici sulla Ricerca di Sistema Elettrico, iniziativa ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA volta a diffondere e rafforzare la conoscenza dei risultati ottenuti dalla ricerca di sistema nel triennio 2012-2014, si è organizzato a Roma un workshop tematico dedicato all'industria dal titolo "Reattori di IV Generazione e sicurezza nucleare".

L'evento ha avuto un ampio successo, con 122 partecipanti, tra cui alcuni rappresentati delle maggiori industrie nel settore tecnologico del Paese (ENEL, SOGIN, ANSALDO).

Il materiale è presente sulla pagina web:
http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/events/rds_sicurezzanucleare_ 11set15/IV-Generazione

Le attività relative alla diffusione sono descritte nel report RdS/PAR2014/220.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

A livello nazionale, l'ENEA ha rapporti di collaborazione con le principali Università ed Enti di ricerca. Per quanto riguarda le attività finanziate dal MiSE in ambito AdP, le università appartenenti al CIRTEN (Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare) sono tutte impegnate, per loro competenza ed in qualità di enti co-beneficiari, a collaborare con ENEA in varie tematiche di ricerca, come si può verificare entrando nei dettagli della vasta documentazione redatta ogni anno come sintesi conclusiva di quanto prodotto in ogni annualità progettuale. Altro attivo e importante partner, che in ambito AdP-PAR-LP1 è inquadrato come sub-contraente, è la SIET (Società Italiana Esperienze Termoidrauliche).

LINEA PROGETTUALE 1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Fermo restando che il lavoro dei soggetti esterni è già incluso nelle descrizioni riportate nei capitoli precedenti, in quanto integrato nell'insieme delle attività, in questa sezione si indicano le task e le specifiche tematiche in cui i soggetti esterni sono stati coinvolti e si evidenzia il loro specifico contributo. Per ciascuno di questi soggetti viene fornita una breve sintesi delle attività ad essi affidate e dei relativi risultati ottenuti.

CIRTEN

L'impegno del Consorzio CIRTEN per lo sviluppo del programma di ricerca concordato e coordinato con quello dell'ENEA in questa terza ed ultima annualità del PT 2012-2014, comprende l'attività svolta presso le seguenti Università: Politecnici di Milano e Torino, Università di Bologna, Palermo, Pisa e Roma "Sapienza".

CIRTEN è stato coinvolto in task e tematiche degli obiettivi b e c, come di seguito descritto.

b. Metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali»

b.1 Analisi incidentale e valutazioni di sicurezza per reattori BWR e PWR di centrali prossime ai confini nazionali

Le attività con contributo CIRTEN hanno riguardato:

1. Calcoli di inventari di nocciolo per le centrali frontaliere a combustibile misto UOx-MOx e valutazione del termine sorgente in condizioni incidentali severe per alcune sequenze di particolare interesse.
   Sulla base delle attività svolte nelle due precedenti annualità (inventari di nocciolo per le centrali frontaliere) in questa terza annualità si è proceduto al calcolo degli inventari di nocciolo con combustibile di tipo UOx-MOx, con la finalità di stimare rapidamente i possibili rilasci in atmosfera di eventuali incidenti nucleari agli impianti che distano meno di 200 km dal confine nazionale.

2. Valutazione del comportamento di noccioli PWR e del livello di confidenza dei risultati ottenuti con l'uso di codici meccanicistici e/o integrali mediante il calcolo di sequenze incidentali in reattori PWR con riferimento al reattore della centrale di TMI-2.
   A complemento dell'attività svolta nella precedente annualità, sono stati eseguiti calcoli parametrici con l'uso dei codici integrali ASTEC (Università di Bologna) e MELCOR (Università di Pisa), con riferimento all'analisi della sequenza incidentale severa di SBLOCA già considerata precedentemente per il reattore TMI-2.

3. Studio integrale di sequenze incidentali con riferimento a centrali prossime ai confini nazionali dotate di reattori del tipo BWR e PWR.
   Nel quadro delle attività svolte nell'ambito delle analisi degli incidenti severi, lo scopo di questo lavoro è stato di studiare, utilizzando il codice MELCOR, transitori severi di interesse con riferimento a reattori frontalieri (PWR e BWR).

b.2 Analisi della risposta di modelli di dispersione e diffusione di contaminanti rilasciati in atmosfera e implementazione della banca dati per valutazioni di sicurezza e supporto alla emergency preparedness – fase 3

Il lavoro di ricerca svolto ha riguardato la valutazioni della risposta di modelli avanzati di dispersione gassosa e diffusione di aerosol e particolati radioattivi per confronto con quelli adottati in Calpuff e Calmet. In questa tematica sono stati svolti studi di valutazione della risposta di modelli avanzati di dispersione per confronto con quelli adottati in Calpuff e Calmet. Le attività svolte hanno riguardato la messa a punto di una procedura che permetta l'uso integrato dei modelli gestiti dal processore Calmet, attraverso l'uso dei pre-processori geofisici e meteorologici TERREL, CTGPROC e MAKEGEO, con i modelli dispersivi di Calpuff. Nella seconda fase dei lavori, si è studiato il formato dei dati meteorologici e il modo con cui tali dati sono codificati per il processamento con i programmi READ62 e SMERGE. I database ottenuti attraverso la procedura messa a punto nell'ambito dell'attività svolta costituiscono la base necessaria per la successiva definizione dell'input Calpuff.

b.3 Applicazione di Metodologia PSA e DSA del tipo "Risk-Informed" per la stima del rischio di eventi esterni»

In quest'ambito le attività del CIRTEN hanno riguardato verifiche di sicurezza, attraverso calcoli deterministici connessi alla funzione di contenimento, per valutare la risposta degli impianti all'incidente di riferimento.

A complemento di quanto sviluppato con il PSA e nell'ottica di un approccio integrato probabilistico-deterministico, è stata eseguita una valutazione del "safety margin" dell'edificio di contenimento, che rappresenta l'ultima barriera fisica contro eventuali rilasci di radioattività alla popolazione ed all'ambiente esterno.

c. Sperimentazione e calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza

c.1 Studi relativi alla simulazione integrale di sistema presso gli impianti SIET

Il CIRTEN (Dipartimento Energia, dell'Informazione e Modelli Matematici dell'Università di Palermo) ha sviluppato una versione migliorativa ed ottimizzata del modello di calcolo per il codice TRACE dell'impianto sperimentale SPES-2. La qualità dei risultati ottenuti a mezzo del nuovo modello è stata valutata attraverso un confronto con i dati sperimentali ed i risultati ottenuti nella precedente annualità PAR relativamente al transitorio denominato S01007 test "2" Cold Leg to Core Make-up Tank pressure balance line break". Le nuove simulazioni numeriche hanno permesso di raggiungere risultati soddisfacenti oltre che dal punto di vista qualitativo (come già si era ottenuto nei lavori del PAR2013) anche dal punto di vista quantitativo; ciò è stato possibile grazie all'adozione di nuovi modelli teorico-numerici e di una nuova discretizzazione dell'impianto in esame.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Le attività con contributo CIRTEN sono state programmate nelle seguenti tematiche:

- Sviluppo e qualificazione della strumentazione per i deflussi bifase
  Le attività di ricerca teorico-sperimentale svolte in questa tematica dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino sono state dedicate alla caratterizzazione della strumentazione per la misura della portata in un deflusso bifase. Tale strumentazione, che consiste in uno "Spool Piece" formato da un Venturi per la misura delle cadute di pressione ed una sonda ECP (Electrical Capacitance Probe) per la misura del grado di vuoto, è stata sviluppata per la misura della portate di fuga in simulatori integrati come lo SPES3. La sonda ECP è uno strumento prototipico concepito e testato da SIET nel corso dei PAR precedenti.
- Valutazione di sistemi passivi per la rimozione del calore di decadimento in reattori SMR
  In linea con quanto svolto nel PAR2013, in cui le attività sono state indirizzate al confronto tra scambiatori di calore elicoidali e scambiatori di calore a piastra con microcanali, nel corso di questa ultima annualità è stato svolto uno studio mirato ad un confronto, dal punto di vista termo-idraulico, di generatori di vapore/scambiatori con tubi elicoidali ed a baionetta. Lo studio è stato svolto in collaborazione tra il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino e il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano.

SIET SpA

c. Sperimentazione e calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza

Nell'ambito dellaTask c.2 ENEA ha affidato a SIET l'effettuazione di prove sperimentali finalizzate allo studio del comportamento termoidraulico di uno scambiatore a tubi a baionetta per l'utilizzo su generatori di vapore di reattori SMR (Small Modular Reactor) raffreddati ad acqua [rapporto RdS/PAR2014/141].

La sperimentazione è stata effettuata sulla facility IETI della SIET adattata allo scopo sia per la parte circuito idraulico sia per la parte elettro-strumentale. La costruzione della sezione di prova è stata affidata da ENEA ad SRS, mentre SIET ha provveduto all'approvvigionamento dei riscaldatori elettrici necessari alla generazione di vapore, all'installazione della sezione di prova su apposite strutture di supporto, alla fabbricazione del piping acqua alimento/scarico vapore e alle connessioni elettriche ai generatori di potenza. SIET si è inoltre occupata della predisposizione e taratura della strumentazione e del Sistema di Acquisizione Dati e relativo software, oltre che dei dispositivi di controllo impianto (valvole e regolatori).

LINEA PROGETTUALE 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

a. Progettazione di sistema e analisi di sicurezza

a.1 Progettazione Nocciolo LFR

Il Politecnico di Torino e il Politecnico di Milano hanno collaborato con ENEA allo studio di fattibilità di una campagna di irraggiamenti presso il reattore di ricerca RSV-TAPIRO presente nel C.R. Casaccia dell'ENEA [rapporto RdS/PAR2014/190]. Come citato in precedenza questo studio è stato suddiviso in due parti: la prima parte ha riguardato la caratterizzazione neutronica del reattore TAPIRO attraverso l'utilizzo di diversi codici di calcolo (ERANOS deterministico, Serpent e MCNP Monte Carlo) applicando entrambe le metodologie di calcolo deterministica e stocastica; la seconda parte ha riguardato la schematizzazione di alcuni campioni di attinidi minori prodotti dal CEA, caricati con diversi isotopi e precedentemente utilizzati per la campagna sperimentale francese OSMOSE, utilizzati per la misura delle diverse sezioni d'urto medie mediante l'attivazione dei campioni.

Relativamente allo sviluppo del codice ERANOS, l'Università Sapienza di Roma ha implementato, con la supervisione ENEA, il lavoro di validazione finora svolto nell'ambito dello sviluppo delle tecniche di analisi perturbativa non lineare del campo neutroni/nuclidi fornendo risultati molto promettenti [rapporto RdS/PAR2014/191].

La metodologia per il calcolo perturbativo di funzionali della densità neutronica e di quella dei nuclidi che evolvono durante l'evoluzione (burn-up) del nocciolo è stata sviluppata secondo la teoria delle perturbazioni generalizzate su base euristica (HGPT). Essa viene pertanto definita HGPT-BU e può essere applicata a studi relativi all'evoluzione temporale del campo non lineare neutroni/nuclidi in sistemi critici, o sottocritici. I risultati ottenuti con i vari test eseguiti dimostrano la validità del metodo HGPT-BU per analisi perturbative e di sensitività nel campo accoppiato neutroni/nuclidi.

Relativamente alla progettazione del nocciolo, il Politecnico di Milano e l'Università di Bologna hanno partecipato con ENEA alla completa caratterizzazione neutronica della configurazione di nocciolo ALFRED, così da ricavare gli arricchimenti e le zone di arricchimento che consentano di garantire l'operabilità della macchina per i tempi previsti e nel rispetto dei limiti di progetto.

Il lavoro si è inoltre posto l'obiettivo di definire le caratteristiche di stabilità dinamica del reattore ALFRED. In particolare al Politecnico di Milano si è cercato di costruire una mappa in grado di determinare i confini della zona di stabilità del reattore in funzione di alcune caratteristiche chiave di progetto del medesimo.

I risultati principali del lavoro ha consentito di stabilire le principale caratteristiche dinamiche del reattore e ha fornito utili indicazioni ai progettisti sulle isole di stabilità, fornendo loro dei vincoli, dei limiti e delle performance dinamiche nelle scelte dei diversi parametri progettuali della nuova configurazione di ALFRED [rapporto RdS/PAR2014/192].

a.2 Analisi di sicurezza

Nell'ambito delle attività a supporto alla progettazione del combustibile nucleare, il Politecnico di Milano con ENEA hanno svolto una attività congiunta [rapporto RdS/PAR2014/194]. che come descritto in precedenza ha avuto un duplice obiettivo:

- di aggiornamento del codice di fuel pin performance Transuranus con riferimento alla versione LFR-oriented messa a punto durante il PAR 2013 per l'analisi dei reattori veloci a piombo;
- di carattere applicativo e metodologico (tramite l'impiego di suddetta versione del codice) per la modellazione e l'analisi termo-meccanica delle barrette di combustibile adottate nel reattore a piombo scelto come riferimento (ALFRED), al fine di ottimizzarne il design e le caratteristiche di sicurezza.

L'attività tecnica programmata, in collaborazione con l'Università Sapienza di Roma, è consistita nell'applicazione e nella validazione dell'approccio per l'analisi di sicurezza di reattori veloci di IV generazione basato su modelli sviluppati nel corso delle attività del PAR 2013. In continuità con le attività svolte in precedenza, ENEA e l'Università Sapienza [rapporto RdS/PAR2014/195] hanno portato a termine le seguenti attività:

1. il modello RELAP5-3D©, sviluppato e utilizzato nell'ambito del PAR-2013, è stato migliorato e qualificato.
2. messa appunto di una metodologia per l'analisi del nocciolo di reattori veloci refrigerati a metalli liquidi, mediante codici di calcolo 3D neutronici. Questa è consistita nelle attività di seguito riportate:
   - lo sviluppo di un modello neutronico 3D Monte Carlo del reattore, usando come codice di riferimento MCNP6.
   - Il calcolo delle sezioni d'urto omogeneizzate a 33 Gruppi (i gruppi energetici sono gli stessi usati dal codice di reticolo ERANOS) utilizzando il codice di reticolo sviluppato dal "Oak Ridge National Laboratory" (ORNL) "SCALE".
   - La libreria delle sezioni d'urto è stata poi implementata nel modello 3D sviluppato usando il codice neutronico del "Idaho National Laboratory" (INL) PHISICS.

Per le attività relative alla strumentazione neutronica di monitoraggio dei reattori LFR, partendo dalla strumentazione commercialmente disponibile, l'Università Sapienza di Roma ha proposto miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza delle tecnologie di rivelazione quando applicate ai sistemi veloci a piombo [rapporto RdS/PAR2014/196]. Come riferimento è stato preso il reattore dimostrativo ALFRED, la cui modellazione è stata completata in ogni sua parte, consentendo un calcolo più verosimile di spettri neutronici e gamma nelle posizioni d'interesse per l'installazione degli strumenti.

È stata quindi sviluppata una concettualizzazione delle innovazioni applicabili alla strumentazione di tipo SPND a risposta pronta, delineando disegni innovativi che saranno approfonditamente studiati nel prosieguo del lavoro. La disponibilità del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può consentire lo studio delle principali caratteristiche di prestazione degli strumenti commerciali e innovativi, garantendo così una preziosa e indispensabile esperienza sperimentale.

L'Università di Pisa, relativamente alla sicurezza ed il controllo della reattività (condizione stabile) nei reattori a metalli liquidi ha studiato il fenomeno della "core compaction" che rappresenta uno degli eventi base di progetto [rapporto RdS/PAR2014/197]. Lo scopo dell'attività è stato analizzare in dettaglio il Cylindrical Inner Vessel e le componenti più importanti, in particolare i "fuel assemblies" (FA) del reattore ALFRED.

A causa dell'elevato onere computazionale legato al dettaglio con il quale è stato realizzato il modello FEM le analisi di transitorio dinamico sono state eseguite su un semi-modello (condizione di simmetria assiale). L'analisi condotta ha messo in luce le problematiche ancora aperte, i cui aspetti più importanti sono sintetizzabili in: analisi del sistema di bloccaggio dei FAs, dei sub-assembly, influenza delle forze e tipologie di contatto esistenti, delle vibrazioni, e influenza delle variazioni delle proprietà del materiale la variazione radiale e assiale della temperatura.

a.3 Rilascio e migrazione prodotti di fissione

Relativamente allo studio dell'interazione tra combustibile, prodotti di fissione e refrigerante in sistemi LFR, in continuità con quanto ottenuto nei precedenti PAR, il Politecnico di Milano ha concluso la valutazione di metodi teorici per la stima di parametri termodinamici necessari per la valutazione della composizione all'equilibrio termodinamico del sistema fuel-coolant. L'attività descritta sinteticamente nella sezione precedente è riportata nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/198.

b. Materiali e fabbricazioni

b.1 Qualifica, modellazione e analisi di coating e materiali strutturali per sistemi LFR

Presso il Politecnico di Milano sono proseguite le attività di sviluppo di coating e materiali strutturali per sistemi LFR. Relativamente alla linea di sviluppo di compositi Al_2O_3 amorfa/nanocristallina mediante tecniche di deposizione per ablazione laser, le attività svolte presso il Politecnico di Milano [rapporto RdS/PAR2014/200]

hanno riguardato:

- lo sviluppo dei rivestimenti su supporti cilindrici. Nelle precedenti annualità era stato progettato e realizzato un portacampioni manipolatore finalizzato alla deposizione di rivestimenti su supporti cilindrici.
- la produzione di provini da trazione e per prove di corrosione di acciaio DS4 ricoperti.

I materiali ottenuti sono stati sottoposti a caratterizzazione microstrutturale e meccanica presso l'Università di Treviso [rapporto RdS/PAR2014/201].

Relativamente all'irraggiamento con ioni pesanti per la simulazione del comportamento sotto irraggiamento neutronico, ENEA e il Politecnico di Milano hanno proseguito le sperimentazioni volte a simulare il comportamento e la stabilità microstrutturale e dimensionale sotto irraggiamento neutronico mediante prove di irraggiamento con ioni pesanti [rapporto RdS/PAR2014/202].

c. Termoidraulica del refrigerante

c.1 Sperimentazione e Modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si è proseguito con le attività di caratterizzazione del generatore di vapore del DEMO-LFR in collaborazione con l'Università Sapienza di Roma. Il lavoro svolto, in una prima fase, ha avuto lo scopo di sviluppare un modello RELAP5-3D della facility sperimentale CIRCE in cui è stata installata la sezione di prova HERO [rapporto RdS/PAR2014/207]..

Relativamente agli studi sull'accoppiamento dei codici di calcolo, presso GRNSPG (Università di Pisa) è stata svolta un'attività di sviluppo, miglioramento e qualifica preliminare di un'interfaccia software per l'accoppiamento two-way, con schema implicito, tra il codice termoidraulico di sistema RELAP5-3D e il codice di fluidodinamica computazionale ANSYS CFX. L'ultimo contributo a tale attività, in particolare, è consistito nell'applicazione, a fini di verifica e validazione, alla simulazione di esperimenti di circolazione naturale e assistita di metalli liquidi effettuati sull'apparecchiatura sperimentale NACIE (ENEA Brasimone).

Si è inoltre provveduto ad estendere le funzionalità dell'interfaccia di accoppiamento, migliorandone le prestazioni, e ampliandone la base di qualifica [rapporto RdS/PAR2014/211]. In particolare, si è provveduto a:

- ottimizzare lo schema di accoppiamento per il calcolo parallelo (per quanto riguarda la parte CFD della simulazione accoppiata);
- implementare nuove funzioni sull'interfaccia grafica, per generalizzarne l'utilizzo e consentire un controllo più user friendly del setup del calcolo accoppiato;
- effettuare nuove simulazioni di esperimenti (di NACIE o altra apparecchiatura sperimentale indicata da ENEA) per validare lo strumento.

Relativamente alla verifica e validazione sull'accoppiamento del codice di calcolo RELAP5/Mod. 3.3 e il codice di fluidodinamica computazionale ANSYS FLUENT, l'Università di Pisa ha provveduto allo sviluppo e alla qualifica della tecnica di accoppiamento tra un codice di CFD e un codice termoidraulico di sistema [rapporto RdS/PAR2014/212].

L'Università di Bologna ha collaborato con ENEA alle attività attinenti all' accoppiamento del codice di calcolo CATHARE e il codice di fluidodinamica computazionale FEM-LCORE tramite la piattaforma SALOME [rapporto RdS/PAR2014/213].

Il codice FRENETIC (Fast REactor NEutronics/Thermal-hydraulICs) è stato sviluppato da Politecnico di Torino a partire dal 2011 come uno strumento di calcolo per la modellazione dei transitori accoppiati del tipo neutronico/termoidraulico, principalmente nei reattori refrigerati a metallo liquido costruiti in geometria esagonale a fascio di combustibile chiuso. Nel corso della presente annualità il codice è stato applicato all'analisi di un transitorio del reattore EBR-II, sempre nel contesto del CRP dell'IAEA. Il transitorio consiste in una perdita di refrigerante senza SCRAM del reattore, il quale riduce da solo la propria potenza fino a spegnersi per effetto delle controreazioni intrinseche risultanti dalla sua progettazione. In particolare, la simulazione di questo transitorio costituisce la prima attività di convalida accoppiata neutronica/termoidraulica del codice FRENETIC. Nonostante il modello semplificato del reattore, il codice ha dimostrato di essere in grado di modellare correttamente l'evoluzione globale della potenza e della temperatura misurata in alcuni fasci dotati di strumentazione [rapporto RdS/PAR2014/215].

Attività di fisica della fusione complementari a ITER

Nell'ambito della fusione termonucleare controllata 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). Per sfruttare al meglio la sperimentazione di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno deciso di avviare in parallelo un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare ad ITER.

Il Broader Approach include una serie di attività finalizzate: alla realizzazione di componenti ad alto contenuto tecnologico per la nuova macchina JT60SA; 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 nuovi materiali.

L'Italia partecipa allo sviluppo del Programma Broader Approach, ed in particolare ad ENEA sono state affidate le seguenti attività:

- realizzazione, in collaborazione col CEA francese, del magnete superconduttore di JT-60SA, con la realizzazione di nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete, incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche;
- ricerca e sviluppo per IFMIF-EVEDA che richiedono lo sviluppo di competenze e l'elaborazione di applicazioni innovative nel campo dei metalli liquidi, in particolare per gli aspetti legati alla purificazione e alla corrosione/erosione del litio liquido, della manutenzione remota;
- altre attività di ricerca nell'ambito del programma FAST, il nuovo esperimento satellite europeo, che ha come obiettivo la realizzazione di un esperimento di fusione di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 1983 a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER.

Le attività di ricerca e sviluppo relative al programma IFERC per lo sviluppo di competenze e l'elaborazione di applicazioni innovative nel campo dei metalli liquidi e caratterizzazione di materiali compositi ceramici in matrice e fibra di silicio (SiC/SiC) si sono concluse con la realizzazione di:

- componenti tubolari con sezione prismatica in SiC/SiC secondo il processo CVI (Chemical Vapor Infiltration) e sviluppo di tecniche di collegamento di SiC/SiC su matrice di acciaio;
- una camera sperimentale per prove di erosione-corrosione ad alta temperatura (~1000°C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo. Dopo le operazioni di collaudo, svolte a in ENEA alla presenza di delegati di F4E e JAEA, l'apparato è stato inviato ed installato a Rokkasho (Giappone) dove i tecnici ENEA hanno collaborato al primo avviamento.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Costruzione Tokamak JT-60SA

ENEA è impegnata, in collaborazione con il CEA francese, nella realizzazione del magnete superconduttore di JT-60SA, incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche. JT-60SA si propone di contribuire al rapido sviluppo dell'energia da fusione attraverso lo studio degli aspetti più importanti della fisica di ITER e DEMO.

JT-60SA è un Tokamak superconduttore, raffreddato da elio supercritico alla temperatura di 4,4 K e termicamente isolato da un criostato, che sarà installato a Naka nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U. L'ENEA è responsabile della realizzazione e fornitura di 9 delle 18 bobine toroidali del magnete del Tokamak e di parte degli alimentatori di alta tensione e corrente del sistema elettrico. La realizzazione delle bobine viene eseguita utilizzando la linea di avvolgimento installata nello stabilimento della ASG dove avvengono anche le operazioni di impregnazione, inserimento e chiusura finale nella cassa di contenimento.

Attività di ricerca e sviluppo per IFMIF-EVEDA

Nel Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione della facility di ricerca IFMIF. Componenti principali della facility saranno:

- una sorgente di ioni (tipicamente ioni di deuterio);
- due acceleratori lineari, di grande potenza (complessivamente 10 MW), che accelerano gli ioni di deuterio fino all'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sullo stesso bersaglio (target);
- un target costituito da litio fuso in circolazione forzata ad aita velocità, su cui gli ioni di deuterio accelerati impattano, sviluppando neutroni di elevata energia mediante opportune reazioni nucleari.

L'ENEA partecipa al programma provvedendo allo sviluppo del target per la produzione dei neutroni ad alta energia, alle relative attività di manutenzione remotizzata, allo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione dei metalli in presenza di litio e alla validazione dei sistemi di purificazione per il litio.

FAST il nuovo esperimento satellite europeo

Obiettivo è la realizzazione di un esperimento di fusione denominato FAST di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 198S a Culham, UK) e quelle di ITER (la macchina tokamak che sarà costruita a Cadarache, F.). FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER.

All'interno dello sviluppo del progetto concettuale di FAST verranno analizzati in dettaglio alcune proprietà strutturali del sistema magnetico, le necessarie azioni per l'integrazione della potenza elettrica necessaria a far funzionare l'esperimento, e le principali necessità per il remote handling della prima parete.

Il progetto prevede quattro obiettivi intermedi, corrispondenti alle linee di ricerca citate in precedenza, più un obiettivo specifico relativo ad attività di diffusione dei risultati.

a. Macchina JT-60SA
b. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF
c. FAST il nuovo esperimento satellite europeo
d Comunicazione e diffusione dei risultati

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Macchina JT-60SA

a.1 Fornitura di 9 moduli di magnete di campo toroidale

Nell'ambito delle attività del PAR 2014 l'obiettivo prevedeva la realizzazione completa di altri quattro avvolgimenti di bobina toroidale per un totale di sette e la realizzazione dei primi due moduli di magnete toroidale completi entrambi di prove di accettazione. Il modulo di magnete toroidale è realizzato inserendo l'avvolgimento di bobina all'interno dei componenti della cassa di contenimento. La chiusura della cassa per saldatura, l'impregnazione dell'avvolgimento in cassa (embedding) e le lavorazioni finali di macchina assicurano le caratteristiche di interfaccia richieste dal modulo di magnete per la formazione del sistema magnetico toroidale. I ritardi subiti dalla realizzazione delle casse di contenimento hanno obbligato ad una revisione del programma di attività. Pertanto è stata completata la realizzazione di tutti i nove avvolgimenti di bobina toroidale con le relative prove di accettazione ed è stata avviata l'operazione di inserimento dell'avvolgimento di bobina nella cassa per la composizione del modulo di magnete toroidale.

Il completamento del primo modulo e relativa spedizione alla Cold Test Facility di Saclay, sito francese del CEA, è previsto per la fine del 2015. Nel seguito si descrivono con maggiore dettaglio i risultati conseguiti nella fabbricazione dei 9 avvolgimenti e nell'attività di incassamento del primo modulo.

Avvolgimenti di bobina

Ciascun avvolgimento di bobina (winding pack, WP) è costituito di 6 doppi pancake (DP) a forma di D. Ciascun DP è ottenuto a partire da una lunghezza di circa 226 m di cavo superconduttore in NbTi inserito in una camicia di contenimento in acciaio. L'avvolgimento del singolo DP è svolto in una attrezzatura appositamente progettata costituita da due carrelli su rotaia che possono ruotare rispetto ad un asse verticale e traslare orizzontalmente e che ospitano l'aspo svolgitore e la tavola di avvolgimento a forma di D di elevata accuratezza dimensionale. Su due ponti sono invece installate le attrezzature di piegatura, lavaggio del conduttore, sabbiatura e nastratura. Tutti i



Figura 289. Vista della linea di avvolgimento presso ASG Superconductors S.p.A.

dispositivi montati sulla linea di avvolgimento sono controllati elettronicamente per garantire le tolleranze di manifattura necessarie al corretto funzionamento dei magneti. La Figura 289 mostra la linea di avvolgimento con in primo piano la tavola di avvolgimento con un DP completato in attesa di essere spostato nella successiva stazione di nastratura.

L'esperienza maturata nel corso del 2014 negli avvolgimenti dei 18 DP di serie costituenti i primi 3 WP ha consentito una sensibile accelerazione nel processo di avvolgimento come si può notare in Figura 290 dove è evidente che i tempi di realizzazione del DP sono passati da 20 a soli 5 giorni solari. Analogamente le fasi di impilamento e impregnazione sotto vuoto hanno visto una sensibile accelerazione così come mostrato in Figura 291.

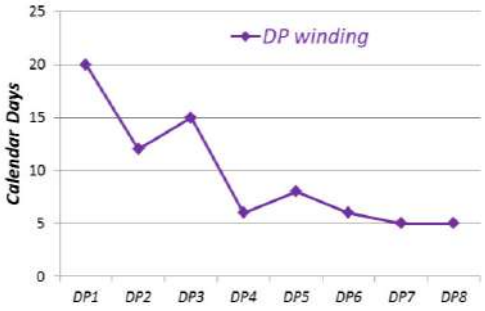


Figura 290. Tempi di produzione di un DP

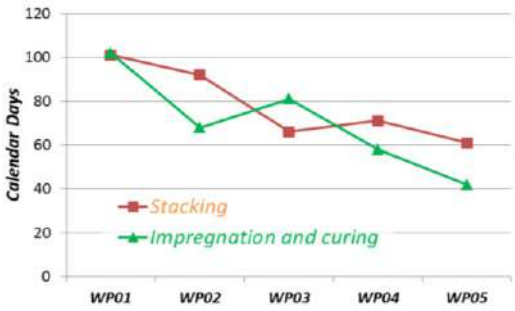


Figura 291. Tempi di produzione impilamento e impregnazione



Figura 292. Un WP viene inserito in camera da vuoto per l'esecuzione del test di tenuta



Figura 293. WP pronto per l'esecuzione dei controlli dimensionali finali

Completata la fase di impregnazione i WP devono essere puliti superficialmente e ricoperti con una vernice conduttiva- A seguire i WP vengono sottoposti ad una serie di collaudi che comprendono tra gli altri controlli di tenuta a vuoto e di Paschen. A questo scopo i WP vengono inseriti in una camera da vuoto appositamente progettata a forma di D con doppio anello di tenuta (Figura 292).

L'ultima fase di collaudo degli avvolgimenti prevede i controlli dimensionali eseguiti con laser tracker che vengono svolti posizionando l'avvolgimento su dei supporti in vetronite (Figura 293). Dai controlli dimensionali risulta che lo scostamento della superficie interna e di quella esterna rispetto alla posizione teorica per un generico WP avvolto. risulta è contenuta entro le tolleranze previste dal progetto e si mantiene nell'ordine di pochi millimetri. Tale analisi è estremamente importante non solo per la verifica delle prestazioni magnetiche dell'avvolgimento di bobina ma anche per preparare lo stesso alla successiva fase di inserimento nella cassa di contenimento. I WP infatti devono essere inseriti nelle relative casse che possiedono un gioco nominale di 5 mm sul profilo esterno e di 10 mm su quello interno. Questo spazio, che è stato introdotto proprio per favorire la fase di inserimento, deve essere altresì compensato con tele di vetro e successivamente impregnato con resina epossidica per conferire al modulo la compattezza necessaria per trasferire i carichi elettro-magnetici sulla struttura di supporto in acciaio austenitico. Come anticipato, scopo primario dei controlli dimensionali

è tuttavia la verifica delle prestazioni magnetiche. Per questo è essenziale che gli avvolgimenti siano il più possibile omogenei dimensionalmente in modo da limitare gli errori di campo magnetico toroidale generati. La figura 294 mostra il confronto eseguito sull'altezza e la larghezza dei primi cinque WP costruiti. E' possibile riconoscere che gli scostamenti sono contenuti e che gli avvolgimenti presentano un elevato grado di omogeneità. In particolare si distinguono tre regione delimitate dalle linee rosse. La prima regione riguarda le sezioni di misura della gamba dritta dal piano di mezzeria all'inizio del tratto curvo, la seconda regione riporta le sezioni del tratto curvo, la terza regione riporta le sezioni di discontinuità che corrisponde al tratto di salto-strato dove le dimensioni dell'avvolgimento sono variabili con continuità e arrivano fino a 170 mm.

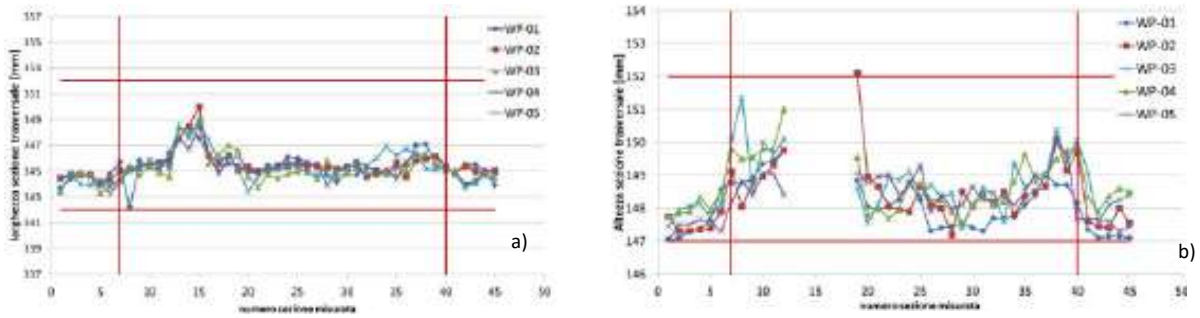


Figura 294. Confronto larghezza (a) e altezza (b)tra i primi 5 WP

In Figura 295 si riporta la ricostruzione della linea virtuale di corrente di uno degli avvolgimenti prodotti e che è alla base della definizione delle caratteristiche magnetiche del modulo. Si può notare che il requisito previsto dalle prescrizioni tecniche che la linea mediana nella zona rettilinea sia contenuta all'interno di un cilindro di 1 mm di raggio è stato soddisfatto e che gli scostamenti nella parte curva sono comunque contenuti e prossimi a tale valore.

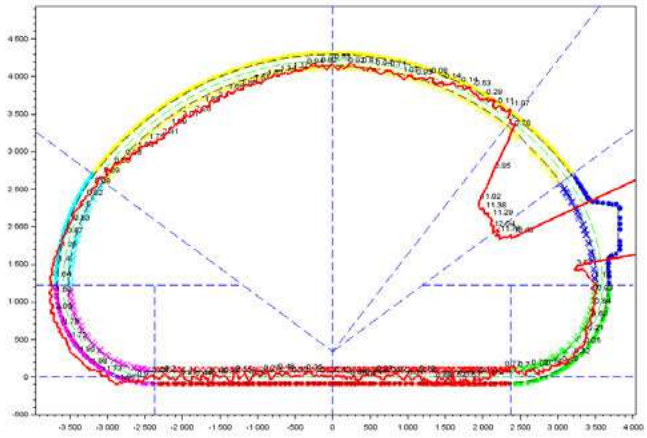


Figura 295. Linea media di corrente ricostruita a partire dai dati sperimentali di forma dell'avvolgimento

Incassamento nella cassa di contenimento

Terminati gli avvolgimenti e ricevuta la prima cassa di contenimento, l'attività di produzione è potuta proseguire nella seconda fase di incassamento che prevede l'esecuzione dei seguenti passaggi:

a. Nastratura con tele di vetro per compensare il gap presente tra WP e cassa
b. Inserimento nella cassa
c. Saldatura trasversale di unione del tratto dritto con il tratto curvo
d. Inserimento dei coperchi di chiusura sul profilo interno
e. Saldatura dei coperchi
f. Impregnazione sotto vuoto con resina epossidica
g. Lavorazione meccanica per recuperare eventuali distorsioni e rimuovere il sovrametallo in eccesso previsto
h. Montaggio del sistema di adduzione del flusso di Elio nel conduttore e nella cassa di contenimento

i. Collaudi finali di accettazione
j. Imballaggio e spedizione.

I punti a, b, c, d, e, al momento attuale, sono stati completati sul primo modulo di magnete toroidale. Inoltre è opportuno segnalare che il circuito di raffreddamento è già stato parzialmente assemblato ed è pronto per essere montato sul modulo per il suo completamento. Allo stesso modo tutti i telai per il trasporto dei nove moduli di magnete toroidale sono già disponibili.

E' opportuno segnalare che sono state effettuate diverse analisi numeriche per assicurare l'integrazione di ciascun avvolgimento prodotto con la cassa.



Figura 296. Inserimento nella prima cassa e avvio delle operazioni di saldatura trasversale

In Figura 296 sono mostrate la fase d'inserimento del primo avvolgimento nella relativa cassa di contenimento ed il posizionamento in verticale del modulo pronto per la saldatura trasversale con metodo TIG della gamba dritta con la gamba curva della cassa. Tale operazione che interessa uno spessore di circa 50 mm di acciaio austenitico è stata validata con un'intensa attività di qualifica sia dei metodi di saldatura che dei successivi metodi di controllo non distruttivo necessari ad assicurare l'assenza di difetti nelle saldature stesse che potrebbero limitare la vita a fatica del modulo.

Come anticipato, le attività di incassamento del primo modulo stanno proseguendo e si prevede il completamento con la spedizione al sito francese di Saclay, dove verrà testato in condizioni criogeniche, entro la fine del 2015. In parallelo le attività di incassamento del secondo modulo sono cominciate e verranno concluse nel primo quarto del 2016.

Per approfondimenti si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/049.

a.2 Realizzazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Obiettivo del subtask a.2 nell'ambito del PAR 2014 è il completamento di 6 strutture di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA, tre destinate ad ASG Superconductors (Genova, Italia) e tre destinate ad ALSTOM (Belfort, Francia).

Ciascuna cassa a forma di D è composta da un numero limitato di componenti per minimizzare le saldature necessarie alla chiusura finale dell'avvolgimento della bobina all'interno della cassa di contenimento. La cassa è costituita principalmente da una gamba dritta, una gamba curva e da tre coperchi per il contenimento della bobina. La gamba dritta, a sua volta, è costituita da una parte centrale in materiale laminato e da due elementi a forma di gomito saldati alle sue estremità realizzati con materiale forgiato. Nell'ambito del PAR 2013 erano stati completati i componenti ricavati da laminati necessari alla composizione di 15 casse e due gomiti con materiale forgiato.

La prima gamba dritta è stata composta saldando due gomiti realizzati nel nuovo materiale forgiato con la parte dritta centrale. La gamba dritta è stata poi lavorata di macchina fino all'ottenimento della geometria finale rimuovendo il sovrametallo interno per poi procedere alla saldatura del tubicino di raffreddamento con successiva lavorazione dei cianfrini di saldatura trasversale e longitudinale. Parallelamente la prima gamba curva completa dei supporti esterni saldati (Figura 297) è stata sottoposta a ripetute lavorazioni di macchina fino all'ottenimento della geometria finale e poi cianfrinata.

I coperchi, ottenuti per taglio da lamiera e successiva calandratura, sono stati assemblati utilizzando attrezzature dedicate usate anche per il fissaggio degli stessi durante la lavorazione meccanica dei cianfrini di accoppiamento con le gambe della cassa.



Figura 297. Attrezzature per la composizione della gamba curva e saldatura dei supporti

In preparazione delle prime consegne dei componenti della cassa ad ALSTOM ed ASG è stato necessario perfezionare e concordare con tutte le parti F4E, CEA, ASG ed ALSTOM le procedure di carico, trasporto e scarico. Tali procedure, prevedono particolari strutture di trasporto per i vari componenti dei casing che sono state progettate e realizzate da Walter Tosto secondo i criteri stabiliti dalle normative europee vigenti (comprensive di marcatura CE).

Inoltre sono state perfezionate le procedure per il controllo dimensionale, basato su Laser-tracker, dei componenti meccanici in costruzione e le prove di accettazione finali. Tra questi i leak test ed i pressure test per la verifica della tenuta del tubicino per il raffreddamento con elio liquido della gamba dritta della cassa sono stati eseguiti in presenza di una Terza Parte.

Si è arrivati così al completamento ed alla consegna del primo casing destinato ad ALSTOM, che è stato inserito immediatamente nel ciclo di integrazione del modulo di magnete toroidale (Figura 298).



Figura 298. Inserimento bobina nel primo casing in ALSTOM, maggio 2015 *(Courtesy of ALSTOM)*

In parallelo le attività produttive relative ai componenti per la composizione di più casing procedevano su più stazioni con l'obiettivo di portare tutti i componenti al completamento ed alla successiva consegna ad ASG ed ALSTOM.

Il secondo casing, completato a maggio 2015 e consegnato ad ASG (Figura 299) è stato utilizzato immediatamente per le operazioni di inserimento dell'avvolgimento di bobina nella cassa e la successiva chiusura con i coperchi. Il terzo ed il quarto casing sono stati completati e consegnati rispettivamente ad ASG in luglio e ad ALSTOM in agosto 2015. Il quinto ed il sesto casing, rispettivamente destinati ad ASG e ad ALSTOM sono stati completati in settembre 2015.

Nell'ambito delle attività del PAR 2014 sono stati completati i primi sei casing di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA, dei diciotto previsti in totale; ulteriori 6 casing sono in fase di composizione ed entro la fine del 2015 è previsto il completamento e la consegna del 7° e dell'8° casting rispettivamente ad ASG e ALSTOM.

In Tabella 76 è riportato lo stato delle attività alla scadenza del PAr 2014 comprensivo dello sviluppo dei componenti elementari necessari alla composizione della cassa.

Dettagli sull'attività svolta sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2014/050.



Figura 299. Gamba dritta e gamba curva del 2°casing consegnato, il primo per ASG (*ASG-A*)

Tabella 76. Stato delle attività

COIL CASING	CURVED LEG				STRAIGHT LEG						COVERS	SET
					STRAIGHT PART		ELBOWS		FIT_UP/ TIG WELD	MACHINING/CH AMFERING		
	CUT/ROLL/ TIG WELD	FIT-UP/ EB WELD	Accessories	MACHINING/CH AMFERING	CUT/FIT UP	EB WELD	CUT	FIT UP/ EB WELD				
1° COIL CASING SET- CS10 (ALSTOM-A)	done	done	JTAL4006-A	JTAL4006-A	done	JTAL4001-A	done	done	JTAL4010-A	JTAL4010-A	done	4/2015
2° COIL CASING SET- CS1 (ASG-A)	done	done	JTAL4006-A	JTAS4006-A	done	JTAS4001-A	done	done	JTAS4010-A	JTAS4010-A	done	5/2015
3° COIL CASING SET- CS2 (ASG-B)	done	done	JTAS4006-B	JTAS4006-B	done	JTAS4001-B	done	done	JTAS4010-B	JTAS4010-B	done	6/2015
4° COIL CASING SET- CS11 (ALSTOM-B)	done	done	JTAL4006-B	JTAL4006-B	done	JTAL4001-A	done	done	JTAL4010-B	JTAL4010-B	done	8/2015
5° COIL CASING SET- CS3 (ASG-C)	done	done	JTAS4006-C	JTAS4006-C	done	JTAS4001-C	done	done	JTAS4010-C	JTAS4010-C	done	9/2015
6° COIL CASING SET- CS12 (ALSTOM-C)	done	done	JTAL4006-C	JTAL4006-C	done	JTAL4001-C	done	done	JTAL4010-C	JTAL4010-C	done	9/2015
7° COIL CASING SET- CS4 (ASG_D)	done	done	on-going	JTAS4006-D	done	JTAS4001-D	done	done		JTAS4010-D	cut	2015
8° COIL CASING SET- CS13 (ALSTOM_D)	done	done	on-going	JTAL4006-D	done	JTAL4001-D	done	done		JTAL4010-D	cut	
9° COIL CASING SET- CS5 (ASG-E)	done	on-going		JTAS4006-E	done	JTAS4001-E	done	on-going		JTAS4010-E	cut	
10° COIL CASING SET- CS14 (ALSTOM-E)	done	on-going		JTAL4006-E	done	JTAL4001-E	done	on-going		JTAL4010-E	cut	
11° COIL CASING SET- CS6 (ASG-F)	done				done	JTAS4001-F	on-going				cut	
12° COIL CASING SET- CS15 (ALSTOM-F)	done				done	JTAL4001-F	on-going				cut	
13° COIL CASING SET- CS7 (ASG-G)	done				done	JTAS4001-G					cut	
14° COIL CASING SET- CS16 (ALSTOM_G)	done				done	JTAL4001-G					cut	
15° COIL CASING SET- CS8 (ASG-H)	done				done	JTAS4001-H					cut	
16° COIL CASING SET- CS17 (ALSTOM-H)	done				done	JTAL4001-H					cut	
17° COIL CASING SET- CS9 (ASG-I)	done				done	JTAS4001-I					cut	
18° COIL CASING SET- CS18 (ALSTOM-I)	done				done	JTAL4001-I					cut	

a.3 Realizzazione degli "Switching Network Unit" (SNU)

Nel quadro del Broader Approach, l'ENEA ha il compito di fornire quattro unità di commutazione veloce (switching network unit, SNU) per i quattro moduli superconduttivi del solenoide centrale (CS) di JT-60SA.

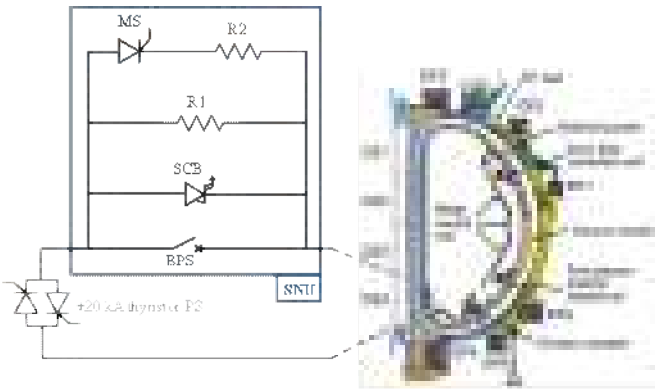


Figura 300. Schema semplificato del circuito di alimentazione di un modulo del CS di JT-60SA

Il CS è diviso in quattro moduli, denominati CS1, CS2, CS3 e CS4, ognuno dei quali collegato ad un circuito di alimentazione e a una SNU indipendente. La figura evidenzia in particolare il modulo denominato CS4, ma nel progetto finale è stato deciso di costruire quattro SNU identiche ed intercambiabili per i quattro moduli del CS.

La principale criticità delle SNU consiste nel dover aprire in meno di 1 ms correnti continue fino a 20 kA producendo ai loro capi tensioni fino a 5 kV. La corretta operazione di tali sistemi è indispensabile per la formazione del plasma di fusione. Non essendo disponibili sul mercato soluzioni adatte allo scopo, è stato sviluppato un progetto dedicato, gestito dall'ENEA in costante coordinamento con i partner internazionali Fusion for Energy (F4E) e Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Il progetto e l'ingegnerizzazione definitive (First Design Report) delle SNU sono stati approvati ufficialmente dal team di coordinamento internazionale nel corso del 2013.

La Figura 300 schematizza la struttura finale delle SNU realizzate durante il progetto. La commutazione principale della SNU è basata su una configurazione ibrida elettromeccanica-statica, ottenuta inserendo un sistema elettronico (Static Circuit Breaker, SCB) in parallelo ad un contattore meccanico (by-pass switch, BPS). La commutazione inserisce velocemente al momento opportuno un resistore di breakdown del banco R1. L'effettiva implementazione del banco di resistori R1 è illustrata in Figura 301. Tale struttura ha consentito di limitare le prove di riscaldamento ai soli elementi base: R13 e R14. Invece, le verifiche sui valori di resistenza e di induttanza sono state effettate su tutti i resistori. L'SCB è costituito da otto rami nominalmente identici. Ogni ramo contiene uno stack con un Integrated

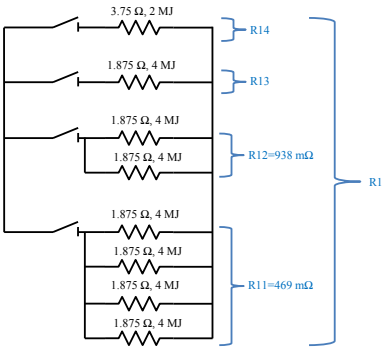


Figura 301. Struttura effettiva dei resistori di breakdown del banco R1

Gate Commutated Thyristor (IGCT) e un diodo di disaccoppiamento in serie all'IGCT. Gli stack degli SCB, come i tiristori del making switch (MS), sono raffreddati da acqua demineralizzata che verrà fornita dall'impianto JT-60SA.

Nel periodo coperto dal PAR 2014 sono state definite le caratteristiche e le responsabilità delle interfacce del sistema SNU con il resto dell'impianto JT-60SA. La Figura 302 mostra le interfacce di una SNU con il sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata di JT-60SA e la figura 303 le interfacce di una SNU e del Local Control Cubicle (LCC) con il sistema di controllo e con le alimentazioni ausiliarie di JT-60SA.

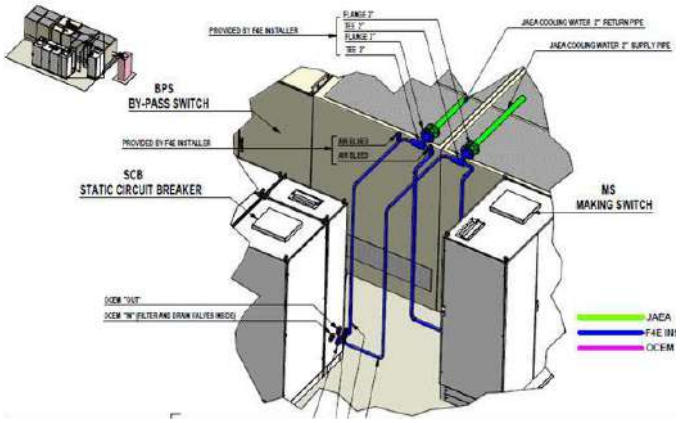


Figura 302. Interfacce di una SNU con il sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata di JT-60SA

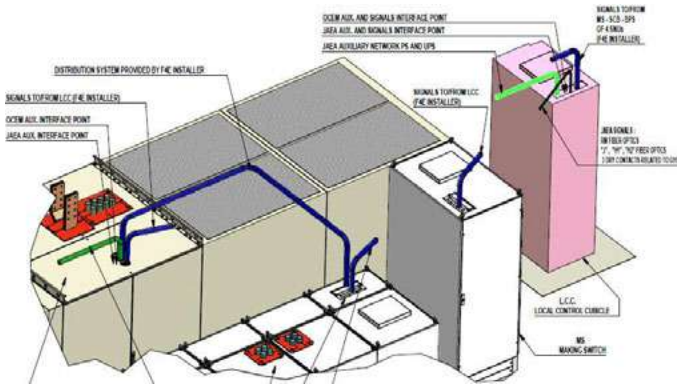


Figura 303. Interfacce di una SNU e dell'LCC con il sistema di controllo e con le alimentazioni ausiliarie di JT-60SA

Data la specificità della fornitura, si è stabilito di eseguire una serie esaustiva di prove su un prototipo a piena scala. La OCEM Energy Technology di Bologna ha completato l'assemblaggio dei sei cubicle (armadi) del prototipo nel settembre 2013.

Nel corso del 2014 sono state effettuate numerose prove (Factory Type Test) sul prototipo e sui suoi componenti più critici (interruttori, semiconduttori, resistori di breakdown). Le prove più importanti sono state eseguite alla presenza dei rappresentanti di F4E e JAEA sul prototipo completo a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV) nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati, in condizioni anche più onerose di quelle previste durante gli esperimenti di JT-60SA (per esempio, in assenza di acqua di raffreddamento).

Dopo l'esito positivo di tali prove, il prototipo sarà parte integrante della fornitura e andrà poi a costituire a tutti gli effetti la prima SNU del CS di JT-60SA. Inoltre, il fornitore industriale OCEM Energy Technology è stato autorizzato a realizzare, conformemente al prototipo, le ulteriori tre SNU "di serie". Nella estate del 2015 sono stati completati tutti gli altri elementi di queste ulteriori tre SNU. Anche queste SNU hanno subito una serie di prove di accettazione, alcune delle quali saranno descritte nel seguito. Secondo gli accordi internazionali e il contratto con il fornitore industriale, le prove sulle tre ulteriori unità sono state più contenute di quelle sul prototipo (prove di routine).

Alcuni cubicle di resistenze realizzati durante questa fase del PAR2014 sono mostrati in Figura 304. Gli armadi delle resistenze R1 e R2 sono stati sottoposti a prove di isolamento. In particolare, le parti di potenza sono state provate a 20 kV rms 50 Hz per 60 s e le parti di misura e controllo sono state provate alle tensioni prescritte dalla



Figura 304. Cubicle dei resistori di breakdown pronti per i test di isolamento

norma IEC (CEI) 60146-1-1. Le resistenze di isolamento, misurate prima e dopo l'applicazione delle tensioni alternate di prova sono risultate tutte superiori al fondo scala dello strumento utilizzato (200 MΩ) e quindi superiori ai 100 MΩ di specifica.

Come concordato, i parametri dei vari elementi resistivi sono stati misurati sui terminali di uscita degli armadi, quindi tenendo conto dei collegamenti e degli elementi parassiti. I risultati di tali misure sono riassunti nella Tabella 77. La resistenza di ciascun elemento si è rivelata all'interno della tolleranza prescritta del ±2% con un buon margine. I valori di induttanza sono in linea con le simulazioni effettuate per ottenere tempi di apertura inferiori a 1 ms con tensioni transitorie al di sotto dei 5,5 kV.

Tabella 77. Valori di resistenza e induttanza misurati su tutti i resistori di breakdown delle quattro SNU

Item	Limiti di accettazione (unità)		Valore misurato							
			SNU-A		SNU-B		SNU-C		SNU-D	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
R14	3,675÷3,825 Ω	≤10 µH	3,694	8,30	3,736	8,50	3,697	8,34	3,715	8,30
R13	1,837÷1,913 Ω	≤10 µH	1,867	8,50	1,871	8,50	1,876	8,55	1,867	8,40
R12	918,75÷956,25 mΩ	≤5 µH	936,4	4,00	935,7	4,22	939,5	4,02	937,6	3,94
R11	459,42÷478,18 mΩ	≤2,5 µH	467,9	1,53	468,3	1,6	467,8	1,27	467,8	1,32
R21-1	98÷102 mΩ	10÷16 µH	98,792	13,19	100,407	10,89	99,485	11,75	100,277	11,39
R21-2			98,581	13,04	100,407	10,98	99,782	11,88	100,277	10,98
R22-1			98,842	12,92	100,208	11,32	99,387	12,07	99,881	11,86
R22-2			98,460	12,69	101,002	11,61	99,683	12,05	100,277	11,70

Il BPS deriva da un potenziamento di un sistema in uso in applicazioni ferroviarie. Poiché in tale ambito la tensione di lavoro è di 3 kV, il BPS non era stato mai testato alla tensione di isolamento richiesta dal circuito dei CS di JT-60SA: 20 kV rms per 60 s. Per questo motivo, è stato necessario reingegnerizzare il componente ed effettuare alcuni test intermedi sulle parti critiche. Inoltre, sono state eseguite ulteriori prove di routine per la tensione a contatti aperti: 20 kV per il GS e per i selettori Cn dei resistori R1.

Il BPS è costituito da quattro rami in parallelo. Su questi è stata misurata la resistenza nella configurazione finale all'interno del cubicle. La misura è stata effettuata con un microohmetro interponendo tra gli altri tre contatti in parallelo un doppio foglio di Mylar ed evitando contatti impropri tra le trecce dei contatti mobili. La resistenza media sperimentale è stata pari a 46,65 µΩ, lo sbilanciamento massimo in corrente è stato circa dell'8% mentre il limite massimo richiesto era pari al 20%.

Dopo l'esito positivo delle prove di tenuta in tensione, sono stati verificati i tempi di apertura e chiusura meccaniche di ogni BPS tramite almeno 10 operazioni di apertura e 10 di chiusura. I risultati di questi test sono all'interno dei limiti di specifica. È interessante sottolineare che nel caso del BPS della SNU prototipo sono state effettuate 1000 misurazioni consecutive di apertura e chiusura. Le prove hanno dimostrato che anche gli ultimi sistemi sviluppati possono soddisfare le esigenze dell'esperimento internazionale JT-60SA per lo studio della fusione nucleare.

La fornitura finale sarà costituita dal prototipo, dalle successive tre SNU e dal sistema di controllo locale (LCC). Anche se una prima versione dell'LCC era stata realizzata per le prove sul prototipo, la disponibilità di tutte le 4 unità ha permesso di svilupparne la versione finale e di definire completamente i meccanismi di comunicazioni con il resto degli impianti. A questo punto è stato possibile assemblare il sistema complessivo finale (quattro SNU comandate dall'LCC), assemblato nella sede di OCEM in maniera analoga alla configurazione definitiva nel sito JAEA di Naka.

Lo stato delle attività consente di avviare le procedure per l'imballaggio e il trasporto dell'intera fornitura verso il Giappone per l'istallazione e la messa in servizio integrata con gli altri componenti dell'impianto, previste per il 2016.

Le attività svolte sono descritte nel rapporto RdS/PAR2014/051.

a.4 Realizzazione di parte degli alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA

L'obiettivo a.4 prevede la fornitura di otto alimentatori AC/DC non convenzionali e sei trasformatori MT/BT, destinati ad erogare le elevate correnti richieste da alcuni avvolgimenti superconduttori di JT-60SA. La fornitura include anche tutti i relativi interruttori, fusibili, protezioni, controllori, sistemi di raffreddamento, collegamenti di media e bassa tensione e quanto altro necessiti al loro funzionamento.

Dopo aver condotto accurati studi di fattibilità, l'ENEA, sulla scorta della propria pluriennale esperienza nelle alimentazioni elettriche per la fusione nucleare, in costante contatto con altri enti per la fusione nucleare europei ed internazionali, ha eseguito la progettazione dei sistemi di alimentazione necessari ed ha elaborato le specifiche tecniche e di gestione della qualità finalizzate all'emissione di un bando di gara per l'assegnazione del contratto per la fornitura degli otto sistemi di alimentazione elettrica.

L'ENEA, dopo aver selezionato ed invitato diversi fornitori industriali europei, ha assegnato la fornitura di tutti i sistemi di alimentazione elettrica al Raggruppamento Temporaneo di Imprese (RTI) tra le ditte POSEICO e JEMA. Entrambe le ditte possono vantare una esperienza pluriennale nel campo dell'elettronica di potenza con competenze specifiche complementari nella componentistica e negli impianti per fusione nucleare.

La fase di ingegnerizzazione ha individuato i criteri di dimensionamento dei sistemi e di scelta dei componenti industriali. Le soluzioni proposte rispondono a quanto chiesto dalle specifiche tecniche ed in linea con le prestazioni attese dalla macchina JT-60SA. La fase di progettazione è stata basata su criteri di conformità alle specifiche tecniche, modularità, affidabilità, manutenibilità, mitigazione del rischio e analisi dei guasti. Infatti, per tutte le applicazioni sono richieste solo 4 tipologie di tiristori e un numero limitato di unità di "Power Assembly". Questi approcci progettuali ridurranno i rischi del progetto in fase di montaggio e di test, ma soprattutto avranno una ricaduta diretta durante la vita utile dell'impianto, sia in termini di migliore manutenibilità sia in termini di minor costo delle parti di ricambio.

Successivamente nel 2014 è stato approvato definitivamente da ENEA, F4E e JAEA il design dei trasformatori, mentre nel 2015 sono stati approvati definitivamente il design dei convertitori. Il piano di realizzazione ha visto il completamento dei trasformatori Fast Plasma Position Control (FPPC) e il loro collaudo a settembre 2014, la realizzazione dei convertitori FPPC upper e lower si è completata a novembre 2014.

A febbraio 2015 i convertitori FPPC upper and lower (Figura 305) sono stati collaudati con successo presso la sala prove della JEMA (Spagna). L'esecuzione di queste prove ha richiesto l'uso di due trasformatori collaudati in precedenza dalla Poseico e trasferiti in Spagna a questo scopo. Infine le prove sismiche del Crowbar (essendo un componente di sicurezza rilevante in Classe B) sono state eseguite (maggio 2015) in base alla norma IEC 60068-3-3 60068-2-47 presso il laboratorio esterno Virlab in Spagna. Questi test hanno avuto esito positivo. Si prevede la realizzazione dei test funzionali ed a piena corrente del crowbar per fine ottobre 2015. L'attività svolta sono descritte nel rapporti RdS/PAR2014/052.



Figura 305. Convertitore FPPC lower predisposto per le prove di isolamento

A valle del completamento della fase di realizzazione degli alimentatori sono stati preparati i convertitori CS1 e CS4 [rapporto RdS/PAR2014/053]. In questo ambito sono state condotte delle prove per finalizzare il funzionamento del sistema di controllo del convertitore CS1- L'obiettivo del test è stato quello di verificare che il sistema di controllo invii i corretti segnali al sistema di potenza. Questo test è stato effettuato facendo alcune prove funzionali sul convertitore CS1.

Altra fase del lavoro ha riguardato la realizzazione dei trasformatori per i convertitor CS2 e CS3 (rapporto RdS/PAR2014/054). Uno dei trasformatori è stato sottoposto a una prova di tipo di corto circuito per verificare le sollecitazioni meccaniche. Questa prova è stata effettuata presso il laboratorio della SIEMENS SVEPPI a Scorzè (VE, Italia) . Altre prove di collaudo dei trasformatori dei convertitori CS2 e CS3 sono previste presso i laboratori della SEA. Le prove di collaudo finale dei trasformatori CS2 e CS3 sono dei test di routine, mentre uno dei trasformatori è stato sottoposto ad una prova di tipo in corto circuito sul trasformatore.

Tali verifiche e test così stringenti permettono di garantire la qualità del design dei trasformatori dei convertitori CS2 e CS3 e ne migliorano l'affidabilità. Prima delle prove di corto circuito, un trasformatore è stato sottoposto alle prove di accettazione di routine come specificato nella norma IEC 60076-1.

b. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

b.1 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti gli impianti a litio ELTL e Lifus6 per attività sperimentali su corrosione/erosione, purificazione, termo idraulica e cavitazione per IFMIF

L'impianto Lifus6 è stato progettato e realizzato nel centro ENEA del Brasimone allo scopo di effettuare test di resistenza alla corrosione-erosione esercitata da litio liquido fluente alla temperatura di 350°C. L'avvio delle prove di corrosione vere e proprie è però subordinato alla preventiva purificazione iniziale del litio circolante nell'impianto, giacché è noto come le impurezze non metalliche all'interno del metallo alcalino accentuino il comportamento corrosivo dello stesso. In una prima fase della purificazione, le concentrazioni di carbonio, ossigeno ed idrogeno sono fortemente abbattute attraverso l'impiego di una Trappola Fredda; in una seconda successiva fase, l'utilizzo di una Trappola Calda consente di ridurre fortemente anche la concentrazione di azoto. Nel corso dell'intera procedura, il Resistivity Meter è chiamato a dare in tempo reale indicazioni approssimative sul grado di purezza ottenuto, che risulta tanto maggiore al decrescere della resistenza elettrica misurata.

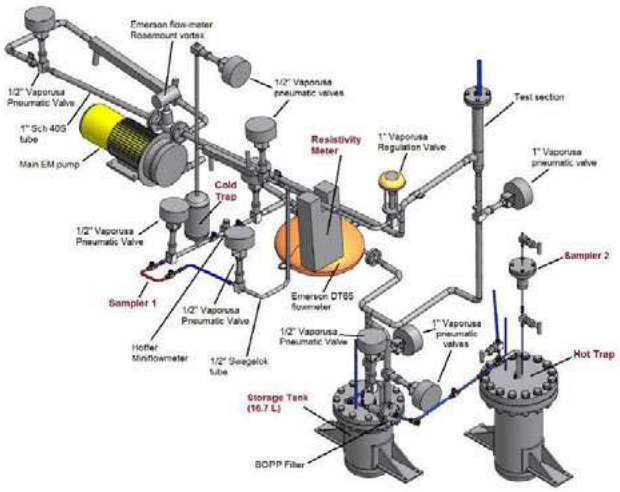


Figura 306. Configurazione dell'impianto Lifus6 al termine della fase di commissioning con argon

Dopo aver terminato il commissioning in argon dell'impianto Lifus6 (Figura 306), registrato il valore della resistenza in assenza di litio (capillare vuoto) e verificato la stabilità dei principali parametri operativi, si è quindi proceduto al caricamento dell'impianto, trasferendo il litio dal vecchio impianto Lifus3 (sempre nel C.R. del Brasimone) e se ne è avviata la circolazione. Questo ha consentito, da una parte di attivare la purificazione del litio ad opera della Trappola Fredda, attraverso cui il litio si trova a passare con tempo di residenza pari a circa 10 minuti, dall'altra di condurre ulteriori verifiche (termocoppie, flussimetri, valvole….) in presenza del metallo.

In particolare, è stato verificato con successo il funzionamento dell'aircooler a monte della Trappola Fredda, deputato a ridurre la temperatura del litio da 350°C a 200°C, alla quale deve operare la Trappola per produrre la desiderata rimozione delle impurezze (Figura 307).

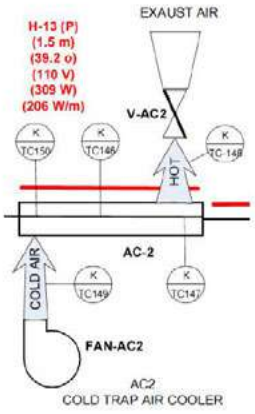


Figura 307. P&ID di Lifus 6 nella zona dell'Aircooler

Per quanto riguarda il Resistivity Meter, tale dispositivo ha fornito dei valori sperimentali di resistenza in ottimo accordo con quelli calcolati sulla base della geometria e della resistività teoriche, al contempo caratterizzandosi per una elevata stabilità della temperatura di funzionamento (± 0.05°C) ed un rumore del segnale pari a circa 1 μΩ.

Nello stesso tempo, si sono però evidenziati alcuni inconvenienti imprevisti, quali ad esempio: la formazione di una perdita di carico elevata nella sezione di prova dovuta alla formazione di aggregati solidi nella sua estremità inferiore; la formazione di turbolenze del litio nella medesima sezione, con saltuari schizzi nelle sovrastanti linee gas; il non funzionamento del miniflussimetro (circa 0,3 L/min) del litio nella linea secondaria di purificazione; la cattiva regolazione della valvola automatica chiamata a dividere la portata del litio fra circuito principale (circa 99%) e circuito secondario (circa 1%). Tutte queste problematiche sono state studiate e poi risolte internamente, implementando soluzioni e modifiche all'impianto ad opera del personale ENEA.

E' stato d'altra parte necessario, nel corso dell'attuazione di queste riparazioni ed ottimizzazioni, interrompere saltuariamente la circolazione del litio nel loop dell'impianto, procedendo attraverso drenaggi nello stoccaggio e successivi ricaricamenti. Complessivamente questa fase si è protratta per alcuni mesi, con un tempo effettivo totale di circolazione corrispondente ad alcune settimane. Considerando che preventive valutazioni teoriche hanno indicato come pari ad alcune ore soltanto il tempo richiesto per una efficiente purificazione del litio ad opera della Trappola Fredda, si può senz'altro ritenere che al termine di questa fase si sia anche completato il

primo stadio di purificazione del litio, ossia siano state ridotte ai rispettivi valori ottimali le concentrazioni di carbonio, idrogeno ed ossigeno. A causa di questi imprevisti malfunzionamenti dell'impianto Lifus 6, non è stato possibile eseguire la prevista campagna di prove di corrosione/erosione da litio flussante che si prevede di condurre successivamente.

Grazie al supporto analitico del Dipartimento di Chimica dell'Università di Firenze, si è infine quantificato il contenuto di azoto all'interno del litio circolante nell'impianto, prelevandone una piccola quantità (circa 25 mL) attraverso un apposito campionatore rimovibile. Il valore ottenuto, pari a 70,4 wppm di azoto, può essere ritenuto basso, in quanto non lontano dal valore richiesto per l'esecuzione delle prove di erosione-corrosione (30 wppm) ed a fronte della solubilità teorica dell'azoto in litio nelle condizioni di funzionamento dell'impianto, pari a ben 1460 wppm. Per ridurre fino a 30 wppm la concentrazione di azoto è dunque necessaria la seconda fase di purificazione, ad opera della Trappola Calda, attualmente in corso d'opera.

Le attività svolte sono descritte nel rapporto RdS/PAR2014/055.

b.2 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica del sistema di manipolazione remota e della progettazione completa del target assembly di IFMIF

Prove di ricondizionamento del Target assembly di IFMIF

Il flusso neutronico necessario ad irraggiare i campioni di materiale in IFMIF viene prodotto da un target a litio fluente. Il litio fluisce all'interno di un componente, chiamato Target Assembly (TA), che a causa della sua esposizione al flusso neutronico deve essere sostituito ogni anno, se non con una maggiore frequenza. La sostituzione del TA è una delle operazioni di manutenzione remotizzata più critiche da eseguire in IFMIF sia per la sua posizione all'interno dell'impianto che per le operazioni di connessione/disconnessione dal circuito a litio. A tal fine, per la qualifica delle operazioni di manutenzione remotizzata da eseguire su tale componente, nella presente annualità sono state eseguite le seguenti attività:

1) Test di rimozione del litio solido dal frame di supporto del bersaglio del TA. Tale attività è stata eseguita su un prototipo del frame di supporto utilizzando un dispositivo di pulizia realizzato in ENEA. I risultati di tali test hanno permesso di:
   - Verificare la fattibilità dell'operazione di pulizia del supporto del bersaglio del TA inclusa la misura del tempo necessario al suo completamento. In particolare la prova è stata eseguita utilizzando un prototipo del supporto del bersaglio del TA su cui è stato depositato un sottile strato di materiale lubrificante (Molykote), mentre la pulizia è stata effettuata con una soluzione a base di alcol etilico. Il tempo totale di esecuzione della pulizia della superficie del supporto del bersaglio è risultato essere di circa 3 ore. Si precisa che l'attività prevista di pulizia delle connessioni flangiate del TA non è stata eseguita poiché, vista la complessità di esecuzione di tale operazione, essa richiede lo sviluppo di un dispositivo speciale.
   - Preparare la specifica tecnica per la progettazione dei dispositivi di pulizia del supporto del bersaglio del TA. Tali dispositivi sono già in preparazione.
2) Test del TA dopo riscaldamento a 250°C e relativo raffreddamento. In particolare è stata eseguita una prova da vuoto e misura della relativa perdita sia a freddo che a caldo: il TA è provvisto di diverse connessioni flangiate con tenute di tipo metallico che vanno sottoposte a verifica funzionale. Le prove sono state eseguite alla pressione nominale di funzionamento del TA di 10^{-3} Pa, a temperatura ambiente e a 250 °C. In entrambi i casi la fuga registrata è stata di $1{,}7\times10^{-8}$ Pa m^3 /s. Tale valore di fuga è inferiore a quella massima ammissibile di progetto.
3) Aggiornamento delle procedure di manutenzione del TA e misura del relativo tempo d'intervento con l'uso di flange con connessione veloce (Fast Disconnecting Systems, FDS). Ai fini della verifica dell'affidabilità delle procedure di manutenzione sviluppate in precedenza sono state eseguite 10 prove di sostituzione del TA. Queste prove hanno permesso di confermare l'efficacia delle procedure di manutenzione esistenti e di misurare il tempo d'intervento medio totale che ammonta a circa 22 ore (Tabelle 78 e 79). Tale tempo d'intervento comprende una stima dei tempi necessari per la pulizia delle connessioni flangiate del TA, mentre non include la gestione delle connessioni elettriche di potenza e di segnale.
4) Misura del corretto posizionamento del TA. Il bersaglio del TA dista solamente 2 mm dal modulo che porta i materiali da testare in IFMIF. Tale distanza deve essere mantenuta entro i limiti di 2mm ±0,5mm in modo che il flusso neutronico venga indirizzato sui materiali da irraggiare e non vada disperso sulle strutture adiacenti. A tal fine è stata eseguita una serie di misure di ripetibilità di posizionamento del bersaglio del TA. Le misure sono state eseguite utilizzando la macchina di misura COORD3D installata presso il laboratorio Divertor Refurbishment Platform (DRP) dell'ENEA Brasimone. Le prove eseguite hanno permesso di dimostrare che la

precisione di posizionamento del bersaglio oscilla tra 0,10÷0,15 mm e quindi ampiamente entro la tolleranza prevista di ±0,5mm.

Tabella 78. Tempi medi di intervento per la rimozione del TA

Rimozione TA	FDS ingresso (min)	FDS uscita (min)	Soffietto lato fascio (min)	Sollevamento TA (min)	Tempo intervento (h:m)
Tempo medio su 10 prove	29	38	162	25	4:14

Tabella 79. Tempi medi di intervento per l'installazione del TA

Installazione TA	Pulizia flange Li loop (h:min)*	Posizionamento TA (h:m)	FDS ingresso (min)	FDS uscita (min)	Soffietto lato fascio (h:min)	Tempo intervento (h:m)
Tempo medio su 10 prove	4:50	6:55	92	105	2:35	17:37

(*) tempo medio di pulitura flange stimato sulla base delle prove eseguite sul supporto del bersaglio

Infine si segnala che sono stati eseguiti alcuni test preliminari di preriscaldamento del TA con l'obiettivo di avere la disponibilità della mappatura termica del bersaglio del TA. Tale verifica di importanza primaria in quanto il litio circola nel TA ad una temperatura di riferimento di 250 °C, ma mentre l'intero corpo del TA si trova alla temperatura di riferimento, perché riscaldato e coibentato, il bersaglio, in quanto non coibentato, scambia direttamente con l'ambiente circostante; inoltre esso viene riscaldato per conduzione dagli altri componenti del TA in quanto non provvisto di un proprio sistema di riscaldamento. I risultati di tali verifiche preliminari hanno permesso di dimostrare che il sistema di riscaldamento attuale non permette al bersaglio il raggiungimento della temperatura di riferimento del litio e pertanto il progetto del sistema di riscaldamento dovrà essere integrato con l'introduzione di un sistema di riscaldamento direttamente installato sul bersaglio.

Le attività svolte sono desctitte in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2014/056.

Studio del comportamento termomeccanico del target assembly nelle condizioni transitorie di start up

Uno degli aspetti più critici da considerare nella progettazione del target assembly (TA) di IFMIF riguarda il pre-riscaldamento del sistema durante la fase di start-up (prima dell'immissione del litio liquido a 250 °C), al fine di evitare l'insorgenza di stress termici elevati nella struttura (inizialmente prossima alla temperatura ambiente) e di scongiurare possibili solidificazioni locali del metallo liquido al contatto con le pareti del canale del target. Nell'attuale progetto del TA, tale pre-riscaldamento è previsto essere realizzato mediante un insieme di riscaldatori elettrici opportunamente posizionati lungo le superfici esterne della struttura. Al fine di valutare il corretto dimensionamento dei riscaldatori selezionati e determinare il tempo necessario a portare il sistema alla temperatura voluta, è stato previsto di eseguire una serie di prove di pre-riscaldamento sul prototipo del target assembly installato l'ENEA Brasimone, opportunamente equipaggiato, a tale scopo, con un set di riscaldatori che riproducono, in termini di disposizione geometrica e flussi termici applicati, quelli previsti per il TA di IFMIF (Figura 308).

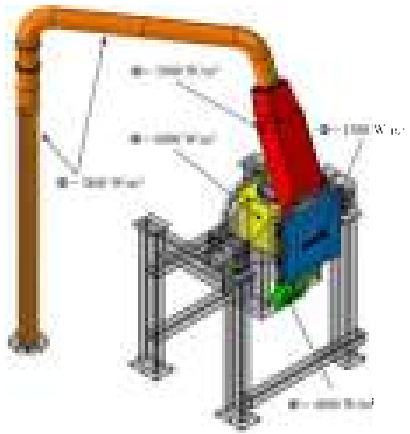


Figura 308. Posizionamento dei riscaldatori elettrici sul prototipo del TA e relativi flussi termici

L'esecuzione dei test sperimentali richiede la definizione preliminare della procedura operativa ottimale di accensione/spegnimento dei riscaldatori (non essendo possibile modularne la potenza ma solo variarne lo stato da ON a OFF e viceversa). Quest'ultima deve essere in grado di garantire l'incremento della temperatura nei vari componenti del target il più uniformemente possibile in modo da evitare l'insorgere di gradienti termici con conseguenti stress troppo elevati.

Con l'obiettivo di supportare le prove sperimentali, è stato sviluppato, in collaborazione con il Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo, un modello 3D agli elementi finiti (FEM) in grado di simulare il comportamento termico del prototipo del target assembly nella fase di pre-riscaldamento. L'obiettivo principale delle simulazioni è stato quello di identificare la sequenza ottimale di carico dei riscaldatori, ovvero quella sequenza in grado di far raggiungere lo stato stazionario finale al sistema mantenendo la temperatura nelle sue varie parti il più uniforme possibile durante il

transitorio. Inoltre, la distribuzione finale di temperatura così calcolata potrà essere utilmente confrontata coi risultati sperimentali al fine di validare il modello utilizzato per l'analisi.

Le simulazioni sono state effettuate mediante un modello 3D dipendente dal tempo implementato per mezzo di un qualificato codice FEM.

I carichi termici e le condizioni al contorno considerati nell'analisi comprendono: la conduzione termica tra la target chamber e il beam duct dell'acceleratore; il trasferimento radiativo di calore internamente al target assembly; lo scambio termico radiativo tra le pareti non isolate del target e l'ambiente circostante a temperatura ambiente; la convezione naturale tra la parte non isolata del target e l'atmosfera esterna (supposta essere costituita da elio a 20 °C); i flussi termici dipendenti dal tempo applicati sulle superfici interessate dai riscaldatori elettrici. Tutte le superfici su cui agiscono i riscaldatori sono state considerate isolate termicamente.

L'analisi è stata condotta partendo dalla situazione iniziale in cui tutto il target è supposto essere alla temperatura dell'ambiente circostante di 20 °C e quindi imponendo un andamento temporale dei flussi termici sulla base della sequenza di accensione/spegnimento dei riscaldatori di volta in volta considerata. Al fine di determinare la sequenza di accensione/spegnimento ottimale è stata seguita una procedura iterativa di tipo *try&fail*, modificando opportunamente il profilo di carico dei riscaldatori laddove le temperature massime raggiunte all'interno dei diversi componenti del target non fossero sufficientemente uniformi, ovvero qualora il valore della temperatura massima in un componente avesse raggiunto il valore finale di 250 °C.

La sequenza di accensione/spegnimento ottimale così ricavata è mostrata in Tabella 80 per la sola parte iniziale (primi 10 min.) e finale (ultimi 10 min.) del transitorio. La sequenza completa è riportata nel rapporto integrale RdS/PAR2014/057.

Tabella 80. Sequenza ottimale di carico dei riscaldatori (ad inizio e fine transitorio)

Time [min]	Target chamber	Outlet nozzle	Inlet nozzle	Straight Lithium inlet pipe	Bend Lithium inlet pipe	Back-Plate
0-1	ON	ON	ON	ON	ON	ON
1-2	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON
2-3	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON
3-4	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON
4-5	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
5-6	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON
6-7	ON	ON	ON	ON	ON	ON
7-8	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON
8-9	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON
9-10	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
710-711	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
711-712	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
712-713	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
713-714	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
714-715	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
715-716	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
716-717	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
717-718	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
718-719	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
719-720	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

L'evoluzione temporale della temperatura massima nei vari componenti del target assembly, limitatamente alla parte iniziale e finale del transitorio relativo alla suddetta sequenza di carico, è riportata in Figura 309. I risultati ottenuti mostrano che tale sequenza assicura il raggiungimento di un valore di temperatura massima nella backplate di circa 250 °C dopo un tempo di pre-riscaldo di circa 720 min. Tuttavia, come si può notare dalla Figura 310, che riporta il campo termico stazionario nella backplate alla fine della fase di pre-riscaldamento, quest'ultima non è in grado di raggiungere globalmente un livello di temperatura soddisfacente, in quanto un'estesa zona del componente, incluso il canale di litio, rimane a temperature inferiori ai 200 °C o addirittura al di sotto della temperatura di solidificazione del litio (∼180 °C). Ciò porta a concludere che il flusso termico del riscaldatore posto sulla backplate non è sufficiente a garantire un riscaldamento adeguato di quest'ultima (in particolare della sua superficie a contatto col litio) e si dovrà pertanto prevedere un incremento della potenza termica del suddetto riscaldatore in sede di evoluzione del progetto.

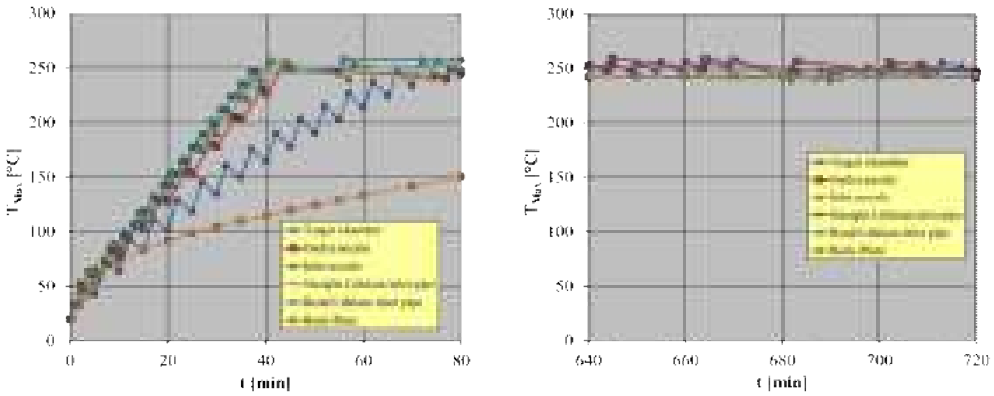


Figura 309. Evoluzione della temperatura max. nei componenti del TA ad inizio e fine transitorio

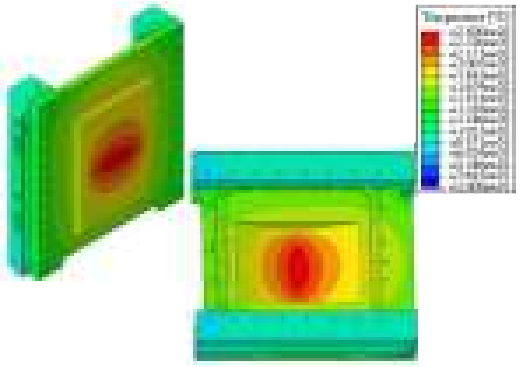


Figura 310. Campo termico stazionario nella backplate al termine della fase di pre-riscaldamento

Ottimizzazione del design del target assembly completa di analisi strutturale e neutronica

Le analisi termomeccaniche recentemente condotte sull'attuale modello del target assembly di IFMIF (Figura 311) hanno evidenziato che, sebbene in generale il sistema sia in grado di sopportare le sollecitazioni che nascono per effetto sia dei carichi stazionari generati nelle condizioni nominali di funzionamento che dei carichi variabili nel tempo che si generano in conseguenza dei fenomeni di swelling indotti da irraggiamento neutronico, alcune sezioni della backplate (BP) in corrispondenza dell'altezza mediana del canale di litio, risultano essere critiche (Figura 312), non essendo in esse pienamente rispettati i criteri di integrità strutturale richiesti dalle norme di progettazione di riferimento (ITER Structural Design Criteria for In-vessel Component, SDC-IC).

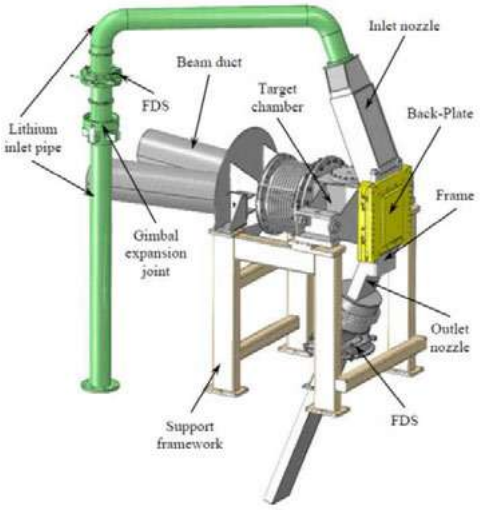


Figura 311. Modello attuale del Target Assembly di IFMIF

Si è pertanto evidenziata la necessità di una revisione del design della BP con lo scopo di selezionare per essa una configurazione geometrica ottimale in grado di mitigare le problematiche evidenziate ed estendere il più possibile la vita operativa del componente rispetto ai limiti imposti dagli effetti di swelling neutronico.

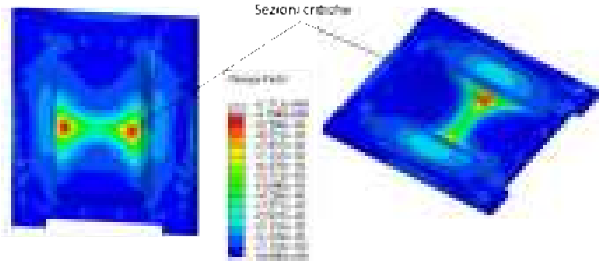


Figura 312. Distribuzione degli stress (normalizzati rispetto al limite di snervamento) nella BP con design non ottimizzato

La procedura di revisione e ottimizzazione del design della BP è stata condotta mediante un modello numerico accoppiato (nucleare + termico-strutturale) sviluppato da ENEA (per la parte neutronica) in collaborazione l'Università di Palermo (per la parte termico-strutturale). In particolare, l'attività si è articolata nelle seguenti fasi:

1. individuazione e analisi dei punti critici dell'attuale design della BP;
2. selezione di possibili strategie di revisione dell'attuale configurazione geometrica della BP;
3. analisi termomeccanica mediante modello agli elementi finiti (FEM) stazionario (senza effetti di swelling) delle configurazioni selezionate e individuazione di una configurazione ottimizzata per la BP;
4. analisi FEM transitoria per la valutazione degli effetti di swelling sul tempo di vita della BP ottimizzata;
5. analisi neutronica per la valutazione dell'impatto delle modifiche adottate sulle performance nucleari della BP ottimizzata;
6. ri-esecuzione delle analisi FEM, sia stazionarie che transitorie, sulla base dei dati nucleari aggiornati, in particolare quelli di densità volumetrica di potenza termica e di danneggiamento neutronico, quest'ultimo legato alla distribuzione di deformazione volumetrica da swelling.

Le analisi neutroniche sono state eseguite utilizzando il codice Monte Carlo MCNP compilato con la sorgente IFMIF (McDeLicious) ed integrato con opportuni software di interfaccia (MCCAM, McCAD) che consentono di importare direttamente i file CAD del modello geometrico del TA all'interno del codice. Gli output del calcolo, di interesse ai fini del presente lavoro, hanno riguardato essenzialmente la distribuzione di potenza termica depositata nel TA dal flusso neutronico e gamma e la distribuzione di danneggiamento neutronico (in dpa/anno) prodotto nella BP. Questi risultati sono poi stati utilizzati come dati di input nelle successive analisi termomeccaniche.

Le analisi termomeccaniche sono state eseguite per mezzo di un modello 3-D agli elementi finiti implementato tramite un qualificato codice FEM commerciale che tiene conto di tutti carichi meccanici e termici indotti sul sistema in condizioni operative nominali. In particolare sono stati considerati sia carichi di tipo statico (forze di chiusura sulla guarnizione, carichi di serraggio dei bulloni, densità di potenza termica depositata da neutroni e gamma, …) sia variabili nel tempo (deformazione volumetrica indotta da swelling, assunta proporzionale, sulla base di correlazioni sperimentali ricavate dalla letteratura, alla distribuzione del danno neutronico cumulato, valutato in dpa, nella BP). I primi tipi di carichi sono stati considerati in entrambe le tipologie di analisi (stazionarie e transitorie) mentre i secondi sono stati considerati solo nelle analisi transitorie, nelle quali è stato simulato il comportamento del TA durante un intero anno di funzionamento a regime a piena potenza, al fine di valutare l'evoluzione temporale degli stress nella BP per effetto della distribuzione differenziale di swelling in essa prodotta dal gradiente di flusso neutronico ivi generato.

A valle delle analisi termomeccaniche è stata quindi effettuata una procedura di *stress linearization* su alcuni *path* significativi individuati sulla sezione mediana della BP, in corrispondenza dei punti in cui le precedenti analisi avevano evidenziato le situazioni più critiche in termini di stress indotti. Tale procedura ha consentito di determinare la parte membranale e flessione degli sforzi primari (P_m e P_b, rispettivamente) e quella membranale degli sforzi secondari (Q_m) da confrontare, secondo le modalità previste dalla normativa di progettazione SDC-IC, con gli opportuni limiti ammissibili (S_m ed S_e) per l'acciaio ferritico/martensitico a bassa attivazione EUROFER, i cui valori sono stati desunti dalla letteratura.

Le strategie di ottimizzazione della BP che sono state perseguite sono le seguenti:

- incremento dello spessore minimo del canale di litio (da 1,8 mm a 3,5 mm)
- riduzione dello spessore totale della BP (da 32,8 mm a 12,8 mm)
- riduzione della "spalla" del canale di litio sulla superficie esterna della BP
- alettatura della superficie esterna della BP
- riduzione dello spessore delle guide laterali del canale di litio all'interno della Target Chamber.

Le analisi condotte sul modello della BP così modificato hanno mostrato che tali misure consentono in generale di

diminuire i valori di temperatura massima nelle zone critiche e conseguentemente di ridurre i livelli di stress termicamente indotti in tali punti. In particolare, si può notare (Figura 313) che il campo di tensione equivalente di Von Mises nella BP rimane quasi ovunque al di sotto dei 300 MPa, escludendo i punti isolati in cui si verificano i valori massimi di tensione dovuti a singolarità numeriche. Tali benefici in termini di mitigazione degli stress sono evidenziati anche dall'analisi dei criteri di progettazione richiesti dalle norme SDC-IC, che risultano in tal caso soddisfatti su tutte le sezioni critiche (*path)* precedentemente selezionate.

Inoltre, dalle analisi transitorie del TA equipaggiato con la BP modificata condotte imponendo per la deformazione volumetrica da swelling una funzione lineare sia del livello di dpa che della temperatura secondo le correlazioni sperimentali riportate in letteratura, si evince che l'incremento dello stress nella BP risulta essere trascurabile, come si può notare dalla Figura 314 in cui è mostrata l'evoluzione della somma degli sforzi membranali (primari e secondari), normalizzata rispetto al suo valore massimo ammissibile, durante un intero anno di irraggiamento a piena potenza. Come si può osservare, gli andamenti in tutti i *path* considerati rimangono sempre inferiori all'unità, il che significa che il criterio in oggetto (che rappresenta quello più critico tra tutti i criteri richiesti dalla normativa) è sempre verificato. Ciò consente di affermare che il requisito sulla vita operativa della BP, indicato in almeno un anno di funzionamento continuativo, sembra essere soddisfatto qualora si adotti la configurazione geometrica ricavata dalla procedura di ottimizzazione effettuata.

Le attività è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/058.

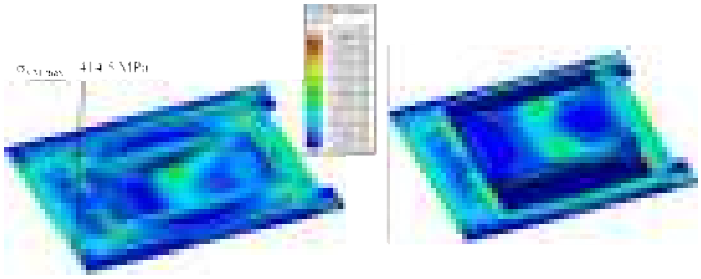


Figura 313. Distribuzione degli stress (in termini di tensione equivalente di Von Mises) nella BP con design ottimizzato

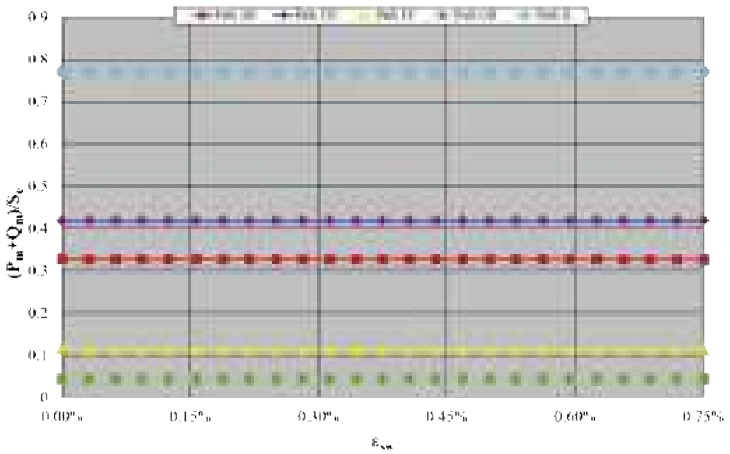


Figura 314. Evoluzione della somma degli stress membranali (normalizzata rispetto al limite ammissibile S_e) valutata su varie sezioni critiche della BP in funzione della deformazione volumetrica progressiva indotta da swelling neutronico

Trattamenti termici e caratterizzazione dell'acciaio ferritico-martensitico (7Cr) alternativo all'EUROFER per la realizzazione del target assembly di IFMIF

I risultati degli studi europei sulle leghe martensitiche per applicazioni di fusione, che hanno individuato l'EUROFER 97 come lega di riferimento, hanno dimostrato che la limitazione principale nell'uso di questa lega è l'infragilimento dovuto a irraggiamento neutronico a temperatura inferiore a circa 380 °C. Questo comportamento è dovuto primariamente ai loop di interstiziali generati dalla radiazione che, a circa 400 °C, induriscono la matrice, inducendo la lega ad avere un comportamento fragile. D'altra parte studi datati e recenti indicano che esiste una

relazione tra loop di interstiziali generati sotto irraggiamento a bassa temperatura e contenuto in Cromo: i loop interstiziali sono zone arricchite in Cromo. Si è quindi stabilito di produrre una lega con contenuto in Cr inferiore a quello di Eurofer e pari al 7%.

Nell'ambito del PAR 2013 è stata prodotta da Centro Sviluppo Materiali (CSM) una piccola colata di acciaio inossidabile martensitico 7 Cr; nella presente annualità il materiale è stato sottoposto allo studio dei trattamenti termici, delle caratterizzazioni microstrutturali e meccaniche [rapporto RdS/PAR2014/059]. Nello specifico si eseguono i seguenti studi, volti alla definizione del trattamento termico completo:

- Trattamenti di austenitizzazione multipla e relative prove di durezza e misura del diametro del grano per determinare il trattamento di austenitizzazione ottimale. E' noto come il diametro del grano influenzi in modo determinante la resilienza di un acciaio; nominalmente più fine è il grano più bassa è la Ductile Brittle Transition Temperature (DBTT). Ci sono testimonianze in letteratura di come l'effettuazione di un trattamento di austenitizzazione multipla (2 o 3 cicli successivi), possa contribuire in modo sensibile all'affinamento del diametro del grano austenitico. Sono stati quindi effettuati trattamenti di austenitizzazione multipla a diverse temperature per ottimizzare i parametri (temperatura di austenitizzazione e numero di ripetizioni) di questa fase del trattamento termico.
- Determinazione della durezza funzione del "water quenching" rispetto all'"air cooling"; Il mezzo di tempra gioca un ruolo fondamentale nella durezza finale del materiale. E' quindi importante esaminare l'effetto del mezzo di tempra (più o meno severo) su questa proprietà del materiale. In altre parole si deve verificare se un trattamento in aria (mezzo meno severo) è sufficiente per ottenere una struttura completamente martensitica.
- Ottenimento della curva di rinvenimento (durezza funzione della temperatura di rinvenimento); una volta temprato l'acciaio si deve eseguire il rinvenimento in funzione delle proprietà meccaniche finali (di cui è indice la durezza) che si desidera ottenere.

c. FAST il nuovo esperimento satellite europeo

La macchina JT-60SA ha come compito principale lo studio di regimi di plasma a confinamento avanzato finalizzati alla dimostrazione della possibilità di realizzare un reattore "steady state", quindi è molto importante analizzare quali siano le effettive capacità della macchina FAST di smaltire un flusso termico di plasma quasi ignito in condizioni di regime "steady state" con grande carico sul divertore.

Il sistema magnetico nell'attuale design di FAST prevede bobine in rame che permettono una durata della scarica limitata, per quanto significativa dal punto di vista dei tempi caratteristici della fisica. Per incrementare tale durata si è analizzata la possibilità di realizzare il sistema magnetico di FAST con bobine superconduttrici, analogamente a JT-60SA.

c.1 Studio di fattibilità di un sistema magnetico superconduttore per FAST

L'alto campo magnetico toroidale (intorno ai 13 T sulla bobina) e la necessità di avere una scarica che duri più di tutti i tempi caratteristici della fisica del plasma, fanno si che un sistema magnetico per FAST basato su bobine superconduttrici sia ai limiti della presente tecnologia. Inoltre è da considerare che essendo FAST una macchina molto compatta, la densità di corrente sulla bobina (~ 15 MA/m^2) assume valori ai limiti dell'impiego dei materiali superconduttori. Per tali motivi è stato effettuato uno studio concettuale e di fattibilità della possibilità di realizzazione di un sistema magnetico superconduttore per FAST. Lo studio di fattibilità è stato incentrato su uno degli scenari più difficili tra quelli previsti durante le attività veloci, lo scenario di riferimento H-mode (BT = 7,5 T, Ip = 6.5 MA).

Le bobine di campo toroidale sono state progettate utilizzando solo lo spazio disponibile nel progetto di riferimento in rame per la gamba dritta interna (un trapezio con un'altezza di 305 mm e le due basi, rispettivamente di 365 e 258 mm). A seguito di un'analisi elettromagnetica 3-D completa di tutto lo scenario (con tutte le bobine e il plasma), si è trovato un campo di picco sul conduttore di 14 T, in corrispondenza della gamba dritta nello strato di bobina affacciato al plasma sul piano equatoriale. Con tale valore di campo magnetico la scelta del Nb_3Sn come materiale superconduttore è obbligata. Si è ipotizzato il magnete costituito da doppi *Pancake* (DP) a formare il *Winding Pack* (WP), realizzato a partire da un conduttore rettangolare di tipo *cable in conduit conductor* (CICC), valori alti del passo di torsione, bassa frazione di vuoto e senza canale centrale di raffreddamento. Queste scelte, soprattutto volte a dare un migliore supporto meccanico ai fili di Nb_3Sn e conseguentemente ridurre il rischio di degrado delle prestazioni, sono ispirati da molte campagne di misura eseguite negli ultimi anni. I magneti sono stati sottoposti a verifiche di resistenza meccanica e termica per valutare

il margine di stabilità al quench che potrebbe limitarne fortemente l'operatività. I risultati di questi studi conducono ad un margine di stabilità teorico di 0,9 K tenendo conto del riscaldamento neutronico prodotto dal plasma e dalle perdite per isteresi durante la fase di riscaldamento del plasma, mentre l'analisi meccanica ha consentito di confermare la validità del progetto che prevede l'impiego di acciaio austenitico per le casse di contenimento.

Relativamente al solenoide centrale che genera la corrente di plasma si è ipotizzato un trasformatore centrale costituito da 6 moduli alimentati in modo indipendente. Il campo magnetico massimo è B_{peak} = 17,7 T, situato nella coppia centrale di bobine CS1U e CS1L, che rappresenta una sfida difficile per la progettazione superconduttiva. Per investigare la fattibilità di impiego di bobine superconduttrici, si è comunque ipotizzato di operare con strand ad alta performance in Nb_3Sn.

Relativamente ai magneti di campo poloidale, il campo magnetico relativamente basso in tutte le 6 bobine previste suggerisce l'uso di fili superconduttori in NbTi. I conduttori sono stati ipotizzati di forma rettangolare: questa soluzione permette un fattore di impacchettamento più alto, rispetto alla forma rotonda. La frazione di vuoto è stata fissata intorno 32-33%. La temperatura operativa per ciascun conduttore PF è stato posta a 4,8 K.

L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2014/060.

c.2 Analisi Termoidraulica di un sistema magnetico superconduttore per FAST

Uno dei problemi più critici di un sistema magnetico superconduttore è il suo comportamento dal punto di vista termico durante il funzionamento ed il dimensionamento dei relativi circuiti di raffreddamento. L'analisi dell'andamento termico nel magnete toroidale durante le condizioni più critiche è stata studiata in dettaglio, considerando una bobina realizzata utilizzando lo spazio disponibile nel design attuale basato su conduttori in rame. E' stato calcolato il margine minimo di temperatura nelle bobine considerando il carico termico sull'avvolgimento e sul jacket del cavo superconduttore prodotto dal massimo carico neutronico previsto, incluso quello dovuto alla reazione secondaria D-T.

La densità di riscaldamento nucleare è stata introdotta nel calcolo in funzione della posizione radiale irradiata nel piano equatoriale. Il riscaldamento nucleare derivante nel caso resistivo viene confrontato con la soluzione superconduttore assunta in presenza di diverse configurazioni di schermo. Tre diverse opzioni di progettazione per la soluzione superconduttrice sono state indagate: prima è stata considerata una configurazione senza schermatura aggiuntiva, quindi è stato inserito uno schermo spesso 50mm, per l'80% di acciaio ed il 20% di acqua borata, dietro la camera da vuoto e infine, un più efficiente tipo di schermo, simile a quello adottato per ITER è stato esaminato. E' stata osservata una riduzione del 20% nel riscaldamento nucleare nel primo strato di conduttore della bobina TF nel piano equatoriale rispetto alla soluzione di riferimento, e quasi una riduzione del 50% sarebbe possibile nel caso della più efficiente opzione ITER-like. La distribuzione lungo il cavo nel pancake più critico è stata ottenuta scalando i dati calcolati in altri piani. A questo proposito, supponendo che l'entrata di elio sia sulla gamba curva del magnete rivolta verso il plasma, l'analisi termoidraulica è stata effettuata con riguardo al pancake centrale che presenta la distanza più lunga tra l'ingresso di elio ed il piano equatoriale. L'analisi elettro-termo-idraulica svolta, è stata effettuata utilizzando il codice 1D Gandalf. Nel *layout* di riferimento la cassa di contenimento in acciaio è stata considerata attivamente refrigerata tramite un adeguato sistema di raffreddamento in elio. Con questi presupposti, il margine minimo di temperatura (definito come la differenza tra il "current-sharing" e la temperatura effettiva del conduttore) è 0,98 K. La distribuzione della temperatura lungo il pancake centrale è stata anche valutata.

L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2014/061.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Nell'ambito dell'Accordo di Programma stipulato con il Ministero dello Sviluppo Economico per la ricerca sulla "Fusione Termonucleare Controllata" particolare attenzione è stata dedicata alla diffusione dei risultati scientifici considerando anche il forte impatto innovativo sulla realtà produttiva nazionale.

L'attività di progetto e di realizzazione è parte del programma scientifico Broader Approach che riunisce partner internazionali per la progettazione della macchina Tokamak JT-60SA e lo sviluppo delle attività di IFMIF. La diffusione dei risultati delle attività della realizzazione del sistema magnetico toroidale della macchina Tokamak JT-60SA, è stata effettuata a livello europeo con meeting settimanali (Magnet Integration Group meeting MIG-meeting), le attività di avanzamento del progetto sono presentate con frequenza trimestrale, in ambito internazionale durante i Technical Coordination Meeting (TCM), con la partecipazione delle associazioni giapponese (JAEA) ed europee. In particolare nel periodo di riferimento i TCM si sono tenuti:

- TCM-21: Saclay, Francia, 12-13 Novembre 2014
- TCM-22 Naka, Giappone 22-23 April 2015
- TCM-23 Genova, Italia 29-30 Settembre 2015
- DRM Design Review Meeting, SCMPS, 31 gennaio 2015.

All'interno del ciclo di convegni tematici organizzati dall'ENEA per la diffusione delle attività scientifiche condotte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, è stato organizzato in data 19 giugno 2015 un Workshop dal titolo: "Attività di Fisica della Fusione Complementari a ITER" in cui è stato presentato lo stato delle attività relative alla realizzazione dei moduli di magnete toroidale di JT-60SA, di costruzione dei relativi alimentatori elettrici e dei risultati ottenuti dalle facility IFMIF per quello che riguarda corrosione e erosione del flusso di litio e sperimentazione del Target Assembly. Il Workshop è stato seguito da una tavola rotonda con la partecipazione del mondo dell'industria in cui si è delineato uno scenario altamente integrato fra ricerca e industria.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Palermo, Dipartimento di Energia, ingegneria dell'Informazione e modelli Matematici (DEIM)

Le attività svolte dal Dipartimento DEIM hanno riguardato:

a) Analisi termica del transitorio di start-up del prototipo del target assembly di IFMIF con backplate a baionetta": Il contratto prevede l'analisi termica mediante un modello dipendente dal tempo agli elementi finiti, del transitorio di pre-riscaldamento del prototipo del Target Assembly di IFMIF installato presso il C.R. ENEA del Brasimone, equipaggiato con un opportuno sistema di riscaldatori elettrici.
b) Analisi e ottimizzazione del design della backplate di IFMIF ai fini dell'estensione della sua vita sotto flusso neutronico con conseguente swelling. L'attività del contratto consiste nell'individuazione, a partire dai risultati già ottenuti in passato, dei punti critici dell'attuale design della backplate del target assembly di IFMIF e nella successiva modifica, sulla base di nuove analisi parametriche e termomeccaniche, di tale design al fine di pervenire ad una configurazione geometrica in grado di minimizzare gli stress indotti e massimizzare la vita operativa del componente con riferimento, in particolare, agli effetti di swelling neutronico previsti durante le condizioni nominali di funzionamento.

Università di Firenze, Dipartimento di Chimica

Il contratto con il Dipartimento di Chimica dell'Università di Firenze corrisponde ad un incarico per servizi tecnici finalizzato all'analisi tramite cromatografia ionica di soluzioni acquose di ione Ammonio, ottenute dalla reazione fra acqua e Litio campionato dall'impianto Lifus6. Tali analisi consentono di determinare la concentrazione di azoto nel litio campionato.

CSM - Centro Sviluppo Materiali

Presso il CSM sono state svolte attività relative al trattamento e caratterizzazione dell'acciaio ferritico-martensitico (CR7).

Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Il Piano d'Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica 2014 rimarca il ruolo dell'efficienza energetica come strumento imprescindibile di riduzione dei consumi energetici nel nostro Paese, nel raggiungimento dell'obiettivo del -24% al 2020 e al fine di avviare un uso efficiente delle risorse.

L'impegno particolarmente intenso necessario per raggiungere tali obiettivi richiede efficaci politiche energetiche che da un lato facilitino lo sviluppo di tecnologie, processi, prodotti e servizi a ridotto consumo di energia e, dall'altro nello stesso tempo permettano di orientare i comportamenti dei consumatori e/o utenti finali verso un uso razionale dell'energia in modo da ridurre il consumo di energia attraverso l'acquisto consapevole e informato di prodotti e servizi efficienti prima e il loro corretto uso poi.

In tale senso l'efficienza energetica, intesa nel suo più ampio senso di riduzione del consumo di energia a parità di servizio che di uso razionale dell'energia è uno strumento funzionale alla costruzione di un quadro organico con un orizzonte di medio e lungo periodo; la sua doppia natura legata ai miglioramenti tecnologici ma anche a comportamenti consapevoli e responsabili verso gli usi energetici la rendono lo strumento più efficace dal punto di vista della praticabilità tecnica, finanziaria e socio-economica.
Il Rapporto Annuale sull'Efficienza energetica restituisce l'immagine di un Paese che mostra finalmente segnali significativi di un nuovo approccio strategico al risparmio energetico, come testimonia l'entità del risparmio conseguito al 31/12/2012 (circa 73.898 GWh/anno) corrispondente a circa il 60% dell'obiettivo da raggiungere al 2016. Nonostante ciò esiste ancora una significativo potenziale p di miglioramento dell'efficienza specialmente in alcuni settori.

Le barriere che ostacolano lo sfruttamento di questo potenziale includono: una carente attività di informazione e formazione verso tutti gli *stakeholder* (PA, aziende e cittadini), con riferimento ai benefici ottenibili con interventi di efficientamento del parco di beni e servizi; difficoltà di accesso al capitale per l'investimento iniziale necessario, la percezione di un rischio elevato dell'investimento e la mancanza di strumenti e dati sul ritorno economico dell'investimento stesso e, infine, la piccola dimensione dei progetti associata ad alti costi di transazione.

Il superamento delle barriere esistenti richiede che si verifichino una serie di condizioni: attività di RS&D sulle tecnologie energetiche innovative/non mature al fine di favorirne una più rapida introduzione sul mercato; l'esistenza di un bilanciato mix di regole e incentivi per le politiche di efficienza energetica; efficaci azioni di formazione, informazione, sensibilizzazione per promuovere comportamenti energetica-mente consapevoli; la messa a punto di semplici strumenti di valutazione dei benefici economici energetici/ambientali degli interventi effettuati, un quadro legislativo certo e stabile nel medio periodo indispensabile per attrarre gli investimenti.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale dell'attività consiste nello sviluppo di strumenti e metodi, che mirano al miglioramento di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di stimolare nel mercato la circolazione di prodotti più performanti.
Poiché il panorama degli *stakeholder* è piuttosto complesso e caratterizzato da diverse tipologie le attività sono state suddivisi in cinque linee di attività principali, che si articolano a loro volta in differenti obiettivi.
L'attività a termine, con un orizzonte temporale triennale, si articola attraverso le seguenti sette linee di attività, più una dedicata alla diffusione dei contenuti e dei risultati ottenuti:

a. Reti di poligenerazione
b. Gestione ottimale reti di edifici
c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione
d. Tecnologie per l'industria del freddo
e. Recupero di elementi pregiati presenti nei RAEE
f. Realizzazione di una facility per la sperimentazione e verifica di motori elettrici ad alta efficienza
g. Analisi di soluzioni tecniche per l'efficientamento dei processi produttivi nelle PMI
h. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Reti di poligenerazione

L'attività relativa alle reti di poligenerazione distribuita è incentrato sulla realizzazione e sull'applicazione di una piattaforma software avanzata in grado di simulare il comportamento di reti energetiche in assetto poligenerativo e sull'identificazione di indici e parametri caratteristici (anche mediante altri strumenti software), idonei a valutarne le prestazioni.

a.1 Realizzazione e ottimizzazione della piattaforma ENSim per la simulazione di reti termiche in assetto poligenerativo

La piattaforma Energy Network Simulator (ENSim, sviluppata da ENEA nelle precedenti due annualità) è stata integrata con nuovi componenti per poter estendere le funzionalità del simulatore già implementate nelle precedenti annualità e valutare con maggiore dettaglio la reale capacità di una rete termica di offrire servizi integrativi come l'immissione di calore da parte di utenti connessi in regime di scambio sul posto. Essendo i suddetti servizi strettamente dipendenti dal livello termico nel punto di immissione è stato implementato un nuovo modello dettagliato di rete che consente di simulare la variazione locale di temperatura generata nei singoli nodi dalle diverse tipologia di connessione delle utenze attive (es. ritorno su mandata, mandata su mandata). Parallelamente è stata effettuata una validazione del modello con utenti che si configurano solo come consumatori mediante il confronto con le prestazioni di una rete reale.

A conclusione dell'attività sono stati effettuati delle analisi dettagliate di tre casi studio in cui sono state valutate le potenzialità di installare una rete di teleriscaldamento in un quartiere centrale di una città altamente popolata come Roma e la possibilità di trasformare una rete esistente da passiva ad attiva, in una rete, cioè, in cui l'utente ha la possibilità di immettere in rete l'energia da lui generata, secondo le logiche che saranno descritte in seguito.

Estensione modello rete di TLR con nuove librerie per analisi dettagliata net metering termico

Per poter effettuare le valutazioni sulle variazioni locali di temperatura indotte nei singoli nodi dalle diverse tipologie di connessione delle utenze attive, i singoli tratti della condotta di mandata e di ritorno sono stati modellati con una equazione differenziale che riproduce il comportamento dinamico della condotta nel dominio del tempo (modello di rete con accumulo distribuito) avente come condizione al contorno la temperatura e la portata dei fluido termovettore in ingresso e la temperatura del terreno, al fine di calcolare anche le dispersioni termiche (Figura 315).

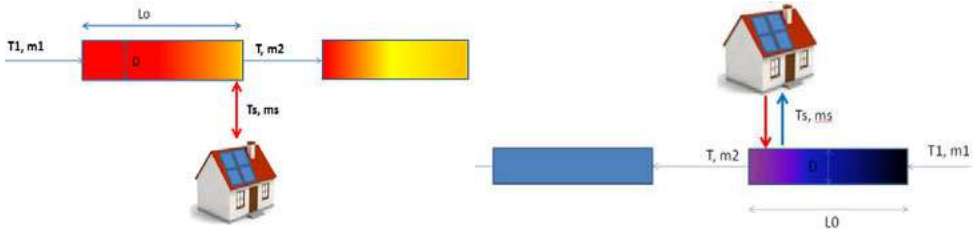


Figura 315. Schematizzazione tratti della rete di mandata e di ritorno con modello accumulo distribuito

Il nuovo modello di rete integra le funzioni di volano termico e dispersione termica in un unico blocco Simulink, tali funzioni nella precedente versione venivano assolte da due distinti blocchi:

- blocco accumulo centralizzato (il cui volume coincide con il totale volume di rete)
- blocco calcolo dell'andamento della temperatura di rete in funzione della distanza dall'uscita della centrale e della temperatura dell'accumulo centrale.

Il modello con accumulo distribuito calcola la portata e temperatura (m^2, T) in uscita da ogni tratto di rete conoscendo portata e temperatura (m1, T1) in ingresso e portata e temperatura (ms, Ts) immessa dall'eventuale utente attivo connesso in regime di scambio sul posto.

I confronti effettuati tra le due modellizzazioni di rete mostrano che il modello con accumulo distribuito è capace di valutare anche le variazione di temperatura lungo le dorsali dovuta alla dispersione termica.

Per poter valutare l'effetto termico generato in ciascun nodo della rete dalle diverse modalità di connessione delle utenza attive (ritorno su mandata, mandata su mandata) è stato rielaborato il modello di sottostazione bidirezionale implementato nella precedente annualità riadattandolo al nuovo modello di rete con accumulo distribuito.

Il modello di sottostazione attiva connessa in modalità "ritorno su mandata" consente l'immissione di potenza termica nella condotta di mandata senza dover installare un secondo scambiatore e senza effettuare una nuova connessione alla rete. Il modello "ritorno su mandata" inverte la portata del fluido termovettore in ingresso alla sottostazione consentendo l'immissione di potenza nella dorsale di mandata quando la sorgente distribuita (es. solare termico) raggiunge i livelli termici sufficienti per poter invertire il flusso di potenza.

Nel modello di immissione "mandata su mandata" sono stati modellati due scambiatori di calore, di cui uno ha il compito di immettere potenza in rete generata dalla sorgente termica locale. Quest'ultimo, essendo connesso in serie alla condotta di mandata, può generare nei periodi di basso carico, come mostrato nelle simulazioni, elevate temperature sia nella condotta di mandata sia nella condotta di ritorno (fino a 90°C-100°C) con conseguente perdita di efficienza e di producibilità dell'impianto solare d'utente essendo la stessa strettamente dipendente dalla temperatura di esercizio. Come esempio si riporta in Figura 316 la variazione di producibilità di un impianto solare d'utente connesso ad una rete termica prova simulata con ENSim al avariare della superficie solare installata nella stessa dorsale. Alla rete prova, estesa complessivamente per circa 1,8 km, sono allacciati 4 complessi residenziali di cui due sono dotati di impianti solari connessi in regime di net metering termico. Nelle simulazioni effettuate la superficie solare dell'edificio 3 è stata mantenuta inalterata (pari a 40 m^2) mentre è stata variata la superficie solare dell'edificio 1 connesso a monte. Come si osserva nel grafico, la configurazione "ritorno su mandata" non altera le prestazioni dell'impianto solare dell'edificio 2, mentre la connessione "mandata su mandata" la riduce fino a circa il 33%.

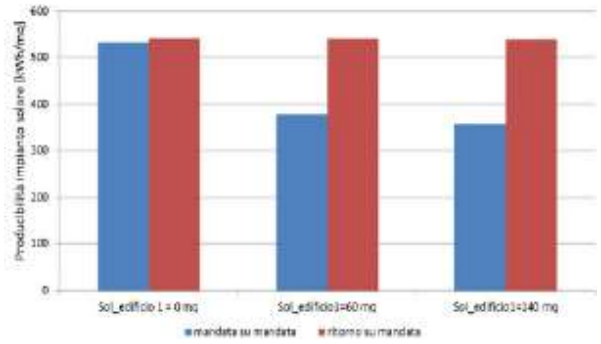


Figura 316. Variazione di producibilità dell'impianto solare dell'edificio 2 al variare della superficie solare installa in copertura dell'edificio 1

Nel corso dell'ultima annualità, utilizzando apposita strumentazione non invasiva, è stata condotta una campagna di monitoraggio da Febbraio 2015 a Luglio 2015 di una sottostazione termica a servizio di una scuola materna della provincia di Brescia connessa alla rete di teleriscaldamento (Figura 317).



Figura 317. Schema e foto della Sottostazione termica monitorata

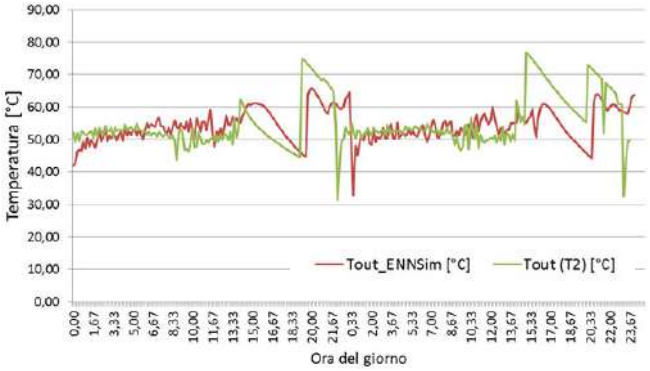


Figura 318. Confronto temperatura ramo di ritorno: misurata e simulata con ENSim

L'obiettivo del monitoraggio è stato sia quello di supportare la progettazione degli interventi per poter rendere l'utenza attiva e connetterla in regime di scambio sul posto con la rete (attività condotta in collaborazione con l'Università di Bologna) sia quello di validare e calibrare il modello di scambiatore a portata variabile implementato nella piattaforma ENSim. In Figura 318 si riporta il confronto tra la temperatura monitorata e la temperatura simulata in uscita dallo scambiatore per due giorni del mese di febbraio.

Nel corso dell'ultima annualità è stata implementata in ENSim la struttura software, schematizzata in Figura 319 per acquisire curve di carico in tempo reale (termico ed elettrico) attraverso lo sviluppo di appositi codici in grado di stabilire una connessione con protocollo TCP/IP su Modbus tra gli strumenti di misura e la piattaforma di simulazione. I codici per la connessione e la codifica del protocollo sviluppati in Simulink sono stati validati con l'ausilio di specifiche piattaforme per il monitoraggio dei carichi termici ed elettrici: la piattaforma Mcubo utilizzata per il monitoraggio dei carichi elettrici di alcuni edifici ENEA presenti nel territorio nazionale e la piattaforma TOMO utilizzata per il monitoraggio dei piè di stabile e della centrale di cogenerazione della rete di TLR a sud di Torino studiata in collaborazione con il Politecnico di Torino.

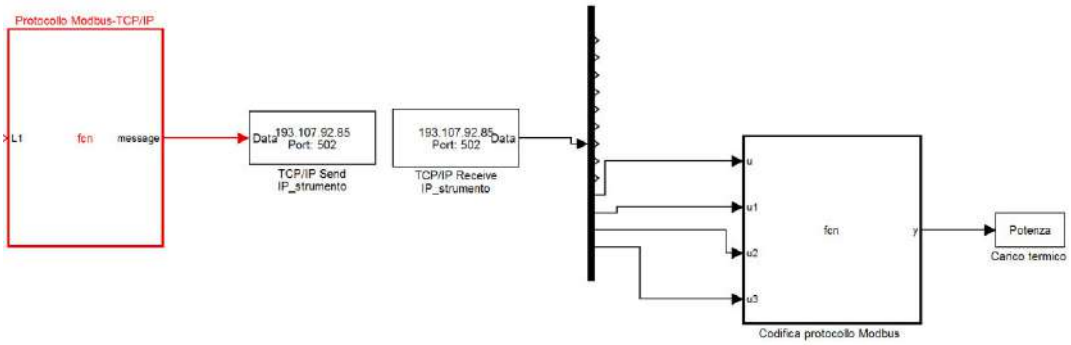


Figura 319. Schema modello Simulink per acquisire i carichi termici ed elettrici in tempo reale

Validazione della piattaforma ENSim

La validazione della piattaforma nella configurazione con utenti che si configurano solo come consumatori, ha riguardato in particolare i blocchi che modellano il comportamento della rete di teleriscaldamento e ha avuto come obiettivo particolare la valutazione delle inerzie termiche e il confronto degli andamenti dei segnali per capire se la dinamica riprodotta dal modello software fosse in grado di riprodurre l'andamento reale della rete monitorata.

La rete scelta per il confronto è situata nel quartiere di Torino Sud e alimenta (per uso riscaldamento e ACS) 31 edifici residenziali ed un edificio uffici alimentato direttamente dalla centrale termica, composta da un cogeneratore con motore endotermico e tre caldaie di integrazione (la stessa rete è oggetto di un'altra attività condotta dal Politecnico di Torino, che ha realizzato il sistema di monitoraggio che ha prodotto i dati per il confronto).

La prima parte del lavoro ha riguardato l'implementazione della centrale termica e delle logiche di gestione dei singoli impianti in modo da replicarne il funzionamento con il minimo errore possibile. Il periodo preso in considerazione va dal 13 marzo '15 al 12 aprile '15; tutto il mese considerato, anche se alla fine della stagione invernale, è significativo ai fini della configurazione riscaldamento in quanto la stagione fredda si è protratta a lungo (e si conclude il 15 aprile).

Le operazioni effettuate nella fase di validazione che hanno consentito al modello software di generare degli andamenti soddisfacenti e in grado di replicare quelli misurati con elevata approssimazione sono descritte in dettaglio nel rapporto tecnico completo; qui si evidenzia che, dovendo incentrare il confronto sui blocchi che simulano la rete, le utenze (edifici residenziali e ufficio) sono state simulate non con i blocchi dell'edificio sviluppati negli anni precedenti, ma fornendo alla piattaforma i valori provenienti dalle misure, in questo modo annullando l'errore indotto dai profili delle utenze.

I risultati ottenuti dimostrano come la piattaforma ENSim è in grado di riprodurre il funzionamento di una rete di teleriscaldamento reale con una elevata approssimazione [rapporto RdS/PAR2014/013].

Il confronto energetico fra l'energia termica erogata dalla centrale termica nell'intero periodo di confronto evidenzia un errore molto contenuto, attestato sul 7,3%:

- energia erogata dal simulatore: 596 MWh
- energia erogata misurata: 552,3 MWh.

L'aspetto positivo da rimarcare è che il simulatore riesce a riprodurre con elevata accuratezza la morfologia della grandezza misurata, riproducendone molto bene le variazioni temporali, specialmente in alcuni giorni, in cui, evidentemente le condizioni reali sono più prossime a quelle riprodotte in simulazioni (che non variano per tutto il periodo). Si nota altresì che la temperatura simulata è sottostimata rispetto a quella misurata e ha un andamento

più regolare, sia in mandata sia in ritorno, probabilmente perché nella realtà le isteresi degli organi di attuazione sono maggiori che in simulazione e, soprattutto, perché esistono delle oscillazioni nelle portate che nel simulatore sono assunte costanti. Si può anche ipotizzare che si siano verificate delle situazioni che hanno richiesto interventi di regolazione manuali, impossibili da replicare in simulazione o che in alcune circostanze le diverse misure non sono fra lo congruenti.

Pur avendo ottenuto ad un ottimo risultato, si ritiene che le differenze che permangono possano essere ridotte ulteriormente da un confronto effettuato su un intervallo temporale più ampio e da maggiori informazioni sia sulle grandezze termiche fondamentali (prime fra tutte le portate in gioco) sia sulle regolazione impostate dai gestori della rete.

Completamento dello sviluppo della piattaforma ENSim

Altra attività ha riguardato lo sviluppo di un accumulo termico a stratificazione, in cui il serbatoio è suddiviso in un certo numero di strati ipotizzati a temperatura uniforme e con l'ipotesi che il flusso in ingresso arrivi nello strato con la temperatura a lui più vicina e garantisca, così, il minimo mescolamento possibile. La Figura 320 riporta l'andamento delle temperature per un modello dotato di tre nodi e con ingressi imposti costanti (esattamente sono ingressi a variazioni fisse, ovvero gradini) che dimostrano la correttezza dell'implementazione del modello.

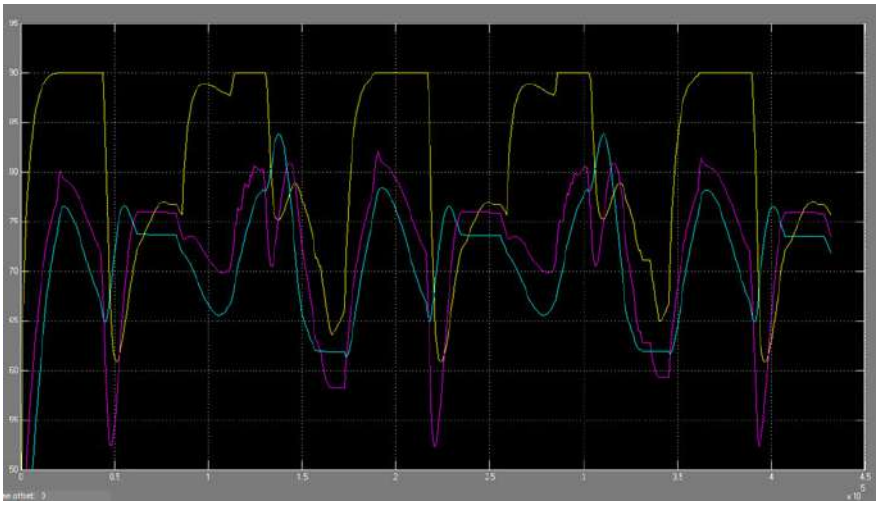


Figura 320. Andamento delle temperature [°C] dei vari strati del serbatoio in funzione del tempo [ore]

Un'altra attività ha riguardato il miglioramento dei blocchi che permettono di configurare tutte le tipologie di rete. Nell'annualità passata il modello consentiva solamente il layout ramificato, configurabile mediante una *m-function* che andava scritta interamente per ogni rete, con uno schema implementativo complessivo rigido; infatti una modifica, anche piccola, implicava una riscrittura del file di configurazione e obbligava a rivedere i collegamenti nel modello Simulink in cui la rete vera e propria era collegata alle utenze e alla centrale termica e, di fatto, a riprogrammare il modello Simulink. L'attività di sviluppo finale svolta ha invece cambiato radicalmente questo approccio, rendendo il blocco che modella la rete una piattaforma di sviluppo in grado di realizzare la configurazione voluta (ramificata, maglia o anello) collegando opportunamente i nuovi blocchi elementari creati e ricavati dalle relazioni sviluppate nell'attività precedente, raggruppati per funzionalità.

Per facilitare l'immissione di tali informazioni soprattutto in presenza di reti particolarmente complesse in cui i tratti di connessione tra un nodo e l'altro possono essere numerosi è stata progettata e sviluppata un'interfaccia direttamente nell'ambiante di lavoro Matlab/Simulink in modo da ottenere uno strumento perfettamente integrato nella piattaforma ENSim.

Con questo nuova impostazione ENSim diventa a tutti gli effetti una piattaforma di sviluppo (in ambiente Simulink) che ha dei blocchi predefiniti che vanno opportunamente collegati tra loro per realizzare le configurazioni volute. Infatti per la centrale termica sono disponibili i blocchi che simulano gli impianti di generazione termica ed elettrica sviluppati nelle passate annualità, mentre per l'edificio è possibile usare il blocco completo che calcola mediante un'equazione differenziale l'andamento della temperatura interna e la richiesta di potenza per la climatizzazione invernale ed estiva e per il fabbisogno di acqua calda sanitaria, o il blocco semplificato che legge un profilo di carico (potenza) pre-calcolato.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/013.

a.2 Reti poligenerative in contesti territoriali in assenza di reti termiche

Il contesto territoriale, in cui si inserisce la rete TLR poligenerativa progettata e simulata , è quello di una porzione di quartiere ad alta densità insediativa all'interno della città consolidata, che secondo il Piano Regolatore Generale ricade nella zona T2, ovvero tessuti di espansione novecentesca a tipologia definitiva ed ad alta densità abitativa residenziale e commerciale della città.

Il sito scelto si presenta con una pianta a maglia regolare, con caratteristiche di replicabilità molto elevate, costituita da 45 edifici che comprendono diverse destinazioni d'uso: residenziale, scuole e uffici (Figura 321).



Figura 321. Configurazione e pianificazione territoriale di una rete di poligenerazione

Il sito oggetto di studio è delimitato dalla morfologia del territorio, a nord si eleva con un area verde destinata dal piano regolatore a riserva naturale, a sud con un area d'interesse storico vincolata e invalicabile, la Città del Vaticano, a ovest dalla stazione ferroviaria di Valle Aurelia e ad est da Piazzale degli Eroi, tutti gli edifici sono stati edificati negli anni '70.

Attraverso fotografie e misurazioni fatte durante i sopralluoghi nella zona di riferimento è stato possibile verificare il dimensionamento degli edifici e la creazione di una planimetria di riferimento su scala reale per poter effettuare le simulazioni necessarie a disporre gli algoritmi per il calcolo dei parametri energetici per la creazione della rete.

Si è deciso di suddividere gli edifici per geometrie simili, che si possono identificare con 6 tipologie ognuna delle quali con differenti caratteristiche geometriche. Ognuna delle tipologie evidenziate è stata esaminata non solo per le proprie caratteristiche geometriche ma anche per le caratteristiche morfologiche e termo-fisiche delle superfici opache e delle superfici trasparenti.

Per la definizione della struttura muraria degli edifici si è ritenuto opportuno seguire le indicazioni fornite dalla UNI/TS 11300-1 sulle prestazioni energetiche degli edifici in particolare per la determinazione della trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti, perché non è stato possibile effettuare una determinazione rigorosa di calcolo ne sulla base di ispezioni ne da altre fonti attendibili.

Sono stati svolti diversi sopralluoghi nell'area d'interesse per poter esaminare e progettare la rete di poligenerazione a livello reale cercando di valutare tutte le problematiche relative al passaggio dei tubi di mandata e di ritorno, per minimizzare i costi dei materiali e di messa in opera attraverso attente valutazioni nel rispetto del costruito esistente.

Sviluppo della rete TLR

Lo scopo dell'attività è lo sviluppo di una rete energetica di un contesto territoriale dove non è presente alcuna

rete di TLR. Più specificatamente è stata effettuata la progettazione di una rete di teleriscaldamento di un quartiere di Roma ad alta densità abitativa. L'obiettivo dell'attività svolta è rivolto a valutare i benefici e le criticità del TLR come alternativa all'attuale fornitura energetica, assenza di TLR e riscaldamento di tipo centralizzato/ autonomo, del quartiere Valle Aurelia.

Partendo dal rilievo documentale del quartiere scelto, l'attività ha riguardato la valutazione dei seguenti aspetti: predisposizione del sito, scelta dei materiali, vincoli di installazione, caratteristiche climatiche del sito, tracciato planimetrico, dimensioni, etc., in modo da garantire la fattibilità realizzativa delle scelte tecniche – impiantistiche sviluppate.

Una volta individuato il confine dell'area d'intervento da destinare alla rete TLR, la capacità termica della stessa, atta a garantire il benessere ottimale, è stata valutata basandosi sui valori derivanti dalle caratteristiche energetiche-progettuali di ogni sistema edificio – impianto e su quelli teorici che garantiscano i livelli di comfort della normativa di riferimento. Determinata, quindi, la richiesta termica in funzione delle utenze presenti negli edifici, sono state progettate due tipologie di configurazioni per la produzione centralizzata dell'energia termica: *configurazione 1* con caldaia a gas e *configurazione 2* con cogeneratore. Per quanto riguarda, le caratteristiche energetiche e strutturali della rete (portate, lunghezze, diametri, velocità di circolazione del fluido, numero tratti e tipo di distribuzione) sono state valutate tenendo conto degli eventuali vincoli presenti per il passaggio delle condotte di distribuzione. La rete di distribuzione si compone di 73 tratti per una lunghezza complessiva di circa 4 km che collegano 45 edifici per una potenza termica complessiva di circa 48 MW. Nella Tabella 81 si riportano i dati di input, per il dimensionamento della rete, in termini geometrici e energetici, calcolati considerando un valore di 31,5 [W/m^3] di potenza termica per volume riscaldato.

Tabella 81. Dati geometrici e energetici di dimensionamento

Tipo edificio	Numero	Volume riscaldam. edificio [m^3]	Volume totale edificio [m^3]	Pot. termica edificio [MW]	Pot. termica totale [MW]
ARANCIONE	8	46250	370000	1,46	11,66
BLU	4	18375	73500	0,58	2,32
ROSA	3	60000	180000	1,89	5,67
ROSSO	5	25000	125000	0,79	3,94
VERDE	8	35000	280000	1,10	8,82
AZZURRO	15	20900	313500	0,66	11,85
SCUOLA	1	21852	21852	0,69	0,69
MARRONE	1	5940	5940	0,19	0,19
Totale rete	45	233317	1369792	7,35	45

in Figure 322 sono rappresentate rispettivamente le potenze dei singoli edifici e della rete.

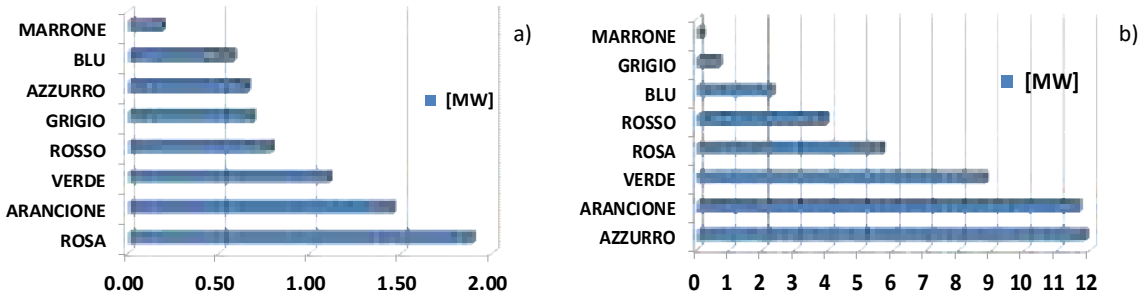


Figura 322. Potenza termica edifici (a) e potenza termica totale rete

Per la progettazione tecnica-energetica della rete è stato sviluppato un modello informatico in ambiente simulink. Il modello è costituito da 4 blocchi principali: *blocco-edifici, blocco-generazione energetica, blocco-distribuzione di mandata e di ritorno*, in ciascuno dei quali sono state implementate le leggi termo-fisiche e la logica di funzionamento per gli elementi componenti.

All'interno dell'attività di sviluppo dei blocchi del modello è stato creato un database con alcuni esempi di "edificio tipo" che comprendono diverse categorie edilizie e destinazioni d'uso. Ciascun edificio è identificato da una

scheda illustrativa composta dall'anno di costruzione e una categoria di appartenenza tra residenziale, scuola, ufficio o commerciale, che viene completata con i dati riguardanti: *regione e zona climatica, dati tipologico – dimensionali, parametri termo-fisici dei componenti d'involucro, parametri termo-fisici dei serramenti*. Trattandosi di edifici reali, di essi sono riportate le fotografie; i loro principali dati tipologico-dimensionali (volume lordo riscaldato, rapporto di forma, superficie lorda di pavimento, numero di piani, numero di appartamenti) sono dati reali. Questi dati reali, associati agli specifici profili di carico, potranno essere prelevati dalla rete e quindi utilizzati dagli utenti per un' analisi più completa, in presenza di informazioni limitate sulle caratteristiche termo - fisiche, nella prospettiva di poter essere utilizzate anche come strumento di pianificazione per una migliore riqualificazione.

Si evidenzia, che nella configurazione 1 l'aumento dell'efficienza di produzione rispetto allo stato attuale è dovuto alla sostituzione delle caldaie esistenti con unità di generazione termica più efficienti. Tale maggiore efficienza compensa le perdite dovute alla rete di distribuzione del calore. Nell'ipotesi 2, invece, l'aumento dell'efficienza del sistema in termini di consumo di energia primaria è dovuto alla produzione di energia elettrica da destinare all'autoconsumo o alla vendita. Nella Figura 323a si riporta il confronto tra le energie termiche prodotte in centrale (Eaux_CT) nelle configurazioni ipotizzate. Nella stessa figura è rappresentata anche l'energia elettrica prodotta dal cogeneratore, la quale determina una maggiore efficienza globale della configurazione 2 rispetto alla configurazione 1.

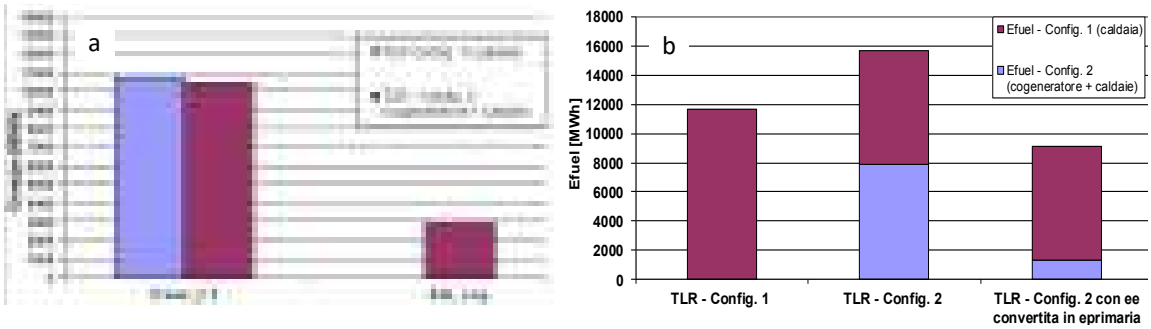


Figura 323. Energia termica prodotta (a) ed energia primaria utilizzata (b)

Nella Figura 323b è rappresentata l'energia primaria utilizzata dai due sistemi di produzione ipotizzati. L'energia primaria richiesta dalla configurazione 2 risulta maggiore rispetto alla configurazione 1 qualora non si consideri nel computo il risparmio di energia primaria dovuta alla produzione di energia elettrica. Riportando la produzione elettrica in termini di energia primaria e sottraendola alla quota richiesta dal cogeneratore, così come previsto dalla delibera EEN 09/10 dell'AEEG, si ottiene un risparmio totale in termini di energia primaria pari a circa il 16%. Pertanto la configurazione 2 rappresenta la soluzione energeticamente più efficiente tra quelle analizzate per soddisfare la richiesta termica degli edifici considerati.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel seguente rapporto RdS/PAR2014/014.

a.3 Trasformazione di reti di teleriscaldamento esistenti in reti poligenerative con presenza di scambio attivo

L'oggetto del presente subtask è la valutazione dell'incidenza della trasformazione di reti di teleriscaldamento esistenti mediante l'installazione di sistemi di generazione distribuita rinnovabili.

A tal fine sono state analizzate le reti del quartiere Corticella sito nel comune di Bologna e quella del quartiere Arquata nel comune di Torino, dapprima implementandole all'interno della piattaforma software ENSim e successivamente determinando la realistica superficie disponibile, sugli edifici, per l'installazione di collettori solari per la produzione di acqua calda. Il sistema di generazione della rete di Corticella è costituito da caldaie, mentre la centrale termica della rete di Arquata comprende anche un cogeneratore.

In Tabella 82 si riportano i dati caratteristici delle reti analizzate e la valutazione della potenza nominale installabile per quanto attiene ai collettori solari ($P_{sol,max}$).

Tabella 82. Caratteristiche delle reti considerate

RETE DI ARQUATA	
Numero Sottostazioni	31
Superficie Utile edifici [m^2]	38192
Lunghezza totale rete [m]	3992
Potenza termica installata in CT[kW]	4661
Potenza elettrica installata in CT [kW]	970
Potenza solare nominale teoricamente installabile $P_{sol,max}$ [kW]	1055

RETE DI CORTICELLA	
Numero Sottostazioni	17
Superficie Utile edifici [m^2]	109573
Lunghezza totale rete [m]	3673
Potenza termica installata in CT[kW]	14530
Potenza elettrica installata in CT [kW]	0
Potenza solare nominale teoricamente installabile $P_{sol,max}$ [kW]	2196

Sulla scorta di tali dati e valutazioni sono stati ipotizzati diversi scenari di installazione della potenza solare. In particolare si sono valutate le seguenti opzioni:

- **Scenario 1** Installazione di tutto il solare potenzialmente installabile (100% $P_{sol,max}$)
- **Scenario 2** Installazione del 75% del solare potenzialmente installabile (75% $P_{sol,max}$)
- **Scenario 3** Installazione del 50% del solare potenzialmente installabile (50% $P_{sol,max}$)
- **Scenario 4** Installazione del 25% del solare potenzialmente installabile (25% $P_{sol,max}$)

La distribuzione del solare sui singoli edifici negli scenari 2, 3 e 4 è stata scelta in maniera proporzionale ai consumi delle relative sottostazioni in modo da privilegiare, per quanto possibile, la condizione dell'autoconsumo dell'energia rinnovabile prodotta.

La necessaria implementazione delle reti in ambiente Simulink è stata effettuata attraverso il modello atomizzato di rete che caratterizza i singoli nodi della rete e li interconnette secondo lo schema fisico reale. Ciascuna delle reti è stata simulata in uno "Scenario 0" (Baseline), nel quale non è stata considerata la presenza di energia da fonte rinnovabile e che rappresenta lo stato attuale della rete stessa. Da tali simulazioni sono stati ricavati i consumi specifici medi, per riscaldamento ed ACS, del parco edilizio servito da ciascuna rete, presentati in Tabella 83.

Tabella 83. Consumo specifico medio del parco edilizio

	Consumo specifico medio del parco edilizio [kWh/m^2 a]
Rete di Arquata	148
Rete di Corticella	140

Alcuni dei risultati più significativi emersi dall'analisi condotta sugli scenari simulati vengono di seguito riportati, in Tabella 84 utilizzando i seguenti indici:

- Total Primary Energy Factor - PEF: è il rapporto tra l'energia primaria (fossile e rinnovabile) utilizzata per soddisfare la richiesta termica della rete e l'energia termica effettivamente immessa in rete.
- Non-Renewable Primary Energy Factor - PEF_{NR}: è il rapporto tra l'energia primaria da fonte fossile utilizzata per soddisfare la richiesta termica della rete e l'energia termica totale effettivamente immessa in rete.
- Renewable Primary Energy Factor - PEF_R : è il rapporto tra l'energia primaria da fonte rinnovabile utilizzata per soddisfare la richiesta termica della rete e l'energia termica totale effettivamente immessa in rete.
- Non-Renewable equivalent to nominal power duration - Heq_{NR}: è il rapporto tra l'energia termica da fonte fossile immessa in rete e la relativa potenza nominale installata. Rappresenta le ore equivalenti a pieno carico del sistema di generazione non rinnovabile, in un anno.
- Renewable equivalent to nominal power duration - Heq_{R}: è il rapporto tra l'energia termica da fonte rinnovabile immessa in rete e la relativa potenza nominale installata. Rappresenta le ore equivalenti a pieno carico del sistema di generazione rinnovabile, in un anno.

- Fattore di sfruttamento del solare - $F_{_SR}$: è il rapporto tra l'energia termica da fonte rinnovabile prodotta, al netto della differenza delle perdite termiche di rete rispetto alla Baseline (scenario in assenza di fonti rinnovabili), e l'energia termica da fonte rinnovabile prodotta.

Tabella 84. Indici dell'energia primaria

	Rete di Arquata			Rete di Corticella		
	PEF	PEF_{NR}	PEF_R	PEF	PEF_{NR}	PEF_R
Baseline	0,822	0,822	0	1,176	1,176	0
Solare 25%	0,835	0,802	0,033	1,171	1,137	0,033
Solare 50%	0,846	0,781	0,065	1,166	1,109	0,057
Solare 75%	0,856	0,760	0,093	1,165	1,097	0,067
Solare 100%	0,856	0,744	0,112	1,163	1,088	0,075

Dalla tabella si nota che nella rete di Arquata, in cui è presente un assetto cogenerativo, l'introduzione del solare provoca un aumento dell'indice PEF, che rappresenta un peggioramento nello sfruttamento dell'energia primaria totale (rinnovabile più fossile). Occorre sottolineare che il PEF pone sullo stesso piano l'energia derivante dalla combustione del gas e quella derivante dalla radiazione solare e che l'introduzione di quest'ultima va a diminuire l'utilizzo del cogeneratore.

Se si considera quest'ultima come un apporto rinnovabile, che quindi non contribuisce all'aumento dell'energia primaria, si nota un miglioramento del sistema, rappresentato dalla diminuzione dell'indice PEF_{NR}, fino a un massimo del 7,8% in corrispondenza dello scenario con la maggior presenza di solare installato. L'aumento dell'indice PEF_R all'aumentare della superficie di solare installato, indica invece che l'energia prodotta dal solare viene sfruttata meglio nello scenario 4, mentre peggiora all'aumentare del solare installato.

Nella rete di Corticella, in cui non è presente un assetto cogenerativo, l'introduzione del solare comporta sempre una diminuzione degli indici PEF e PEF_{NR}, implicando quindi un migliore sfruttamento dell'energia primaria, anche contemplando in quest'ultima quella prodotta da solare. Il PEF migliora fino ad un massimo di 1,6%, la diminuzione del PEF_{NR} arriva ad un massimo dell'8.8%.

In Figura 324a sono apprezzabili le ore equivalenti a pieno carico della rete di Arquata nei diversi scenari simulati. Si ha una diminuzione delle ore equivalenti del sistema fossile all'aumentare del solare installato: si passa da 1526 a 1373 h/a, con una diminuzione di circa il 10%. Per contro le ore equivalenti del sistema rinnovabile hanno una tendenza inversa. Lo stesso tipo di comportamento è riscontrabile nella rete di Corticella (Figura 324b) con una diminuzione delle ore equivalenti dei generatori che arriva ad un massimo di circa il 7%.

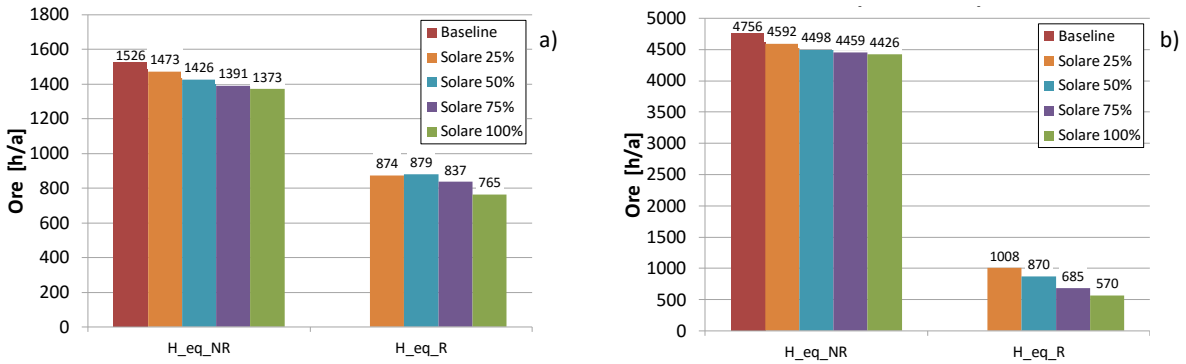


Figura 324. Ore di esercizio equivalenti a pieno carico (a) Rete di Arquata, (b) Rete di Corticella

In Figura 325 sono presentati i fattori di sfruttamento dell'energia prodotta da solare. Tale indice prende in considerazione la differenza delle perdite termiche di rete nello scenario considerato rispetto alla baseline: pertanto non rappresenta un rendimento in quanto, qualora le perdite termiche di rete risultassero diminuite rispetto alla baseline, tale fattore assumerebbe valori superiori all'unità.

Si nota che in entrambi i casi un sovradimensionamento del solare, determinando un aumento delle perdite di rete, comporta un minore sfruttamento dello stesso. I valori prossimi o pari all'unità sono legati ad un dimensionamento del solare che ne determina un elevato autoconsumo, e che minimizza le perdite di rete, anche rispetto allo scenario senza solare.

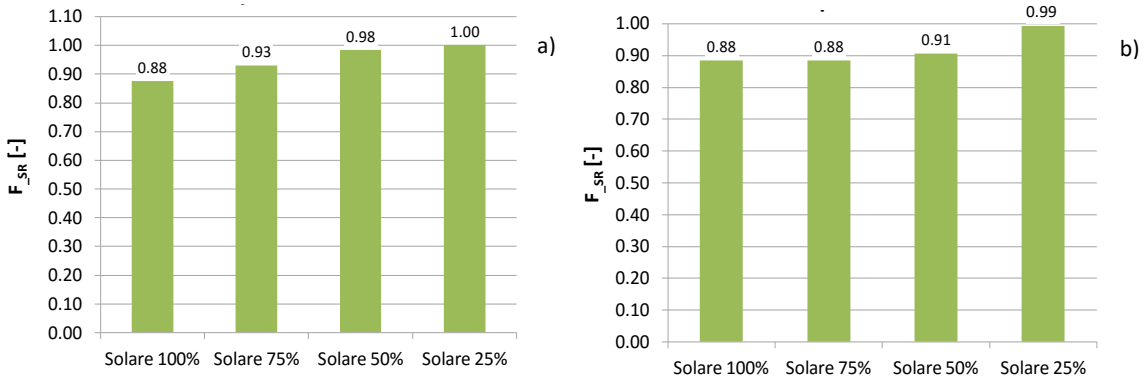


Figura 325. - Sfruttamento equivalente dell'energia solare prodotta (a) Rete di Arquata (b) Rete di Corticella

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel seguente rapporto RdS/PAR2014/015.

b. Gestione ottimale reti di edifici

L'obiettivo di questa linea di attività riguarda lo sviluppo di una metodologia per la gestione integrata di una rete di edifici terziari da applicare in una rete aperta o in un distretto urbano o in una facility a controllo centralizzato quali complessi direzionali, universitari, ospedalieri, scolastici, sportivi, commerciali ("Smart Village") al fine di supportare il gestore energetico nell'attuare politiche di efficientamento e controllo della domanda basate su una modellistica avanzata che non penalizzi il comfort dell'utente.

In particolare l'idea di base è quella di dotare la rete di edifici di sensoristica, sistemi di attuazione e di trasmissione dati ed un sistema centrale dove viene sviluppata la modellazione della rete, la diagnostica su ogni edificio della rete, la comparazione tra le prestazione dei vari edifici, la gestione ottimale e la gestione della domanda.

Gli obiettivi che si sono perseguiti nel triennio hanno riguardato metodologie di modellazione dei consumi termici ed elettrici, metodologie di analisi dati avanzata (diagnostica) e controllo adattivo, metodologie per l'impostazione automatica di set point per la gestione ottimale degli edifici al fine di attuare strategie di gestione della domanda. Nella precedenti annualità del triennio le metodologie sviluppate sono state applicate alla diagnostica e controllo adattivo di un edificio reale, è stato sviluppato un simulatore semplificato di consumi termici/elettrici di una rete di edifici e sono state sviluppate metodologie di ottimizzazione multi-obiettivo le quali sono state sperimentate su dati simulati. Inoltre sono state svolte le attività di approvvigionamento di strumentazione propedeutiche ad una reale gestione della domanda energetica.

In questo triennio sono stati quindi portati a compimento i seguenti prodotti significativi:

- piattaforma integrata di simulazione consumi - algoritmi di ottimizzazione finalizzato alla sperimentazione di scenari di 'active demand' su reti di edifici;
- piattaforma Smart Village: sistema on-line per analisi dati avanzata (diagnostica), controllo adattivo ed ottimizzazione di reti di edifici;
- facility sperimentale avanzata per lo studio in condizioni reali di una rete locale di smart building networks, smart districts (Smart Village), smart buidlings a diverso livello di sensorializzazione, smart rooms/office.

In questa annualità, le attività sono state prevalentemente sperimentali su casi reali, analizzando i benefici reali conseguiti. Oltre a ciò è stata sviluppata anche una parte di "studio di fattibilità" per lo sviluppo di metodologie che guardano ad un triennio successivo, ovvero la gestione integrata di domanda/produzione in un distretto (smart district).

b.1 Implementazione ed applicazione alla rete di edifici dei modelli diagnostici, controllo ed ottimizzazione

Implementazione e sperimentazione algoritmi di diagnostica termica

Nella presente attività è stato implementato e validato su singolo edificio il modello diagnostico sulla linea termica sviluppato nella precedente annualità (rapporti RdS/PAR2013/061 e RdS/PAR2013/062), e successivamente è stato esteso alla rete di edifici ed sperimentato su un cluster di edifici (edifici F66, F67, F68, F69, F70, F71, F72, F73). In particolare sono state analizzate le seguenti cause:

- C1 Malfunzionamento del timer in centrale termica;
- C2 Scorretta gestione della distribuzione del calore;
- C4 Staratura del termostato di stanza in periodo estivo,
- C5 Anomalia impianto di raffrescamento.

I dati sono stati analizzati considerando il numero di anomalie per mese, per fascia oraria e per indice di gravità come riportato nei grafici in Figura 326.

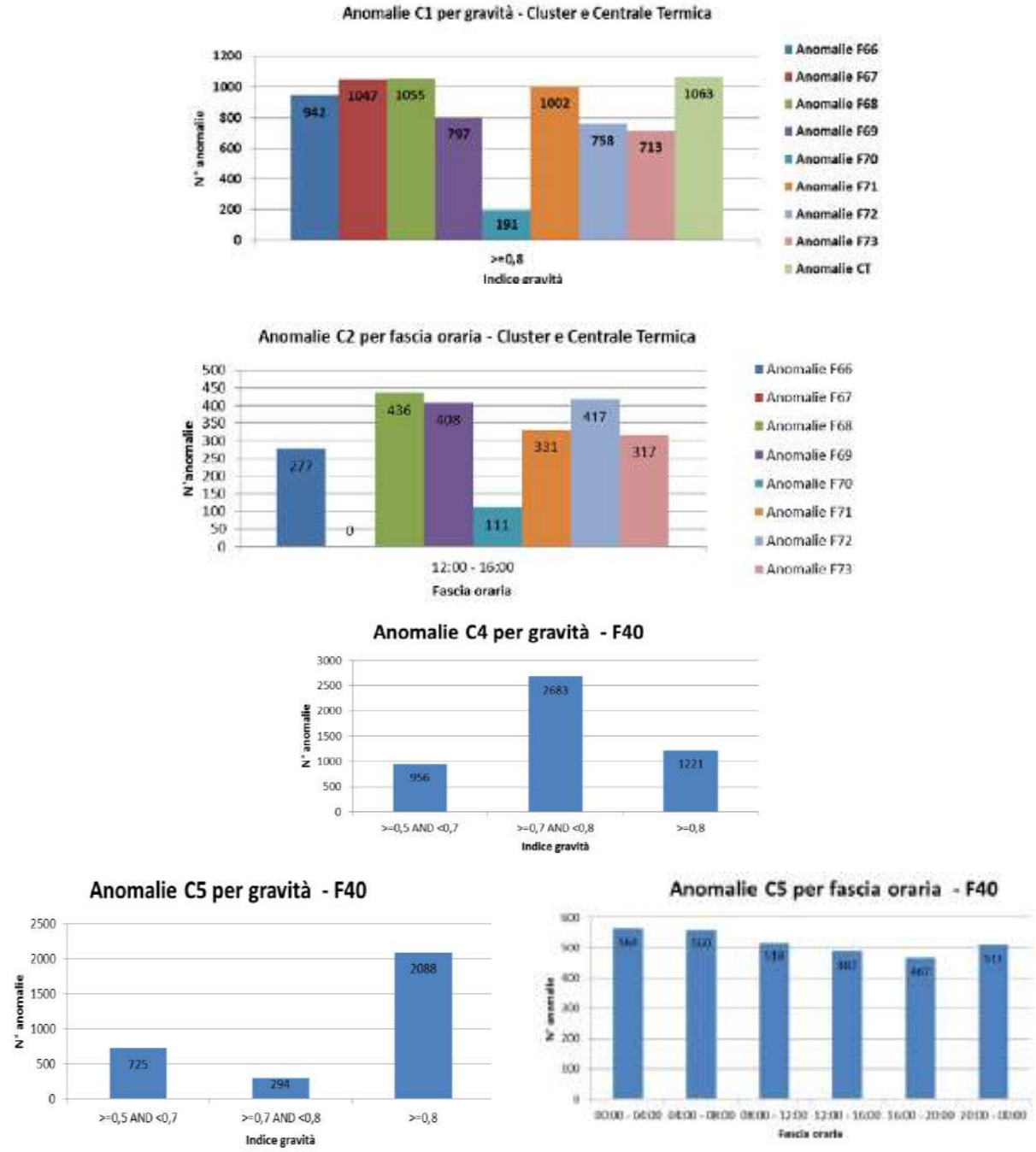


Figura 326. istogrammi anomalie per il cluster di edifici e per l'edificio F40

Sperimentazione della diagnostica elettrica ad una rete di edifici

Nella presente attività i modelli diagnostici elettrici (luce e condizionamento) sviluppati nelle precedenti annualità (RdS/2013/119, RdS/PAR2013/060 e RdS/PAR2013/061) sono stati estesi alla rete di edifici attraverso un'attenta attività di calibrazione dei modelli stessi in collaborazione con il Politecnico di Torino, come descritto nel rapporto RdS/PAR2014/026.

Estensione modulo di supervisione BEMS

Nel quadro di una collaborazione con l'Università di Roma Tre, sono state estese le funzionalità del modulo di supervisione BEMS realizzate nella precedente annualità includendo: implementazione di un modulo di diagnostica a basso livello, di previsioni meteo, di controllo delle utenze elettriche di una rete di edifici, implementazione del modulo di ottimizzazione di un edificio, strategie di controllo predittivo distribuito per la regolazione della temperatura interna di edifici multizona, modelli stocastici per la diagnostica termica. Per una descrizione dettagliata dell'attività si rimanda al rapporto RdS /PAR2014/024.

Validazione ed analisi dati

L'attività di validazione e analisi dei dati di monitoraggio iniziata nelle precedenti annualità, si è concentrata sulla verifica della qualità dei dati di natura energetica, ambientale e gestionale provenienti dalla sensoristica installata all'interno degli otto edifici componenti il cluster (e connessa centrale termica del distretto) e sull'edificio F40 ed è stata condotta in collaborazione con il Politecnico di Torino (RdS/PAR2014/026).

In ENEA si è proceduto alla verifica sperimentale delle metodologie di controllo adattivo delle utenze elettriche e termiche dell'edificio F40, preso come caso di riferimento.

L'attività sperimentale svolta nel triennio ha permesso di valutare il risparmio energetico conseguibile con le differenti strategie di controllo sviluppate. Per quanto l'energia elettrica, secondo la logica dell'energy on demand è stato implementato un duplice controllo adattivo l'illuminazione indoor, sia a livello di quadro elettrico che di singola stanza, che consente lo spegnimento dell'illuminazione indoor al variare del livello di occupazione e, in corrispondenza delle singole stanze, anche in funzione della luminosità naturale rilevata dai sensori ad infrarossi presenti. Si riportano di seguito i coefficienti di risparmio energetico conseguiti nella sperimentazione svolta relativi all'illuminazione indoor:

Tipo di controllo	% risparmio
Controllo di stanza	40%
Controllo di quadro	25 %

Per quanto riguarda i consumi termici sono state testate strategie di ottimizzazione basate sul controllo remoto del set point del termostato di stanza e del set point della temperatura di mandata del circuito di mandata. Nella tabella seguente sono riportati i coefficienti di risparmio energetico conseguiti riferiti alla sperimentazione condotta nel periodo invernale 2014-2015, relativi sia all'energia termica che a quella elettrica Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/023.

Vettore energetico	% risparmio
Energia termica	12%
Energia elettrica	23%

Metodologie per l'analisi del comportamento degli utenti e di trend detection

L'attività di analisi del comportamento degli utenti, descritta in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2014/026, si è incentrata sulla definizione, misurazione, modellazione del comportamento degli utenti legato all'uso dell'energia in edifici adibiti a terziario. Il principale obiettivo dell'attività è la definizione di modelli stocastici del comportamento dell'utente(come ad esempio apertura/chiusura finestre, uso dell'illuminazione artificiale, o uso dell'impianto di riscaldamento), sviluppati sulla base dell'analisi statistica di data set ottenuti dal monitoraggio della reale interazione uomo-edificio.

Sono state sviluppate metodologie di analisi del trend di segnali di consumo energetico, importanti nella individuazione di anomalie poiché i trend anomali di consumo di energia possono rappresentare il sintomo di guasti o di una cattiva gestione. In questa ottica sono stati investigati e successivamente implementati algoritmi di trend detection a partire dai dati sperimentali relativi ai consumi termici del cluster di edifici nel Centro Ricerche della Casaccia. Tali metodologie sono state successivamente integrate nella struttura di fusione dati delle regole di diagnostica già esistenti ed implementate sulla piattaforma ICT.

Integrazione della ottimizzazione energetica termica ed elettrica

Nella precedente annualità è stata sviluppata l'ottimizzazione multi-obiettivo dei consumi termici invernali relativi.

In questa annualità tale lavoro è stato esteso integrando ai consumi termici anche quelli elettrici relativi all'assorbimento dei fan-coil mediante conversione in energia primaria totale (Tonnellate Equivalenti di Petrolio - TEP). Inoltre sono state realizzate anche alcune sperimentazioni relative all'ottimizzazione estiva relativa ai consumi elettrici (chiller + fancoil), grazie all'upgrade del simulatore dell'edificio F40. Si tratta di un simulatore in ambiente MATLAB/Simulink in grado di prevedere il comportamento dell'edificio in termini di consumi e di condizioni termo-igrometriche, basandosi sulle condizioni al contorno (climatiche esterne, occupazione indoor, set point di mandata del fluido vettore e dei termostati di stanza). Il simulatore, dopo essere stato interfacciato opportunamente con un ottimizzatore in ambiente MATLAB, viene utilizzato per formulare la strategia ottima. Il risultato è una variazione dinamica dei set point, di termostato e mandata del fluido termovettore, giorno per giorno, al fine di ridurre i consumi, termici ed elettrici, e controllare in modo opportuno il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Le funzioni obiettivo che l'algoritmo deve ottimizzare sono minimizzare il fabbisogno energetico giornaliero ed la percentuale di insoddisfatti prevista, ad ogni iterazione, cerca di raggiungere un valore di PPD, che sia massimo ma sempre al di sotto della soglia del 10 % imposta dalla norma UNI EN ISO 7730.

I risultati relativi all'ottimizzazione relativi ad i consumi ed i rispettivi valori di PPD sono stati confrontati con strategie non ottimizzate (baseline) che mantengono i set point fissi a valori costanti tipici di casi reali per l'intera stagione, ovvero :

- Baseline 1 : Set point termostato = 21° C; Set point mandata = 60° C
- Baseline 2 : Set point termostato = 21° C; Set point mandata = 65° C
- Baseline 3 : Set point termostato = 21° C; Set point mandata = 70° C

La stagione simulata comprende i giorni che vanno dal 21 dicembre al 20 marzo per un totale di 90 giorni. Sono stati ottenuti 90 fronti di Pareto differenti, uno per ogni giorno, nella figura ne viene presentato uno esemplificativo di un giorno di dicembre. In accordo con quanto previsto dalla Norma UNI EN ISO 7730 relativa al microclima per ambienti di lavoro di tipo moderato, al fine di ridurre il più possibile il consumo di energia primaria, si è scelto un punto del fronte che garantisce il minor consumo, mantenendo però il PPD al di sotto del 10%.

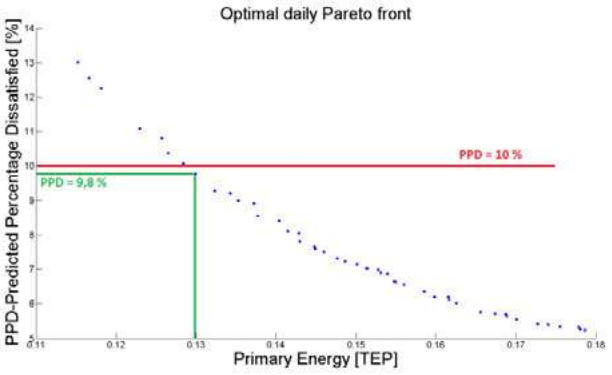


Figura 327. Scelta della soluzione ottima giornaliera sul fronte di Pareto

Il punto considerato corrisponde ad un consumo giornaliero di energia primaria pari a 0,13 TEP e ad un PPD medio giornaliero pari a 9,8% (Figura 327). Tale operazione è stata ripetuta per tutti i 90 fronti ed è possibile a questo punto mostrare l'andamento dei consumi e del PPD, relativi alla stagione ottimizzata confrontati con una delle baseline (Figura 328).

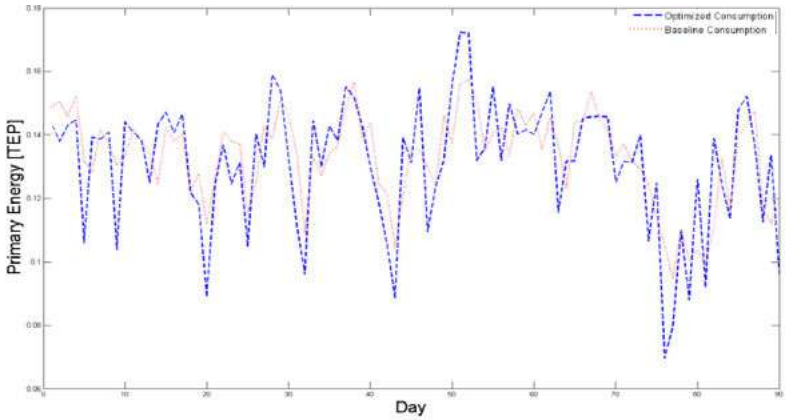


Figura 328. Confronto dei consumi relativi alla baseline con i consumi della stagione ottimizzata

In Tabella 85 si riportano i consumi ed i valori di PPD medi relativi alle diverse strategie utilizzate.

Tabella 85. Confronto tra le strategie utilizzate

	PPD medio stagionale [%]	Energia primaria stagionale [TEP]
Baseline (21-60)	6,66	11,965
Baseline (21-65)	6,44	12,017
Baseline (21-70)	6,36	12,149
Strategia ottima	9,4	11,671

La sperimentazione è stata effettuata anche per la stagione estiva e confrontata con 3 baseline come nel caso invernale. I consumi simulati sono risultati in linea con quelli reali, tuttavia i valori di PPD medio sono risultati troppo elevati a causa della rilevante differenze tra le previsioni meteorologiche dei diversi giorni.

Gestione ed upgrade della infrastruttura ICT

Per lo sviluppo di sistemi di diagnostica remota e automazione avanzata di reti di edifici è stata implementata l'interfaccia grafica realizzata la scorsa annualità, tramite lo sviluppo di moduli software in grado di consentire la visualizzazione in tempo reale degli eventi all'interno dello Smart Village del CR Casaccia, in particolare afferenti alle tematiche esaminate: building, lighting e mobility.

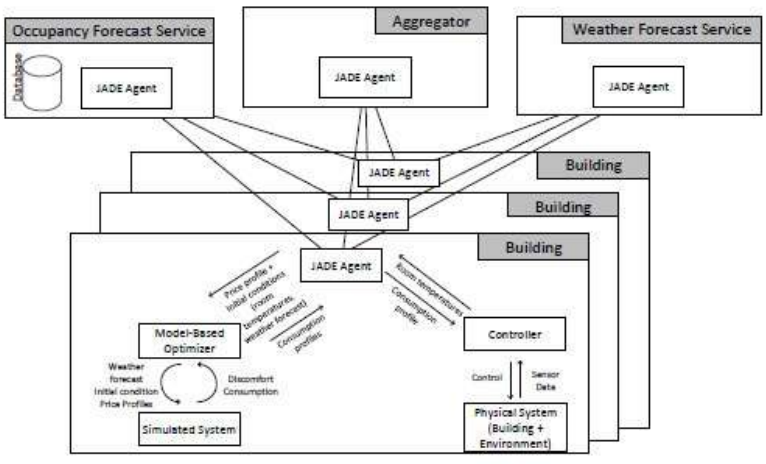
Inoltre, per consentire la sperimentazione delle metodologie sviluppate e testate inizialmente su di un simulatore, è stato necessario un upgrade e customizzazione dei software di gestione dei BEMS installati per garantire la gestione ottimale degli edifici e per attuare le richieste di 'active demand'. In particolare, è stato eseguito un upgrade della piattaforma Almaviva SEM per la gestione remotizzata di smart plug e valvole termostatiche ed è stato introdotto anche un modulo per la gestione automatizzata della reportistica. A tal fine è stato sviluppato un modulo software in grado di generare automaticamente la reportistica al fine di agevolare la supervisione del building network, la valutazione ed il confronto delle prestazioni tra gli edifici, la predisposizione di interventi di manutenzione in caso di guasto sia dei sensori che degli impianti.

Per consentire l'implementazione di strategie di demand-response, sono stati effettuati anche degli aggiornamenti sugli impianti (valvole di regolazione e di non ritorno), così come è stata effettuato l'aggiornamento e manutenzione hardware e software della griglia computazionale sulla quale poggiano tutti i servizi di Smart Village implementati.

b.2 Sviluppo di metodologie in ottica 'smart district'

Metodologie basate su modelli ad agenti finalizzate al Demand Side Management in micro distretti

In questa attività è stata investigata una metodologia di ottimizzazione dei consumi che ha come obiettivo finale quello della gestione di un micro-distretto ed in particolare ci si è focalizzati sulla parte di gestione attiva della domanda (Demand Side Management, DSM). L'approccio che si è voluto studiare si basa proprio su un mix di metodologie che simulino le attività di un aggregatore di consumi che deve gestire un blocco di edifici. In quest'ottica è stata progettato ed implementato il seguente caso studio basato su modellazione ad agenti. Il sistema è composto dai seguenti agenti:



- Aggregatore: meta-agente che si occupa di trovare una soluzione plausibile sub-ottimale sulla base delle richieste che arrivano dagli agenti 'Building' , dai dati forniti dai servizi previsionali e secondo i vincoli del sistema (es. energia disponibile)
- Servizio di previsione dell'occupazione: agente che si occupa di stimare l'occupazione degli edifici
- Servizio di previsione meteo: agente che si occupa di fornire le previsioni meteo
- Building: agente che si occupa di simulare un edificio. In particolare esegue due task : si occupa di trovare la propria soluzione ottima locale (che sarà comunicata all'agente 'Aggregatore') e si occupa di attuare le impostazioni fornite dall'aggregatore.

In questo studio sono stati considerati consumi termici invernali con l'obiettivo di trovare delle soluzioni che riducano i picchi di domanda (peak-shaving).

Calibrazione ed upgrade simulatore dei consumi energetici

Nella precedente annualità è stato sviluppato un simulatore in Matlab/Simulink dei consumi termici/elettrici in grado di riprodurre gli effetti prestazionali di differenti strategie di controllo a livello di singolo edificio. Nel PAR 2014, nel quadro della collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche, è stata effettuato un upgrade del simulatore [rapporto RdS/PAR2014/025] per un suo impiego come predittore per strategie di controllo e gestione day-ahead. Le funzionalità del simulatore sono state implementate grazie all'introduzione di funzione di dynamic pricing e moduli di simulazione di sistemi di generazione distribuita e storage.

Inoltre è stata portata a termine la calibrazione del simulatore della rete di edifici a partire dai dati sperimentali reali corrispondenti al cluster degli 8 edifici presso lo Smart Village Casaccia.

Infine, il software di simulazione della rete di edifici è stato migliorato in modo tale da poter interagire semplicemente con algoritmi di ottimizzazione e controllo sviluppati esternamente al simulatore. L'integrazione è consistita nel rendere il simulatore 'facilmente' richiamabile dall'ottimizzatore ogni qualvolta quest'ultimo aveva la necessità di valutare una nuova soluzione. Ovvero, ogni volta che l'ottimizzatore dovrà valutare una nuova configurazione di set point questi verranno passati al simulatore il quale restituirà come risultato i valori di consumi e confort.

b.3 Le tecnologie locali integrate per abilitare le "smart building network"

Concept progettuale di una 'smart room'

Un fronte essenziale per rendere competitivo il modello delle building network management è quello di disporre di alcune tecnologie di rilevazione e controllo locale integrate con la possibilità di dialogo a livello superiore. Le attuali tecnologie sensoristiche e di attuazione locale sono frammentate su diversi "prodotti" commerciali, tipicamente chiusi o caratterizzato da diversità di protocollo di comunicazione e specifiche problematiche di installazione che fanno salire il costo di investimento quando devono essere utilizzate in modo capillare (es. un insieme di sensori/controllori in ogni stanza). A tal scopo è stato sviluppato un concept progettuale per l'integrazione della sensoristica e controllori di una tipica stanza ufficio in un unico sistema (rilevazione T/umidità/presenza/CO_2/apertura finestre, controllo prese/luci/climatizzatore, dialogo remoto). Lo scopo è l'avvio di un percorso di abbattimento dei costi strumentali e di installazione, la facilitazione del colloquio con BEMS, il colloquio con il sistema di supervisione della rete ed infine con l'utente.

In una prospettiva applicativa futura uno "smart energy box" dovrebbe essere installato in ogni stanza dello smart building e distribuire a livello locale parte della intelligenza della rete. In questa annualità è stato progettato ed approvvigionato un prototipo preliminare che in futuro verrà installato e sperimentato in una specifica stanza ("smart room") dell'edificio più avanzato realizzato presso il CR Casaccia in termini di sensorialità e funzionalità smart ed impiegate alcune tecnologie già in commercio (es. smart plug, smart valve) per valutarne la fattibilità nella gestione della domanda attraverso la loro integrazione nei sistemi di supervisione e controllo.

I target da raggiungere sono:

- ottimizzazione contemporanea del confort e del consumo energetico con l'obiettivo di azzerare lo spreco energetico e massimizzare il confort;
- messa a punto dei codici di controllo dei parametri definiti come "target";
- ottimizzazione della strumentazione e sviluppo di sensori innovativi con capacità di analisi locale dei dati acquisiti;
- verifica dei risparmi ottenuti sia termici che elettrici;

- verifica oggettiva dei profili di confort raggiunti.

Sviluppo di un'applicazione per il rilevamento della presenza tramite tecnologia mobile

Un'altra tipologia chiave di informazione per implementare il concetto di "energy on demand" (controllo adattivo sulla necessità istantanea e locale di energia) e quindi raggiungere elevati saving energetici è l'informazione sulla presenza di persone.

A tal fine si è lavorato allo sviluppo di alcune applicazioni per le piattaforme iOS e Android. Le suddette applicazioni hanno il compito di verificare se in un ufficio o altro locale di un edificio sia presente almeno un dipendente al fine di ottimizzare la gestione delle risorse energetiche (energia elettrica, riscaldamento, aria condizionata etc.). Tale verifica avviene in maniera completamente anonima per il dipendente e si basa sulla tecnologia "beacon". Tale tecnologia prevede che in ogni locale sia installato un beacon che emette dei segnali bluetooth "low energy". Ad ogni beacon è associato un identificativo. Tali segnali sono rilevati dall'applicazione installata sullo smartphone. A seconda dell'identificativo rilevato e a seconda dell'intensità del segnale, l'applicazione è in grado di determinare se il dipendente si trova o meno nel locale. Le informazioni vengono inviate al server che le elabora. In ogni momento il gestore del sistema è in grado di sapere, accedendo alle informazioni sul server, lo stato degli uffici. L'accesso al server da parte del gestore del sistema, può avvenire tramite browser, tramite applicazione desktop ed anche tramite smartphone e tablet. In Figura 329 è mostrata l'architettura del sistema completo.

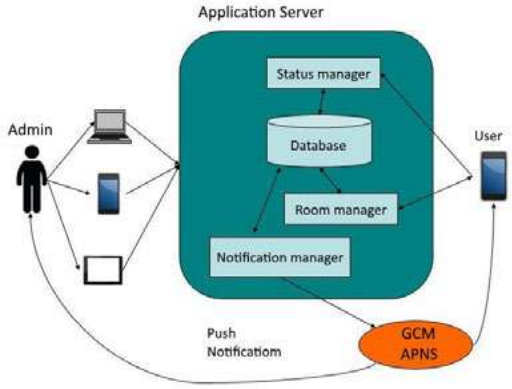


Figura 329. Architettura del sistema

Oltre all'applicazione installata sullo smartphone, è evidente il ruolo altrettanto importante dell'Application Server. Un'altra funzionalità molto importante è la possibilità, da parte delle applicazioni installate sullo smartphone, di ricevere le notifiche (push notification). Queste notifiche possono essere inviate in automatico dall'Application Server oppure potrebbe essere il gestore del sistema a decidere di inviarle secondo le esigenze.

Una descrizione dettagliata dei risultati dell'obiettivo b è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/023.

c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

c.1 Sperimentazione OLED

L'obiettivo dell'attività di ricerca è la realizzazione di dispositivi luminescenti organici (OLED) innovativi ed efficienti mediante l'impiego di nuovi materiali fosforescenti bio-ispirati basati su complessi di Iridio (III). L'attività sperimentale è stata volta nei laboratori dl Centro Ricerche ENEA di Portici ed in collaborazione con il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Napoli Federico II.

Nelle precedenti annualità sono stati sintetizzati nuovi isomeri semiconduttori della famiglia dei triazatruxeni (TAT) variamente sostituiti che presentano fluorescenza nel blu e risultano stabili termicamente. I dispositivi OLED, realizzati utilizzando i TAT, hanno mostrato buone prestazioni soprattutto in termini di stabilità termica.

Nella presente annualità la ricerca è stata rivolta ai complessi ionici di metalli di transizione in quanto esibiscono elettroluminescenza per fosforescenza con resa quantica teorica del 100%, e possono essere impiegati in dispositivi di tipo LEEC (celle elettrochimiche ad emissione di luce) che prevedono tempi e costi di realizzazione minori rispetto agli OLED a parità di efficienza.

Tali dispositivi sono costituiti da un materiale semiconduttore organico elettroluminescente formato da una coppia ionica, tipicamente basato su complessi cationici dell'iridio (III) (i-TMC). L'uso di tali materiali semplifica notevolmente le operazioni di realizzazione del dispositivo che diventa a singolo strato e non più multistrato come nell'OLED.

La prima fase delle attività sperimentale è stata dedicata alla sintesi e caratterizzazione un nuovo i-TMC (complesso di Ir(III) [Ir(ppy)2DHQ][PF6]). In una seconda fase questi materiali sono stati utilizzati per la realizzazione di dispositivi LEEC. È stato effettuato uno studio sul funzionamento di tali dispositivi in funzione del catodo ed in funzione dello spessore dello strato attivo. Sono stati realizzati inoltre dispositivi LEEC in cui lo strato attivo è composto da una blend del i-TMC di nuova sintesi ed un liquido ionico con proporzioni variabili.

Lo strato emissivo dei LEEC contiene ioni mobili che possono essere guidati verso gli elettrodi, da un basso voltaggio. I vantaggi dei materiali elettrofosforescenti rispetto a quelli elettrofluorescenti erano già noti ai tempi degli OLED. L'impiego di materiali elettrofosforescenti, infatti, consente di elevare il limite intrinseco della resa di elettroluminescenza dal 25% dei composti fluorescenti al 100% utilizzando l'emissione da stati di tripletto. Nella ricombinazione di cariche la probabilità di formare stati di tripletto è tre volte maggiore rispetto a quella di formare uno stato di singoletto. Nei composti fluorescenti, solo lo stato di singoletto emette radiativamente, pertanto tutte le ricombinazioni che generano tripletti, non contribuiscono al fenomeno dell'elettroluminescenza. L'impiego di materiali fosforescenti, in cui gli stati di tripletto emettono con buona efficienza, in particolari configurazioni che limitino lo spegnimento dei tripletti, in seguito alla loro diffusione, ha consentito di ottenere altissime rese del processo di elettroluminescenza. I composti di questo tipo sono complessi di metalli di transizione quali l'iridio, il rutenio, l'osmio per i quali l' accoppiamento spin-orbita rende possibile il decadimento dello stato di tripletto altrimenti proibito.

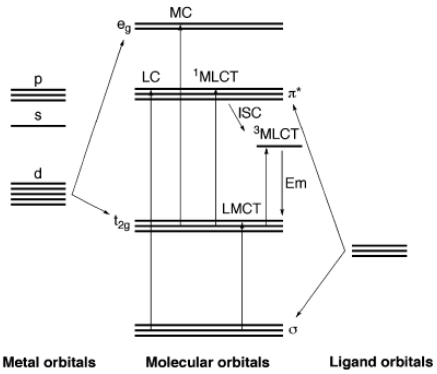


Figura 330. Diagramma degli orbitali molecolari per un complesso dell'iridio(III) a geometria ottaedrica distorta.

Un caso particolare è rappresentato dai complessi dell'iridio che, per la peculiare struttura elettronica, sono caratterizzati da: a) transizioni a bassa energia di tipo metallo-ligando (MLCT); b) un'efficienza dell'*intersystem crossing* (ISC) dallo stato di singoletto eccitato allo stato di tripletto eccitato praticamente unitaria (Figura 330).

L'utilizzo di liquidi ionici, in blend con gli i-TMC nel layer emissivo, può aumentare le prestazioni dei device riducendone la tensione di accensione aumentando le prestazioni. Pertanto, in ENEA, sono stati realizzati dispositivi LEEC in cui il layer emissivo è costituito da una blend di i-TMC con rapporti variabili di un liquido ionico (dimetilimidazolio dimetilfosfato). Si è scelto di utilizzare come catodo l'argento (Figura 331).

catodo - Ag
strato emissivo - blend
HIL - PEDOT:PSS
anodo - ITO
substrato - vetro

Figura 331. Struttura LEEC realizzato in ENEA

Tutti i dispositivi realizzati utilizzando il nuovo complesso cationico di Iridio (III), luminescente nella regione rossa dello spettro visibile, hanno mostrato buone prestazioni di funzionamento Figura 332).

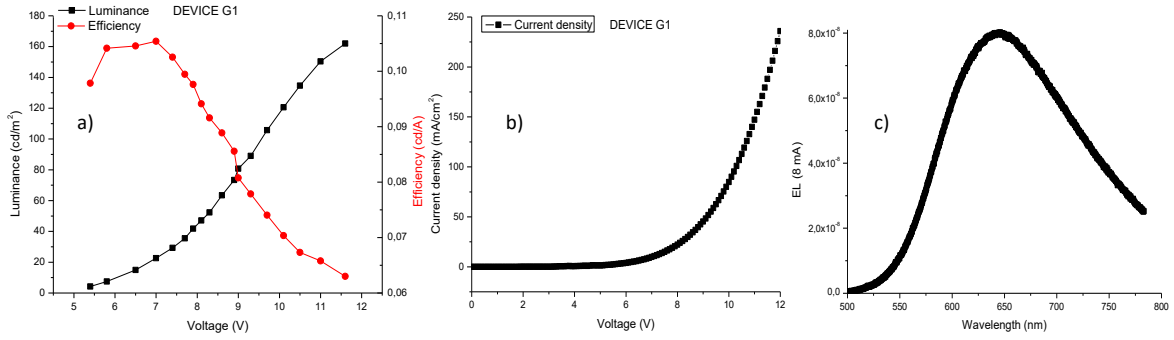


Figura 332. Caratteristiche di luminanza [cd/m^2] ed efficienza[cd/A] (a) e densità di corrente [mA/cm^2] (b) in funzione della tensione; spettro di elettroluminescenza dei dispositivi (c)

Sono stati preparati vari tipi di dispositivi luminescenti organici con tecnologia LEEC andando ad investigare l'effetto del catodo, utilizzando calcio o argento, e l'effetto dell'utilizzo di un liquido ionico in blend con il complesso [Ir(ppy)2DHQ][PF6] sulle prestazioni dei dispositivi che hanno tutti funzionato con buone prestazioni.

Dal punto di vista dell'innovazione e della sperimentazione di questa nuova e promettente tipologia di materiali, ed in particolare la tipologia i-TMC, le potenzialità dei dispositivi sono notevoli sia per le caratteristiche ottiche ed elettriche, sia per la stabilità termica ed ambientale.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/027.

c.2 Progettazione e sperimentazione con sistemi a LED innovativi

La ricerca si è articolata sulla progettazione e sperimentazione di sistemi innovativi a LED i diversi ambiti. Per gli ambienti di lavoro di tipo industriale, è proseguita la sperimentazione con HumbleBee, costituito da un sistema di illuminazione a LED con fosforo remoto e sistema intelligente di controllo. Quest'anno sono stati installati nuovi dispositivi ottici / di controllo, correggendo anche alcune criticità di tipo meccanico, infrastrutturale, ottico, che erano inizialmente state riscontrate sul sistema.



Figura 333. Sistema di movimentazione di HumbleBee

Per facilitare la movimentazione degli apparecchi (che si trovano a più di 6 m di altezza) sono state installate delle carrucole, che permettono di alzare e abbassare gli apparecchi senza dover staccare l'alimentazione elettrica (Figura 333). Questi dispositivi di movimentazione si sono sin dall'inizio dimostrati molto utili, in quanto l'impianto è di tipo sperimentale e quindi sono necessarie frequenti operazioni sugli apparecchi e sui dispositivi dei sistemi di controllo.

Nella scorsa annualità è stato progettato, dal Politecnico di Milano Dipartimento Design, un riflettore, da realizzarsi in alluminio con riflessione altamente speculare, con realizzazione prototipale. Nella presente annualità era prevista la realizzazione di 5 riflettori di quel tipo. Si è invece optato per la realizzazione di 5 prototipi con un nuovo tipo di alluminio (Almeco), con caratteristiche ottiche ancora migliori: questo sempre in linea con la sperimentazione rivolta agli elementi più innovativi del mercato. I prototipi di riflettore saranno consegnati a ENEA in ottobre 2015.

E' stato installato un nuovo sistema di controllo, EyeNut della Harvard Engineering (Figura 334). Il sistema è pensato in modo da centralizzare in un luogo tutti gli aspetti decisionali e di raccolta dei dati (consumi energetici, presenza, luminosità, interazioni manuali, malfunzionamenti, etc) consentendo sempre l'interazione manuale e puntuale sui punti luce per modificarne lo stato (on/off/dimm). Questo sistema è di tipo wireless e si utilizza per la gestione di impianti di illuminazione artificiale di interni, sfruttando un'architettura web, la quale è caratterizzata da un'interfaccia molto semplice, in questo modo anche gli utenti meno esperti sono in grado di utilizzare il sistema senza particolari difficoltà.



Figura 334. Infrastrutture del sistema EyeNut (EyeNut manual)

Sono stati effettuati tutti i test necessari per verificare il corretto funzionamento dei prototipi, a seguito della risoluzione di alcuni difetti di prototipizzazione riscontrati nella scorsa annualità.

Per comprendere meglio come programmare i parametri di regolazione è stata effettuata una verifica sulla capacità di lettura, del sensore di presenta, al variare dell'altezza di installazione.

Sono stato provati, e sono in prova, due diversi sensori di presenza, collegati a due diversi apparecchi. Il sensore di presenza Harvard utilizza la tecnologia PIR (presence infrared), efficace per individuare persone in movimento e incorpora al suo interno un fotosensore, che accenderà, dimmererà e spegnerà la lampada in base al livello di illuminamento presente sul lavoro. Su un secondo apparecchio è stato impiegato un sensore di presenza di caratteristiche analoghe (cioè utilizzabile nelle stesse condizioni di lavoro) ma con tecnologia a microonde, della CP Electronics.

Questo test permette di analizzare le differenze di comportamento del sistema di controllo con due "segnali" diversi e anche testare la effettiva compatibilità e capacità di "dialogo" tra prodotti di diverse marche: questo elemento è importante in una logica di sistema ottimizzato, non monomarca, in cui si possono installare i prodotti più adatti all'applicazione. I risultati sono positivi, cioè i diversi componenti dialogano, tuttavia è stato necessario, oltre a qualche lavoro sull'hardware, interpretare correttamente i termini del dialogo, per poter programmare il sistema. Al momento attuale entrambi i dispositivi possono essere programmati per la attivazione base legata alla dimmerazione in funzione della luce naturale.

Tutta la attività di misura/commissioning è stata svolta con l'Università dell'Insubria attraverso l'attivazione di una tesi di laurea in Ingegneria per la Sicurezza del Lavoro e dell'Ambiente.

Il sistema, dopo un anno circa di test e valutazioni in campo, ha risolto alcune criticità legate alla prototipizzazione, tuttavia è necessaria ancora una fase di commissioning più esteso soprattutto legate all'affidabilità nel tempo dell'intero sistema.

Inoltre il sistema stesso è in evoluzione e sarà oggetto di ulteriori attività di ricerca e implementazione in relazione all'evolversi della tecnologia.

Nel quadro della subtask sono stati provati 2 prototipi di un apparecchio di illuminazione localizzata chiamato L@W, progettato e realizzato dal Politecnico di Milano Dipartimento Design nella scorsa annualità, con funzioni di dimmerazione e fascio variabile. La sperimentazione ha riguardato le caratteristiche illuminotecniche, prestazionali ed energetiche e gli aspetti legati alla fruizione dell'illuminazione artificiale da parte degli utenti.

I prototipi sono stati posizionati sopra tavoli di lavoro presso ENEA di Ispra, quindi con utilizzo continuo da parte del personale tecnico, per diversi mesi e le persone che hanno utilizzato gli apparecchi si sono dette soddisfatte delle possibilità offerte: poter aprire e chiudere il fascio luminoso senza dover spostare l'apparecchio e cambiare l'intensità.

E' stata quindi fatta una mappatura di illuminamento su un piano orizzontale, in un locale nero (cella di prova del laboratorio ENEA) a diversi livelli di dimmerazione e apertura del fascio. SI sono confrontati i risultati con i dati di progetto e L@W è risultato un prodotto di illuminazione valido per le caratteristiche elettriche, fotometriche e di usabilità.

Attività normativa

E' proseguita l'attività normativa a livello nazionale (UNI, CEI, CIE-Italia): in particolare è stato progettato un software relativo alla procedura di calcolo del LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) secondo la norma EN 15193:2015. L'indicatore consente di determinare il fabbisogno di energia elettrica per gli impianti di illuminazione artificiale presenti in un edificio residenziale e non residenziale, in presenza di sistemi di gestione e controllo dell'impianto stesso. L'originalità di questa attività risiede nel fatto che questo è il primo software realizzato per calcolare il LENI secondo la nuova normativa 15193:2015 in fase di stesura e la cui pubblicazione è prevista per metà del 2016. Questa attività è effettuata in accordo con l'UNI.

Il software si rivolge ai professionisti del settore della certificazione energetica ed ai progettisti illuminotecnici e/o impiantisti che devo effettuare valutazioni di tipo energetico su impianti nuovi, esistenti ed oggetto di riqualificazione.

La motivazione che ha portato alla necessità di progettare il software è la necessità di poter effettuare il calcolo del LENI, secondo la procedura indicata dalla norma 15193 in maniera corretta e senza semplificazioni dovute alla poca conoscenza della norma e dei calcoli da effettuare. La valutazione del fabbisogno di energia elettrica di impianti di illuminazione artificiale è molto complessa e la procedura proposta dalla norma 15193 può risultare di difficile applicazione per utenti poco esperti nel settore o che non conoscano bene la norma stessa. Il software così progettato, consentirà di guidare correttamente al calcolo di ogni singolo parametro necessario al calcolo del LENI dell'edificio.

Lo standard specifica tre metodi di calcolo per la valutazione del fabbisogno di energia elettrica e/o la misura del consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale di edifici residenziali e non. In questo anno di attività è

stata progettata l'intera architettura del software ed è stato realizzato un primo step sperimentale del tool al fine di testare il suo corretto funzionamento. Questa primo step consente il calcolo del LENI (solo per il metodo 1) per un ambiente singolo, caratterizzato da una singola superficie finestrata di tipo verticale, in assenza di sporgenze esterne (verticali o orizzontali). In questo primo step il software è in lingua inglese ma nella sua versione definitiva (4 step) sarà in lingua italiana ed inglese. Il software in questa prima versione è pensato per il sistema operativo Windows ma è già stata valutata, per il futuro, l'opportunità di estenderlo al sistema operativo MAC.

Al termine di questo anno di attività sono stati raggiunti gli obiettivi prefissi quali la progettazione dell'intera architettura del software (definizione dell'interfaccia, dei menù a tendina, dei contenuti, prima predisposizione della sezione Help) e la realizzazione di una prima versione del software (step 1) per il calcolo del LENI secondo il metodo 1 della norma 15193:1 – 2015. Il software realizzato fin qui, rispecchia le caratteristiche principali e generali della versione finale nella sua completezza, quali: la facilità installazione ed utilizzo, la semplicità nella compilazione (step-by-step), una interfaccia e la rapidità del calcolo finale.

E' proseguita l'attività a livello europeo per la Delegazione Italiana per implementazione Direttive Etichettatura ed Ecodesign su prodotti di illuminazione. Una importante attività ha riguardato il "problema " della data di uscita dal mercato delle lampade non direzionali per uso domestico meno efficienti ("fase 6" del Regolamento 244/2009. Il 17 aprile, dopo un lungo processo di analisi, gli Stati Membri dell'Europa hanno approvato la proposta della Commissione Europea di spostare in avanti di 2 anni l'uscita dal mercato delle lampade alogene meno efficienti: quindi al settembre 2018, invece del settembre 2016 originariamente previsto (dalla "fase 6" originale). Analizzando infatti il mercato e gli sviluppi tecnologici nel campo dell'illuminazione, la Commissione è giunta alla conclusione che il 1 settembre 2016 fosse una data troppo vicina perché la tecnologia a LED potesse rimpiazzare completamente i modelli di lampade alogene in uscita dal mercato. Pubblicazione in Gazzetta Europea del Regolamento 2015/1428 del 25 agosto 2015.

Infine si è formato un gruppo di lavoro misto UNI-CEI per contribuire all'elaborazione di norme armonizzate, in sintonia con CEN-CENELEC, a cui la Commissione Europea ha dato apposito mandato.

Messa a punto della procedura di test di percezione visiva con oggetti tridimensionali

Per quanto riguarda la sperimentazione legata agli aspetti umani, è stata messa a punto una procedura di test di percezione visiva con oggetti tridimensionali. Partendo dall'esperienza maturata negli anni nell'ambito dei test di percezione visiva, si è deciso di riprendere ed estendere ad un maggiore numero di campioni di sorgenti luminose, il test di valutazione del Color Rendering Index (CRI) mediante l'osservazione di un compito visivo tridimensionale (LEGO colorati). E' stata messa a punto la procedura dell'attività sperimentale, è stato allestimento l'ambiente sperimentale ed è stata testata la procedura con alcuni volontari, che hanno valutato l'oggetto tridimensionale illuminato da differenti sorgenti luminose da testare.

Dal test preliminare sono emerse informazioni utili che hanno permesso di ottimizzare la procedura e la gestione degli spazi. La procedura è stata validata e sarà usata in test futuri.

Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro

la ricerca volta alla caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro si inserisce nell'ambito della ricerca internazionale sugli effetti visivi e non visivi della luce sugli esseri umani. Poiché gli effetti fotobiologici della luce sono legati alle caratteristiche dell'energia luminosa incidente sulla retina, in sede di valutazione e test dei sistemi d'illuminazione dovrebbe essere valutata la luce indirizzata all'occhio, cioè la somma della luce proveniente dalla sorgente luminosa e da quella riflessa dalle superfici e oggetti circostanti, e non soltanto, come viene attualmente fatto, per quella emessa o che investe le superfici costituenti l'ambiente.

L'attività sperimentale è stata svolta presso gli uffici della sede ENEA di Ispra, in collaborazione con l'Università Federico II di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Industriale. Oggetto della ricerca è stata la valutazione della quantità e qualità della luce naturale incidente agli occhi degli utenti di uffici esposti a Nord e a Sud, e dei corrispondenti stimoli circadiani, durante le stagioni primaverile ed estiva. La caratterizzazione ha previsto misure sia all'interno degli uffici designati, sia all'esterno dell'edificio. Una parte delle misure è stata effettuata applicando la stessa metodologia dell'Università di Napoli [Rapporto RdS/PAR2014/031], in modo da consolidare un protocollo sperimentale che consenta un confronto tra località a diverse latitudini e con differenti climi luminosi; in aggiunta, per consentire un monitoraggio più capillare delle condizioni di illuminamento naturale negli uffici, sono state effettuate misurazioni addizionali di parametri fotometrici e radiometrici in continuo. All'interno degli uffici sono state effettuate misure alla finestra di illuminamento verticale, radianza solare verticale, radianza solare spettrale, temperatura di colore, irradianza solare spettrale; alla postazione di lavoro sono stati monitorati l'illuminamento orizzontale al centro della scrivania e illuminamento, temperatura di colore, coordinate

colorimetriche ed irradianza spettrale a livello degli occhi.

Si è potuta quindi confrontare la qualità della luce in uffici con differenti orientamenti e in differenti condizioni meteorologiche e, applicando un modello di fototrasduzione circadiana, è stato valutato il conseguente impatto circadiano per due giornate, una per ogni ufficio monitorato. Parte della strumentazione è stata realizzata ad hoc in laboratorio.

E' quindi stato utilizzato il modello di C.Rea per la fototrasduzione circadiana:

1. Calcolo della "luce circadiana" (CL), dall'irradianza spettrale misurata in corrispondenza degli occhi
2. Calcolo dello stimolo circadiano (CS), da CL, dove CS è efficacia relativa di una radiazione nel fornire stimolo al sistema circadiano, espresso in termini di soppressione di melatonina.

I risultati riscontrati dalle giornate di misura evidenziano forti differenze di illuminamento alla finestra tra i due uffici oggetto di misura, differenza dovuta alla diversa esposizione degli uffici (Nord / Sud) o alche dalla struttura dell'edificio che aumenta l'ombreggiatura degli uffici a Nord, e ci sono anche altre differenze in diversi parametri nelle stanze con diversa esposizione.

I valori di CS calcolati mediante modello di Rea non presentano differenze sostanziali tra i due uffici, con una media della giornata leggermente più elevata per l'ufficio a Sud. I valori riscontrati corrispondono ad una elevata risposta in termini di soppressione di melatonina.

Per entrambi gli uffici si riscontrano stimoli circadiani decrescenti nel pomeriggio, seguendo quindi l'andamento naturale dello stimolo circadiano che sopprime la melatonina al mattino fino al primo pomeriggio, per poi diminuire lungo tutto il pomeriggio verso sera, per favorire l'entrata nel sonno della notte. Sarà interessante valutare se tale andamento, che favorisce il naturale ciclo circadiano, potrà essere confermato anche per altre giornate di misura e uffici diversi, nonché in presenza di una necessaria integrazione della luce naturale con quella artificiale.

Illuminazione in ambienti particolari. Test per Antartide

E' stata avviata infine una attività per investigare aspetti legati all'illuminazione in ambienti particolari: in questo caso le basi di ricerca in Antartide, dove la vita in situazioni ambientali particolari (periodo di buio, quindi solo illuminazione artificiale, oppure viceversa periodo di continua luce naturale anche durante la notte) può avere qualche impatto sulla percezione e ritmi circadiani.

Sono state selezionate alcune possibili attività da svolgere nella prossima spedizione ENEA, che sarà operativa in Antartide nei mesi autunnali- invernali (corrispondenti a primavera-estate nell'emisfero Sud e quindi luce naturale anche durante la notte). Le attività sono state scelte anche in base alla facilità di svolgimento, alla necessità o meno di materiali specifici, alla piacevolezza (potenziale) della partecipazione, all'interferenza con tutto il lavoro da svolgere da parte delle persone coinvolte.

Sono stati consultati ricercatori di varie università italiane e il Colour Group Great Britain Committee. Come prima ipotesi, si è scelto di implementare le seguenti azioni:

- Percezione visiva: esperimento plurilinguistico sulla denominazione dei colori.
- Ritmi circadiani: indagine sull'impatto che le condizioni estreme di luce naturale esercitano sulla condizione psicofisica dell'individuo, ed in particolare sul sonno, sul tono dell'umore e sulla presa di decisione degli individui.

E' stato quindi definito un protocollo di prova, che potrà inoltre essere ulteriormente adattato alle esigenze logistiche e di tempo dei partecipanti, qualora se ne presentasse la necessità.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel seguente rapporto RdS/PAR2014/029.

c.3 Progetto Lumière: assessment del modello gestionale realizzato, trasferimento degli standard e sviluppo di nuovi strumenti attuativi

Le attività sviluppate nella presente annualità si sono concentrate nella rielaborazione delle Linee Guida per i Comuni, nell'ampliamento, sperimentazione, applicazione e perfezionamento del Modello manageriale e strumenti attuativi, nell'organizzazione di giornate formative per i pubblici amministratori, nella diffusione della cultura della Luce e più in generale nella promozione di una gestione efficiente ed efficace degli impianti e del servizio.

Tutte le attività sono state realizzate nel corso di questa annualità mediante:

- l'Ampliamento del Network con il coinvolgimento di nuovi segmenti del mercato/settore illuminotecnico, quale il comparto bancario e quello delle tecnologie altamente innovative (banda larga);
- il supporto alle pubbliche amministrazioni nell'acquisizione di una maggiore consapevolezza e capacità di gestione dell'impianto e del servizio in generale;
- la realizzazione e impostazione di Progetti Pilota presso Comuni di piccole/medie dimensioni;
- il supporto all'attività del Patto dei Sindaci per verificare le difficoltà di realizzazione degli obiettivi previsti dai PAES ed in particolare quelli legati alla pubblica illuminazione.
- la partecipazione ai convegni e tavoli di lavoro nei quali direttamente e/o indirettamente venivano affrontate le tematiche legate alla gestione del settore;
- la creazione di nuovi tavoli di lavoro;
- lo sviluppo di una sezione dedicata alle tecnologie emergenti;
- la proposta di sviluppare una piattaforma nazionale per il monitoraggio dei consumi energetici degli impianti e monitoraggio del loro funzionamento;
- la stretta collaborazione con i tavoli sulle "Smart cities" per coordinare la trasformazione dell'infrastruttura dell'impianto in funzione delle esigenze applicative delle smart technology;
- una stretta collaborazione con AIDI per favorire lo sviluppo di un modello manageriale che punti anche all'eticità dei progetti riqualificativi degli impianti riconoscendo il ruolo sociale e valorizzatore della luce.

Assessment delle linee guida e degli standard Lumière

Si è proceduto all'assessment delle Linee guida e degli Standard Lumière: in collaborazione e coinvolgimento del Network Lumière sono state aggiornate e modificate le Linee Guida. Si è deciso a seguito di un'indagine presso le amministrazioni di realizzarle in un format più schematico e leggero rispetto all'edizione precedente, fornendo delle nozioni di base e indicazioni generali in merito alle tematiche affrontate e rimandando - chi interessato ad approfondire – a consultare appositi documenti monotematici che verranno pubblicati sul sito Lumiere.

Trasferimento al sistema nazionale del Modello di Management sviluppato, applicazione ed eventuale perfezionamento dei standard di supporto realizzati

Per quanto riguarda il trasferimento al sistema nazionale del Modello di Management sviluppato, al fine di proporre scelte condivise ed in sintonia ed equilibrio con le esigenze socio/territoriali ed i vincoli normativi/ economici/tecnologici e politici, sono state realizzate le seguenti azioni di supporto:

- *Standard scheda censimento.* Nel corso dell'attività si è tornati a rivalutare e verificare la scheda censimento già ampiamente discussa e rivisitata nelle annualità precedenti. La motivazione principale è stata sia la richiesta di Consip d'inserirla nel Bando Servizio Luce 4. Inoltre, alcune osservazioni da parte del Tavolo tecnico miranti a rendere ancora più attendibili le valutazioni dei risparmi energetici conseguibili grazie agli interventi di riqualificazione ed il ricorso sempre più frequente alla tecnologia Led hanno avvalorato l'idea di ricalibrarla nuovamente. Ad oggi la scheda censimento viene utilizzata quale modello di riferimento per avere una fotografia sullo stato dell'arte dell'impianto e l'idea è quella di promuoverla presso tutte le amministrazioni al fine di poter pervenire ad una conoscenza omogenea dell'impianto nazionale di pubblica illuminazione. Comprenderne lo stato di fatto costituisce il punto di partenza per poter valutare l'indotto economico energetico, tecnologico e sociale che gli interventi di riqualificazione potrebbero avere sul territorio.
- *Comunicazione della metodologia e assessement.* L'attività di trasferimento e diffusione della metodologia Lumière si è realizzata mediante l'organizzazione delle giornate formative, la pubblicazione di articoli, la partecipazione ai Convegni in qualità di relatori, il coinvolgimento di nuovi partner ai Tavoli tecnici e la partecipazione a programmi radiofonici.

Sviluppo di un tool di validazione dell'audit secondo il modello Lumière

Nel corso dell'annualità ENEA ha progettato e realizzato congiuntamente con CRIET dell'Università Bicocca di Milano [rapporto RdS/PAR2014/034] un nuovo tool informatico destinato al controllo delle prestazioni degli impianti di pubblica illuminazione e alla validazione dell'audit definito all'interno del Progetto Lumière.

Il tool, che si prevede possa essere utilizzato da tutti i Comuni italiani, richiede il caricamento (in formato Excel) dei dati di funzionamento del sistema di pubblica illuminazione raccolti attraverso le schede censimento Lumière. Il programma, una volta verificata la conformità delle informazioni fornite dall'utente, archivia le stesse

trascrivendole all'interno di un database. Simultaneamente, il software provvede all'elaborazione di alcuni KPI (*key performance indicator*) i quali vengono resi disponibili per le amministrazioni all'interno di un apposito report. In questo modo, sindaci e responsabili comunali hanno la possibilità di monitorare e valutare le prestazioni degli impianti di pubblica illuminazione presenti all'interno del loro territorio comunale.

Una descrizione dettagliata delle attività svolte e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/035.

d. Tecnologie per l'industria del freddo

d.1 Sviluppo di un sistema automatico di monitoraggio dei prodotti alimentari freschi nelle celle frigorifero usate per lo stoccaggio ed il trasporto al fine di ottimizzarne consumi e prestazioni energetiche

Nel corso dell'attività di ricerca triennale è stato sviluppato un sistema di monitoraggio automatico integrabile con la regolazione delle condizioni di esercizio degli impianti frigoriferi per lo stoccaggio ed il trasporto refrigerato dell'ortofrutta al fine di ottimizzare il consumo energetico e migliorare la qualità organolettica dei prodotti refrigerati. Il sistema è stato sviluppato a partire da una piattaforma commerciale che fornisce un hardware flessibile e configurabile con l'obiettivo di realizzare una rete di nodi sensoriali a basso costo e limitato consumo di energia che possano monitorare un ambiente complesso come quello all'interno di una cella frigorifero. La configurazione e le caratteristiche del sistema sviluppato sono state cercate attraverso l'allestimento di un laboratorio dove fosse possibile ricreare le condizioni sperimentali tipiche monitorando con una opportuna strumentazione analitica vari prodotti ortofrutticoli durante campagne sperimentali opportunamente progettate e realizzate. L'obiettivo più significativo ed interessante raggiunto è stato di ottenere dei nodi sensoriali in grado di monitorare lo spazio di testa (il volume di aria in contatto ed in equilibrio con il prodotto alimentare da analizzare) all'interno di celle frigorifero in condizioni operative significative ottenendo un'ottima correlazione con un naso elettronico commerciale da noi scelto come "benchmark" per guidarne lo sviluppo e valutarne le prestazioni nelle campagne sperimentali.

Il naso elettronico commerciale, PEN3 della Airsense Analytics, pur non fornendo una descrizione in termini analitici dello spazio di testa è un vero e proprio strumento di laboratorio, un analizzatore di odori in grado di classificare e discriminare tutte le situazioni sperimentali affrontate nel corso di questi tre anni ma, per costo, consumo energetico e praticità d'uso in campo, è paragonabile al resto della strumentazione analitica usata per allestire il laboratorio e verificarne il funzionamento (analizzatore di etilene, analizzatore di anidride carbonica, spettrofotometro FT-IR, gascromatografo). Per contro i nodi sensoriali si stanno sviluppando ponendo come limiti un costo complessivo molto basso (due ordini di grandezza inferiore al PEN3), consumi energetici compatibili con il funzionamento autonomo per tempi superiori al mese, dimensioni ridotte per essere facilmente trasportabili ed installabili, assenza di parti meccaniche che ne limitino l'affidabilità e finiscono per far lievitare il costo totale.

Nella presente annualità è stata avviata una collaborazione con il Gruppo Sensori di Tor Vergata per sviluppare e testare in ENEA un naso elettronico dedicato dalle potenzialità "intermedie" tra i nodi sensoriali in sviluppo e un naso elettronico commerciale come il PEN3. Il naso elettronico sviluppato può alloggiare fino a dodici sensori del tipo microbilancia al quarzo. In questo caso solo i cristalli di quarzo con contatti in oro sono di provenienza commerciale, mentre la loro conversione in sensori chimici avviene dopo la funzionalizzazione con uno strato di materiale assorbente, consentendo quindi molta più libertà nell'ottimizzarne il funzionamento. I sensori sviluppati sono prevalentemente funzionalizzati con un film molecolare di macrocicli pirrolici, in particolare porfirine e corroli, un'ampia classe di materiali particolarmente adatti a interagire con composti volatili organici. Inoltre questi materiali sensibili non hanno bisogno di elevate temperature per funzionare come gli ossidi metallici, consentendo quindi anche di progettare un dispositivo consumo energetico davvero ridotto.

In particolare sono state effettuate sperimentazioni in camere refrigerate di differenti dimensioni e a differenti temperature (camera MISA di 4m^3 e Angelantoni di 0,1 m^3) riempendo le camere di frutti all'80% o comunque in modo significativo. Le sperimentazioni sono state condotte su susine, pere, fragole e, infine, pesche noci. Sono state effettuate misure dello spazio di testa con i nostri nodi sensoriali equipaggiati con i sensori definiti dalle sperimentazioni precedenti e montati su piattaforma Libelium. Per ogni sperimentazione sono stati utilizzati vari nodi, con differenti configurazioni di lavoro nella prima sperimentazione con le susine, e con la stessa configurazione nelle sessioni successive. Il sistema di campionamento automatico "multipoint" (fino a 6 punti diversi di campionamento) da noi sviluppato nel corso del primo anno del progetto ha consentito la sincronizzazione tra i nodi sensoriali, il PEN3 per tutte le campagne di misura ed infine il naso elettronico sviluppato da Tor Vergata nella campagna con le pesche noci. Il sistema di campionamento "multipoint2 ha consentito anche di utilizzare altri strumenti analitici, quali l'analizzatore di etilene e quello di anidride carbonica per misure manuali senza necessità di aprire le porte delle celle frigo, cosi come la possibilità di prelevare campioni d'aria per le analisi al gascromatografo. E' stato quindi possibile evolvere la metodologia di condotta

delle varie campagne sperimentali riducendo l'apertura delle porte solo alle misure distruttive (durezza, contenuto di zuccheri, etc,) ed ottiche che richiedevano il prelievo di campioni della frutta in esame per avere una correlazione e una verifica tra i dati ottenuti dallo spazio di testa e i dati ottenuti da misure dirette sulla frutta.

Una descrizione dettagliata delle campagne di prova eseguite e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/036.

d.2 Utilizzo dei materiali a cambiamento di fase (pcm) per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e qualitative delle celle frigorifero usate per lo stoccaggio e trasporto di prodotti alimentari freschi

Nell'ambito della presente annualità, sulla base dei risultati sperimentali precedentemente ottenuti, l'attività dell'ENEA è stata finalizzata alla sperimentazione delle diverse possibilità di utilizzo dei materiali a cambiamento di fase (PCM) per ottimizzare le prestazioni energetiche e qualitative delle celle frigorifero usate nella catena del freddo. L'impatto energetico della catena del freddo sui consumi mondiali di energia è stato valutato intorno all'8% del consumo totale di energia nel mondo[12], quindi anche piccoli miglioramenti nelle prestazioni energetiche delle celle frigorifero possono portare a interessanti riduzioni di impatto energetico complessivo anche in un settore già molto avanzato a livello tecnologico.

Nei due anni precedenti sono state sviluppate e caratterizzate strutture multistrato contenenti PCM per ottimizzare le celle frigorifero utilizzate per il trasporto nella catena del freddo. E' stato sviluppato un pannello multistrato con il packaging del PCM progettato per lavorare sui carichi termici esterni alla cella frigorifero. Lo sviluppo del packaging del PCM e la fabbricazione dei pannelli multistrato prototipo sono stati inizialmente mirati a pannelli costituiti da due lamiere metalliche isolate termicamente mediante uno strato di polistirolo espanso. Il PCM utilizzato, Rubitherm RT35, pensato come scudo termico, è stato dimensionato e scelto per funzionare sui lati esterni della cella frigorifero posta in ambienti esterni. Questa tipologia di pannelli ha evidenziato interessanti caratteristiche termiche e limiti meccanici attribuibili alle difficolta di una fabbricazione artigianale, ma ha anche suscitato l'interesse della Plastoblok Italiana s.r.l., ditta che nasce per costruire furgonature per trasporti in regime di temperatura controllata ma anche hangar per proteggere la strumentazione delle piattaforme petrolifere nel deserto. Il pannello sandwich in questo caso è realizzato da due laminati in fibra di vetro isolati termicamente con polistirene rigido in lastre calibrate. Le lastre di vetroresina ed i blocchi di polistirene vengono opportunamente assemblati a pressione con colla poliuretanica bicomponente. In stretta collaborazione con la Plastoblok sono stati quindi progettati e realizzati prototipi di pannelli multistrato di ottima qualità e con una metodologia compatibile anche con una produzione a livello industriale (Figura 335).

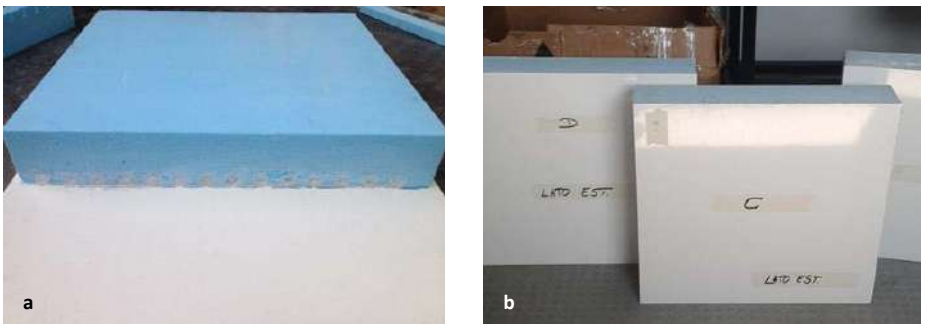


Figura 335. Pannello D durante la costruzione per evidenziare la canalizzazione contenente Rubitherm RT35 a contatto col pannello in vetroresina esterno (a); vista complessiva dei pannelli finiti (b)

Il grosso vantaggio nel realizzare il packaging del PCM in questi pannelli con lo strato isolante rigido è la maggiore stabilità meccanica del pannello che rende possibile ricavare la sede per il PCM direttamente fresando dei canali nel blocco di polistirene, lo strato isolante quindi può funzionare anche come strato di contenimento del PCM. Il pannello di riferimento (A), di area 600x600 mm^2, è realizzato da due strati di vetroresina esterni (2 mm ciascuno) che racchiudono un'anima isolante in polistirene di 70+30 mm. Sono stati poi realizzati a due pannelli fresando sulla superficie dei due blocchi isolanti di polistirene rispettivamente 13 e 14 canali, che, una volta incollati i due blocchi isolanti affacciando i canali perpendicolarmente, formano una griglia di contenimento lasciata vuota per il pannello B e successivamente riempita di Rubitherm RT35 attraverso un opportuno foro nel pannello C. Infine, per

[12] Atti del workshop del Progetto europeo FRISBEE (Food Refrigeration Innovations for Safety, consumers' Benefit, Environmental impact and Energy optimization along the cold chain in Europe Refrigeration), Roma 6 marzo 2013

ottenere una pannello multistrato con lo strato di PCM con un contatto termico migliore con il pannello di vetroresina montato sul lato esterno della cella, è stato realizzato anche un blocco di polistirene fresato con 14 canali decapitato da un lato ed incollato sul pannello di vetroresina esterno (Figura 335a). I canali sono stati successivamente riempiti col PCM, incollando il rimanente pannello in vetroresina ed il blocco di polistirene decapitato si è ottenuto il quarto pannello (D) dalle dimensioni esterne identiche ai primi tre. Le caratterizzazioni termiche e meccaniche sui quattro prototipi ci forniscono un quadro esaustivo sulle possibilità di utilizzo di PCM all'interno dei pannelli isolanti che costituiscono le celle frigorifero, completando il lavoro dei due anni precedenti. I risultati ottenuti hanno fornito indicazioni su come procedere dal punto di vista costruttivo nell'ingegnerizzazione di un pannello multistrato che contenga, oltre allo strato isolante, anche due strati PCM con diverse temperature di fusione, uno sul lato esterno della cella ed uno sul lato interno della stessa. Il tutto andrebbe però opportunamente dimensionato e sarebbe poi scelto in base alle temperature di funzionamento della cella stessa.

In questo terzo anno di lavoro, anche in considerazione di quanto svolto nel sub-obiettivo d.1 [rapporto RdS/PAR2014/036], parte dell'attività è stata focalizzata alla sperimentazione dell'utilizzo dei PCM in una cella frigorifero, a supporto dell'evaporatore del gruppo refrigerante con l'obiettivo di aumentarne l'efficienza energetica e/o le prestazioni termiche.

Questa modalità di inserimento del PCM all'interno della cella frigorifero permette di utilizzare le celle esistenti. In collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche (UNIPM) è stato progettato, realizzato e verificato sperimentalmente un scambiatore modulare contenente PCM accoppiato all'aria in uscita dall'evaporatore del gruppo refrigerante. L'obiettivo di questa attività è stato quello di sperimentare i benefici energetici legati alla presenza di materiali a passaggio di fase (PCM) nel vano interno delle celle frigorifere. Il PCM ha il compito di assorbire i carichi termici che si sviluppano all'interno del vano refrigerato, sommati a quelli che provengono dall'esterno, termostatando la temperatura interna dell'aria a quella impostata, funzionando ad integrazione o in sostituzione della macchina frigorifera. Per realizzare tale applicazione lo scambiatore contenente il PCM è stato installato in una intercapedine ventilata in corrispondenza dell'evaporatore all'interno di una delle due celle refrigeranti acquisite da ENEA e disponibili presso UNIPM.

Un misuratore di potenza ed energia, Efergy E2 Classic, è stato implementato sulla cella Misa (Figura 336a) per monitorare i consumi elettrici nelle varie condizioni di funzionamento durante le campagne sperimentali sui diversi tipi di frutta [rapporto RdS/PAR2014/036]. Le celle refrigerate usate per la sperimentazione (Figura 336), sia in Casaccia che ad Ancona, sono dotate dello stesso gruppo refrigerante, con potenza di circa 1,1 kW, che consente di impostare la temperatura di funzionamento tra 0 e 8°C. La temperatura è regolata solo accendendo il compressore non appena la temperatura misurata nel vano interno vicino all'evaporatore supera di un valore prefissato la temperatura impostata, per poi spegnerlo al raggiungimento del valore prefissato. Le differenze tra i consumi (Tabella 86) sono quindi sostanzialmente legate al diverso "duty cycle" del gruppo refrigerante necessario caso per caso.

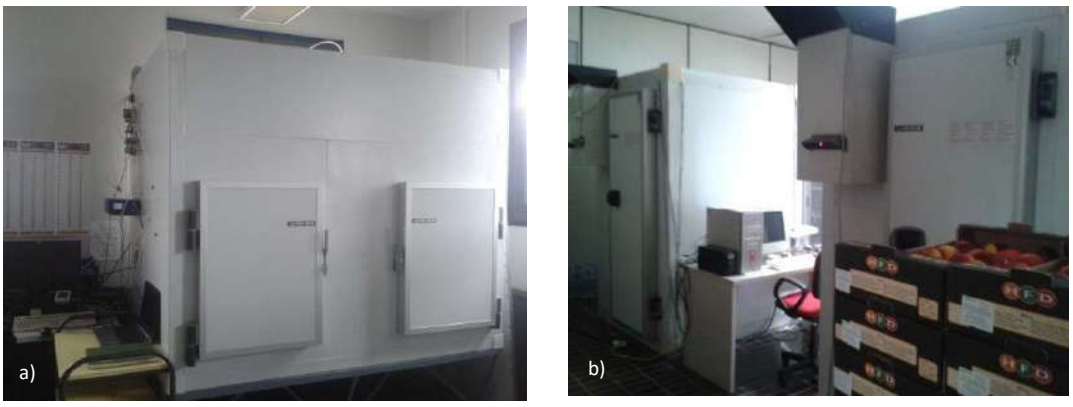


Figura 336. Cella Misa presso C.R. ENEA Casaccia (a); laboratorio con cella di riferimento e cella dotata di PCM per la campagna sperimentale con i diversi tipi di frutta presso UNIPM (b)

Tabella 86.Consumo giornaliero della cella Misa con diverse temperature impostate.

Tset (°C)	Consumo medio in 24 h (kWh)	Risparmio (%)
0	14,64	
3	12,48	14,7
5	8,74	30,0
8	6,24	28,6

Una prima analisi dei dati ottenuti paragonando il funzionamento delle celle con e senza PCM ha confermato come l'inserimento del PCM all'interno del vano refrigerato, in corrispondenza dell'evaporatore, porta ad un aumento dell'efficienza energetica del sistema abbattendo notevolmente il numero di cicli di accensione del gruppo frigorifero. Inoltre con il quantitativo di PCM utilizzato nelle sperimentazioni (circa 17 kg) si può dire che la cella funziona in una modalità di semi passività, come verificato con opportune simulazioni di back-out elettrico sia a cella vuota che a cella carica. Dal confronto tra le due celle presso UNIPM invece non è stato notato un significativo miglioramento nelle simulazioni di apertura delle porte così come durante le fasi di carico della merce.

E' stata quindi effettuata una campagna sperimentale con frutta fresca (pesche noce) anche presso UNIPM per valutare direttamente le potenzialità dello scambiatore contenente PCM confrontando le prestazioni delle due celle identiche, una con lo scambiatore installato e l'altra come riferimento, cariche ciascuna con 150 kg di frutta (pesche noce). Le due celle sono state monitorate per oltre due settimane, fino a che le pesche non hanno raggiunto chiaramente e contemporaneamente il termine della loro "shelf life". Sono stati utilizzati sia il sistema di acquisizione di UNIPM [rapporto RdS/PAR2014/039] per confrontare le prestazioni energetiche e le storie termiche nei punti più significativi delle celle, che i nodi sensoriali sviluppati [rapporto RdS/PAR2014/036] per monitorare lo spazio di testa della frutta e valutarne lo stato di conservazione.

E' stato confermato che l'inserimento del PCM all'interno del vano refrigerato, in corrispondenza dell'evaporatore, porta effettivamente ad un aumento dell'efficienza energetica del sistema, ma soprattutto si sono ottenute interessanti indicazioni su come si possano avere benefici gestionali nella gestione dello stesso gruppo refrigerante. Infatti, esaminando gli andamenti dei vari parametri misurati, si nota come l'uso del PCM abbatta drasticamente il numero di cicli nel tempo di intervento del gruppo frigorifero per dare le stesse condizioni di temperatura all'interno del vano refrigerato. E' proprio la riduzione nel tempo di funzionamento del gruppo refrigerante che porta al minore consumo energetico in condizioni stazionarie di temperatura. La rilevante riduzione dei cicli di funzionamento indica anche una riduzione altrettanto elevata di utilizzo dei componenti elettro-meccanici del compressione e delle valvole di regolazione con un proporzionale aumento della vita della macchina nel suo complesso.

La presenza di materiale in passaggio di fase all'interno del box refrigerato garantisce altresì gli operatori dai rischi di black-out elettrico della rete in quanto il quantitativo di PCM utilizzato nelle sperimentazioni (circa 17 kg), se preventivamente portato allo stato solido permette il mantenimento, dopo spegnimento, della temperatura al di sotto di quella di una identica cella di riferimento senza PCM, alimentata elettricamente, per un periodo di alcune ore. In queste condizioni si utilizza appieno la capacità di immagazzinamento del calore da parte dello scambiatore con PCM che ha il tempo per effettuare completamente il cambiamento di fase. In pratica si può dire che la cella funzione in caratteristiche di semi passività. La capacità del PCM di mantenere a cella spenta i valori di temperatura dell'aria interna alla cella per un tempo assai lungo ha suggerito una modalità di utilizzo delle due celle frigo durante la campagna sperimentale sulla frutta che ha consentito risparmi energetici notevoli (intorno al 50% in 24h) impostando i gruppi di refrigerazione con due diverse temperature di funzionamento, una più bassa durante la notte che consentisse di solidificare il PCM, e l'altra più alta di qualche grado durante il giorno. Il monitoraggio termico completo delle due celle e quello degli spazi di testa per valutare lo stato di conservazione della frutta ha suggerito modalità di controllo del gruppo refrigerante che ottimizzano il consumo energetico della macchina frigorifero adattandola alle condizioni di conservazione del prodotto alimentare. Anche in assenza di un sistema di monitoraggio dello stato di conservazione del prodotto alimentare che possa controllare il gruppo refrigerante, si può pensare di attivare tutte le macchine frigo costituenti gli anelli attivi della catena del freddo solo durante la notte per solidificare il PCM, disinserendole dalla rete durante il giorno quando le temperature esterne sono più elevate. In questo modo si possono utilizzare fasce orarie durante le quali la rete elettrica è sottoutilizzata, alleggerendone invece il carico nei periodi di massimo picco di utilizzo dell'energia elettrica. Considerando quanto percentualmente sul consumo elettrico nazionale pesi la catena del freddo, si può concludere che l'uso dei PCM in modo diffuso potrebbe portare rilevanti benefici al sistema elettrico. Gli operatori avrebbero la possibilità di avere significativi risultati economici in quanto le fasce notturne di utilizzo prevedono una diminuzione dei costi dell'energia e ciò potrebbe riflettersi anche sul costo finale del prodotto, incentivandone l'acquisto e quindi aumentandone i consumi. L'uso delle macchine solamente durante il periodo notturno aumenta ulteriormente l'efficienza del gruppo frigorifero in quanto lo smaltimento del calore da parte del condensatore può avvenire ai bassi livelli di temperatura caratteristici del periodo notturno facendo innalzare l'isoterma del ciclo inverso di Carnot, diminuendo i lavoro di compressione ed il conseguente utilizzo di energia elettrica. Dal punto di vista del miglioramento delle condizioni termiche all'interno alla cella, si può notare come lo scambiatore di PCM posto a valle dell'evaporatore consente una maggiore uniformità di temperature all'interno della cella frigorifero ed un valore di temperatura visto dalla frutta molto più vicino a quello impostato per il gruppo refrigerante.

In conclusione, sono state sperimentate le diverse possibilità di utilizzo dei materiali a cambiamento di fase per il miglioramento del funzionamento delle celle frigorifero, sia esplorando soluzioni che inseriscono il materiale direttamente nel pannello isolante, sia quelle che mirano a ottimizzare il funzionamento del gruppo refrigerante. Entrambi gli approcci suggeriscono interessanti sviluppi, ma il secondo, oltre al vantaggio iniziale di poter utilizzare le celle esistenti, ha evidenziato le potenzialità di sviluppo di celle refrigerate "smart", in cui l'ottimizzazione del funzionamento è esaltata da un "intelligente" controllo del gruppo refrigerante che si adatta all'hardware del sistema complessivo.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/038.

e. Recupero di elementi pregiati presenti nei RAEE

e.1 Sviluppo di processi ecoinnovativi per il recupero di metalli ad elevato valore aggiunto da RAEE

Nell'ambito delle attività della presente annualità ENEA ha sviluppato diverse attività con l'obiettivo di valorizzare i Rifiuti provenienti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE), che rappresentano una reale opportunità di crescita sostenibile per il nostro Paese, povero di risorse primarie. Un approccio sostenibile dovrebbe essere sviluppato in modo da tenere conto di tutti i materiali potenzialmente recuperabili (approccio prodotto-centrico). Il recupero di materie prime da matrici complesse è particolarmente efficace se si avvale dell'uso di tecniche idrometallurgiche che per la loro stessa natura permettono di separare e purificare specie chimiche estremamente diverse. Le attività svolte hanno avuto come oggetto il recupero di Pd da microcircuiti ceramici e di metalli e terre rare da lampade a fluorescenza e magneti permanenti. E' stato inoltre effettuato uno studio preliminare del trattamento del refluo prodotto da un processo di recupero di materiali da schede elettroniche, sviluppato da ENEA e per il quale sono state depositate due domande di brevetto. Tutte le prove descritte nei paragrafi successivi sono state ripetute almeno quattro volte, i risultati riportati esprimono la media aritmetica delle misure.

Recupero del palladio da schede elettroniche

Il Palladio, grazie alle sue peculiarità risulta indispensabile in molte applicazioni. Poiché la sua concentrazione nei microcircuiti ceramici è maggiore di quella di molti minerali dai quali viene estratto, recuperarlo da tali fonti costituisce un'opportunità di sviluppo. Oggetto di questo studio sono i circuiti elettronici della scheda recuperati a valle del processo brevettato da ENEA. Il lavoro si è articolato nelle fasi descritte nl seguito

Caratterizzazione della matrice

Il campione ha una granulometria compresa tra 0,8 mm e 2 mm: è estremamente eterogeneo e pertanto è stato sottoposto a macinazione e omogeneizzazione fino ad ottenere una polvere (<0,01 mm). Al fine di determinare la composizione della matrice sono state fatte prove mediante mineralizzatore a microonde con miscele di acidi minerali diverse ($HF+HNO_3$, HNO_3, HNO_3+HCl) e diversi rapporti solido/liquido (S/L). La caratterizzazione è stata ottenuta attraverso:

1. il confronto dei risultati ottenuti dall'analisi spettrofotometrica della soluzione dopo la mineralizzazione;
2. la valutazione dei bilanci di materia ottenuti dalla somma delle specie determinate in soluzione e dal valore della riduzione del peso del campione. Nella Tabella 87 sono riportati i dati che mostrano che il Pd è presente per lo 0,16% in peso; sono state quindi studiate le condizioni ottimali di lisciviazione.

Tabella 87. Caratterizzazione microcomponenti ceramici

Elemento	%	Elemento	%
B, Cd, Co, Ir, V	<0,001	Fe	0,32
Al, Au,Cr	0,02	Cu	0,67
Zn	0,05	Pb	1,34
Sn	0,09	Ni	11,19
Ag, Mn	0,11	Ba	26,49
Pd	0,16	Residuo ceramico	59,4

Determinazione della cinetica e migliori condizioni di lisciviazione

Le condizioni ottimali di lisciviazione sono state ottenute effettuando prove alle temperature di 25°C, 40°C e 60°C con agenti lisci vianti di diversa natura, concentrazione e rapporto S/L. Sono stati usati HCl conc. (37% w/w), HNO_3 conc. (65% w/w), H_2SO_4 conc.(96% w/w), miscela nitrico-cloridrica 1:3 e loro soluzioni diluite rispettivamente 1:1 e 1:10 (V/V) con un rapporto S/L=1:10 e 1:5 ed un tempo di contatto di 24h. Le condizioni ottimali di lisciviazione

sono state ottenute con acqua regia, S/L=1:10, t=24h, T=25°C. Separando il residuo della lisciviazione e ripetendo su di esso per tre volte la lisciviazione è stato osservato che il 99% del palladio viene portato in soluzione con la prima sequenza estrattiva.

Valutazione della selettività e dell'efficacia dell'estrazione con solvente per il recupero del palladio

L'estrazione con solvente è stata effettuata sulla soluzione ottenuta dalla lisciviazione dei componenti ceramici nelle condizioni ottimali. E' stato utilizzato come estraente l'Aliquat 336 solubilizzato in limonene; la fase acquosa è stata separata e analizzata tramite spettrofotometria per verificare l'efficienza dell'Aliquat 336 su tale matrice, sia dal punto di vista della selettività che dell'estrazione (Tabella 88).

Tabella 88. Efficienza di estrazione con Aliquat 336

Elemento	mg Me/g campione nel lisciviato	% di Me estratta in Aliquat 336	Elemento	mg Me/g campione nel lisciviato	% di Me estratta in Aliquat 336
Ag	1,1	**80**	Mn	1,1	**<0,2**
Al	0,2	**6**	Ni	112	**4**
Au	0,2	**97**	Pb	13,4	**98**
Ba	265	**7**	Pd	1,6	**100**
Cr	0,2	**8**	Sn	0,9	**81**
Cu	6,7	**21**	Zn	0,5	**100**
Fe	3,20	**97**			

Il bario e il nichel nonostante siano presenti in soluzione in quantità notevolmente maggiore rispetto al palladio(rispettivamente il 27 e l'11%) rimangono in fase acquosa mentre quest'ultimo viene estratto completamente in fase organica: ciò dimostra la maggior affinità dell'Aliquat 336 per il palladio rispetto a nichel e bario.

Si è proceduto trattando le soluzioni contenenti Pd con un eccesso stechiometrico di $NaBH_4$; dopo filtrazione le soluzioni e i precipitati ridisciolti sono stati caratterizzati. Nella Tabella 89 è riportata la percentuale di ciascun elemento rispetto alla quantità nel lisciviato.

Tabella 89. Trattamento con $NaBH_4$ in eccesso: metalli nel precipitato rispetto alla quantità nel lisciviato

Elemento	Me recuperato rispetto al totale presente nel lisciviato (%)	Elemento	Me recuperato rispetto al totale presente nel lisciviato (%)
Ag	78	Fe	88
Al, Mn	-	Ni	1
Au	90	Pb	76
Ba	-	Pd	100
Cr	5	Sn	80
Cu	2	Zn	80

Le specie presenti in soluzione sono state ridotte producendo un residuo solido purificato da Ni contenente il 100% del Pd presente nel campione d'origine: un'ulteriore purificazione del precipitato può essere ottenuta attraverso lisciviazioni selettive con soluzioni diluite (<5%) di HNO_3 e/o HCl che solubilizzano i metalli meno nobili (Fe, Pb, Sn, Zn) determinando un arricchimento in Pd del precipitato.

Recupero di metalli e terre rare da lampade a fluorescenza

Una lampada a fluorescenza è un tubo sigillato sotto vuoto la cui superficie interna è rivestita da una pellicola di materiale contenente elementi ad elevato valore aggiunto come metalli e terre rare. Questo lavoro, per recuperare tali elementi, si è articolato nelle fasi riportate nel seguito.

Caratterizzazione della matrice

Il campione è costituito da polvere di dimensioni <2 mm nella quale sono presenti frammenti di vetro con dimensioni fino a 1 cm. Tale polvere proviene dal trattamento meccanico dei tubi al neon di lampade a fluorescenza esauste dopo deferrizzazione e distillazione del Hg. Per caratterizzare la matrice una parte del campione è stata macinata con mortaio fino ad ottenere una polvere fine e omogenea (<0,01mm); sono state fatte prove per sciogliere il campione mediante mineralizzazione con diverse miscele di acidi minerali ($HF+HNO_3$, HNO_3, HNO_3+HCl) e diversi rapporti solido/liquido. In tutti i casi il campione dopo il trattamento presenta ancora

un residuo solido composto da vetro, pertanto la caratterizzazione (Tabella 90) è stata ottenuta effettuando confronti intertecnica attraverso: spettroscopia a fluorescenza a raggi X (direttamente sulla polvere); spettrofotometria ad emissione MP-AES (sulla soluzione ottenuta dopo mineralizzazione); valutazione dei bilanci di materia ottenuti dalla somma delle specie determinate in soluzione e dal valore della riduzione del peso del campione.

Tabella 90. Caratterizzazione delle lampade a fluorescenza

Elemento	µg/g	Elemento	µg/g	Elemento	µg/g	Elemento	µg/g
Al	6300	**Ga**	< 4	**Zr**	330	**Eu**	1240
Y	10800	**Cr**	68	**Nb**	< 16	**Br**	23
P	40800	**Mn**	2200	**Mo**	10	**Sr**	2600
Ge	19	**Fe**	2700	**Ag**	19	**Ba**	7700
Cl	1150	**Co**	164	**Cd**	92	**La**	820
K	7100	**Ni**	72	**Pb**	7500	**Ce**	1250
Ca	135000	**Cu**	410	**Sn**	41	**As**	56
Ti	< 30	**Zn**	200	**Sb**	1440	**W**	145
Residuo vetroso: 769 g							

Si osserva la presenza di elementi ad elevato valore aggiunto come Y, Eu, Sb in quantità maggiore di 1000 µg/g (evidenziata in giallo). Al fine di ipotizzare un processo per il recupero degli elementi sopra evidenziati attraverso tecniche idrometallurgiche è stata studiata la lisciviazione.

Determinazione della cinetica e migliori condizioni di lisciviazione

Sono state condotte prove cinetiche di lisciviazione con agenti lisci vianti di diversa natura: HCl conc. (37% w/w); HNO_3 conc. (65% w/w) e H_2SO_4 conc. (96% w/w) e soluzioni degli stessi diluite rispettivamente 1:1 e 1:10 (V/V) con un rapporto S/L 1:10 e 1:5. Le prove sono state condotte a 25, 40 e 70°C. Le condizioni ottimali di lisciviazione sono state ottenute con HCl 6M, S/L 1:5, T=25°C. In tali condizioni la lisciviazione raggiunge la massima efficienza per tutte le specie dopo 4h ad eccezione di Y ed Eu per i quali sono necessarie 24 h. La lisciviazione, in queste condizioni, permette di portare in soluzione rispettivamente oltre il 95% di Y, circa il 90% di Eu e oltre il 73% di Sb.

Studio dell'efficacia delle tecniche di separazione e purificazione

Elettrodeposizione**:** sono state effettuate delle prove sulla soluzione ottenuta dalla lisciviazione del campione per individuare le condizioni ottimali di elettrodeposizione per il recupero dell'Sb. In Figura 337 sono riportati i risultati ottenuti (1A, 2h, 200ml, 25°C) analizzando la soluzione prima e dopo l'elettrolisi e sciogliendo i metalli depositati sul catodo (oltre l'80% dell'Sb e circa il 30% del Cu) per verificare i bilanci di materia.
La ridissoluzione del deposito catodico mostra che è costituito da uno strato esterno composto da Sb con grado di purezza >98% all'interno del quale si individua il di Cu con analogo grado di purezza

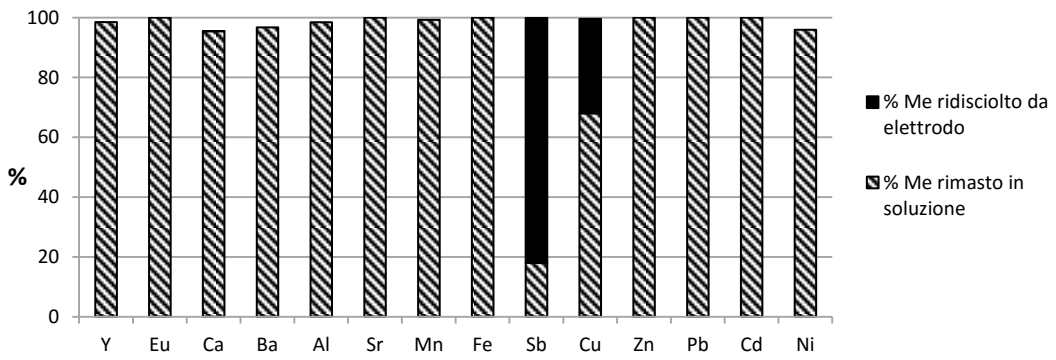


Figura 337. Bilancio di materia dopo elettrodeposizione (1 A, 2 h, 200 mL, 25 °C)

Precipitazione frazionata: per separare e recuperare Y ed Eu selettivamente, sono stati fatti studi di precipitazione frazionata con i seguenti agenti precipitanti: H_2SO_4, NH_3 e $H_2C_2O_4$. Dopo ogni aggiunta di reattivo sono stati caratterizzati sia la soluzione che il corrispondente precipitato formatosi, al fine di verificare i bilanci di materia. I risultati hanno messo in evidenza che effettuando una prima precipitazione (Figura 338) a pH=2,4 con NH_3, separando il precipitato (1) dalla soluzione (refluo1) e sciogliendolo in HCl 6M per poi effettuare una nuova precipitazione con $H_2C_2O_4$ 1M è possibile ottenere un precipitato (2) contenente il 90% dell' Y ed Eu lisciviati mantenendo in soluzione il Fe (refluo 2).
Dal confronto effettuato sui precipitati n.1 e n.2 (Tabella 91) possibile osservare che il processo proposto determina l'arricchimento del precipitato in Y ed Eu riducendo notevolmente le impurezze, in particolare Fe, Ca, Al, Ba, e Sr. Inoltre le quantità di Y ed Eu in P2 costituiscono oltre il 90% della quantità totale di tali specie presenti nella soluzione iniziale.

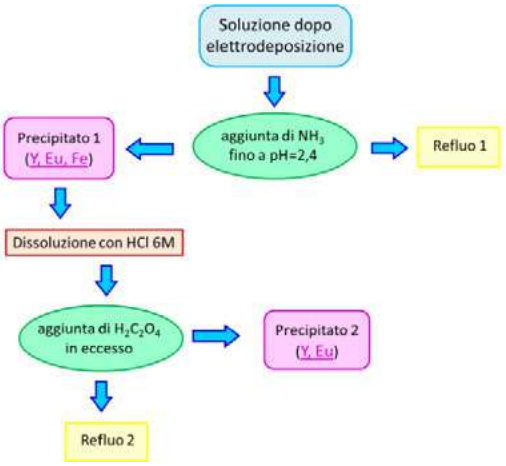


Figura 338. Schema di processo per purificare Y ed Eu

Tabella 91. Composizione percentuale di P1 e P2

Elemento	P1 %	P2 %	Elemento	P1 %	P2 %	Elemento	P1 %	P2 %
Y	55,8	74,3	Sr	2,3	0,4	Al	2,5	0,5
Eu	5,8	7,3	Cu	0,1	<0,1	Ba	2,8	0,9
Fe	10,8	6,4	Sb, Zn	0,1	<0,1	Mn	0,5	<0,1
Ca	19,3	10,2	Pb	0,1	<0,1	Cd, Ni	<0,1	<0,1

Estrazione con solvente

Il precipitato P2 è stato ossidato con $KMnO_4$ 0,1N in ambiente acido per acido cloridrico a pH=1 fino a totale dissoluzione, la soluzione è stata filtrata. Su tale soluzione è stata effettuata l'estrazione con solvente utilizzando una soluzione 0,02M di PC-88A in kerosene. Il rapporto fase acquosa/fase organica è stato 1/1, il pH iniziale è 2 ed il tempo di estrazione di 1h. Sono stati effettuati tre cicli consecutivi di estrazione: con due sequenze si estrae il 90% dell'Y e con tre il 100% dell'Y e il 40% dell'Eu.

Recupero di metalli e terre rare da magneti permanenti

Tra le terre rare considerate critiche neodimio e disprosio rappresentano due dei target più ambiti in quanto attualmente indispensabili in applicazioni come i magneti permanenti. Il lavoro si è concentrato sulle seguenti attività.

Caratterizzazione dei magneti

I magneti permanenti provenienti da hard disk, hanno generalmente la forma di una porzione di corona circolare e sono rivestiti da uno strato sottile che è risultato essere per oltre il 99% di Ni. Per quanto riguarda la caratterizzazione del magnete, il campione è stato sciolto con HNO_3 conc. a 70°C, in tali condizioni la dissoluzione è stata totale e la soluzione ottenuta è stata caratterizzata (Tabella 92).

Tabella 92. Caratterizzazione dei magneti permanenti

Metallo	% Me nel campione	Metallo	% Me nel campione
Fe	63	Cu	0,2
Nd	28	Mn	<0,1
Pr	<0,001	Al	0,1
Sm	0,5	Sr	0,1
Dy	1	Cd	0,1
B	0,8	Ca	<0,001
Ni	3	Cr	0,1
Co	3	Zn	0,01

Determinazione della cinetica e delle migliori condizioni di lisciviazione

Sono state condotte prove di lisciviazione con agenti lisci vianti di diversa natura, diversa concentrazione e diversi rapporti S/L. In particolare sono stati usati HCl conc. (37% w/w); HNO_3 conc. (65% w/w) e H_2SO_4 conc. (96% w/w) e soluzioni degli stessi diluite rispettivamente 1:1 e 1:10 (v/v). Le prove sono state condotte a 25°C, 40°C, 70°C, con S/L=1/5, 1/10 e 1/15. Le condizioni ottimali di lisciviazione si sono ottenute con HNO_3 conc., S/L 1/15, T=70°C, t=30 min.

Studio dell'efficacia delle tecniche di separazione e purificazione

Si è proceduto con lo studio della separazione e purificazione del Nd che costituisce circa il 28% in peso del campione attraverso l'applicazione di due tecniche di separazione e purificazione: precipitazione frazionata ed estrazione con solvente.
Precipitazione frazionata: su un'aliquota della soluzione ottenuta dalla lisciviazione è stata effettuata la titolazione con NaOH 2M: è stato misurato il pH e, per verificare il bilancio di materia, sono stati analizzati i precipitati e i corrispondenti surnatanti. In Tabella 93 sono riportati i dati relativi alla percentuale di ciascuna specie chimica rimasta in soluzione a differenti valori di pH rispetto alla quantità presente nel campione originale.

Tabella 93. Precipitazione frazionata: elementi in soluzione rispetto alla quantità iniziale

elemento	% in soluzione a pH=2,4	% in soluzione a pH=3,4	% in soluzione a pH=8,4	% in soluzione a pH=12
Fe	20	0	0	0
Nd	80	72	0	0
Sm	75	73	0	0
Dy	74	71	0	0
Ni	82	82	12	5
Co	80	77	9	3
Cu	65	64	10	10
Sr	100	100	14	14
Cr	0	0	0	0

A pH=3,4 precipita quantitativamente il Fe ed il 28% del Nd, tali elementi costituiscono complessivamente il 91% dell'intero magnete; ad eccezione del Cr si riduce anche la quantità degli altri (presenti in tracce).

Estrazione con solvente: al fine di verificare la possibilità di estrarre quantitativamente il Fe mantenendo il Nd in soluzione sono stati fatti studi di estrazione con solvente in funzione del pH su soluzioni simulate contenenti separatamente Fe e Nd utilizzando come estraenti il PC-88A e il triottil fosfinossido (TOPO) nelle seguenti condizioni operative: rapporto molare estraente/metallo: 20/1; rapporto fase acquosa/fase organica: 1/1; tempo di estrazione: 1h. Le curve di estrazione ottenute (Figure 339 e 340) rappresentano la percentuale di estrazione dell'elemento dalla fase acquosa in funzione del pH iniziale di estrazione:

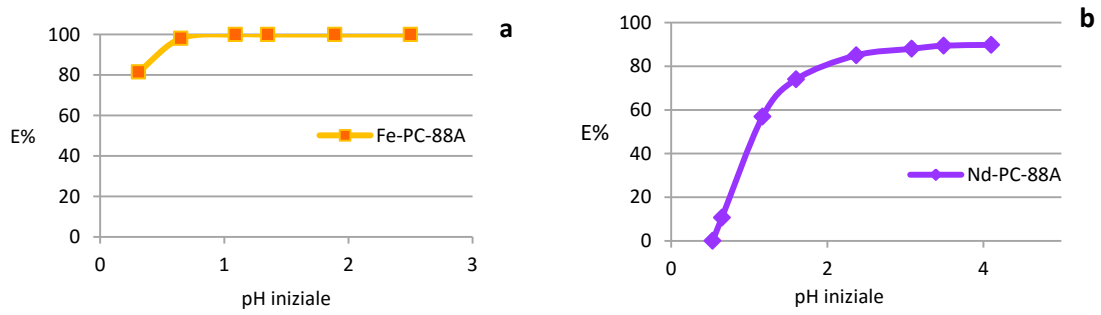


Figura 339. Curva di estrazione del Fe (a) e del Nd (b) con PC-88A in funzione del pH iniziale

È possibile osservare che con PC-88A a pH iniziale pari a 0,5 il Fe viene estratto quantitativamente mentre il Nd rimane in soluzione: tale operazione unitaria costituisce quindi un efficiente metodo per purificare la soluzione dal Fe. Per quanto riguarda i risultati ottenuti con il TOPO (Figura 340) non c'è un valore di pH che permette di separare quantitativamente il Fe dal Nd.

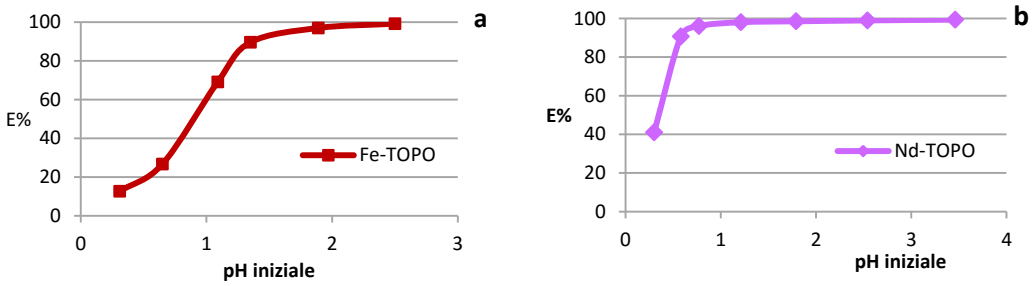


Figura 340. Curva di estrazione del Fe (a) e del Nd (b) con TOPO in funzione del pH iniziale

Pertanto le condizioni ottimali di estrazione si realizzano con PC-88A solubilizzato in cherosene a pH iniziale di estrazione= 0,5. Nella Figura 341 sono riportati i risultati ottenuti sulla matrice reale caratterizzando la soluzione prima e dopo l'estrazione.

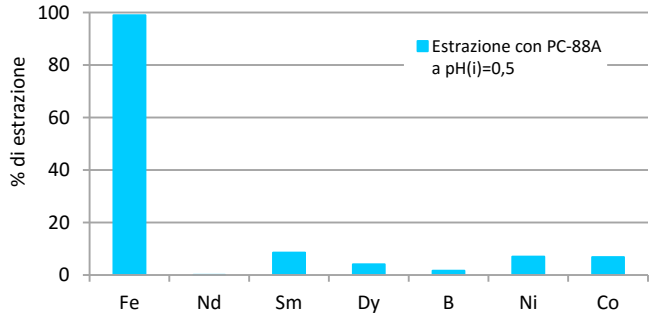


Figura 341. Efficienza di estrazione

Tali risultati confermano che il Fe viene estratto quantitativamente mentre il Nd rimane in soluzione, come già osservato prove effettuate sui campioni simulati. Inoltre nella soluzione residua contenente Nd sono stati sottratti per circa il 10% il Sm, il Ni e il Co determinando un arricchimento percentuale in Nd come mostrato in Tabella 94.

Tabella 94. Composizione del campione prima e dopo l'estrazione del Fe

Metallo	% Me nei magneti	composizione dopo l'estrazione (%)	Metallo	% Me nei magneti	composizione dopo l'estrazione (%)
Fe	63	1	**Mn**	<0,1	<0,1
Nd	28	77,2	**Al**	0,1	0,3
Sm	0,5	1	**Sr**	0,1	0,3
Dy	1	3	**Cd**	0,1	0,3
B	0,8	2	**Ca**	<0,001	<0,001
Ni	3	7	**Cr**	0,1	0,3
Co	3	7	**Zn**	0,01	0,1
Cu	0,2	0,5			

Studio preliminare del trattamento del refluo prodotto dal processo idrometallurgico sviluppato da ENEA per il recupero di Cu, Pb, Sn, Ag, Au (Brevetto ENEA n.ITRM20130549)

Il laboratorio di ENEA ha sviluppato un processo idrometallurgico per il recupero di materiali ad alto valore aggiunto da schede elettroniche, con l'obbiettivo di verificarne la sostenibilità economica su impianto pilota attualmente in fase di realizzazione presso il Centro di Ricerche Casaccia. Il lavoro di quest'anno si è focalizzato sullo studio del refluo prodotto da tale processo, al fine di verificare la possibilità di valorizzazione e di trattamento. Si è articolato in due fasi: 1) caratterizzazione; 2) studi preliminari di trattamento. Il campione è una matrice complessa in quanto contiene specie chimiche di diversa natura in quantità notevolmente diverse dovute all'estrema eterogeneità della matrice lisciviata (schede elettroniche) e dai trattamenti effettuati sul lisciviato. Le caratteristiche e gli elementi monitorati (Al, As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, Cd, Sn, Zn e Hg) con limiti di rilevabilità diversi per ciascuno di essi in presenza di anioni ad elevata concentrazione, hanno reso necessaria la

definizione e l'ottimizzazione di una metodica di misura affidabile supportata da tecniche analitiche diverse che tengano conto dell'effetto matrice. A tal fine è stato stipulato un accordo di collaborazione con il Dipartimento di Chimica della Sapienza - Università di Roma con lo scopo di validare e ottimizzare il metodo di analisi utilizzando tecniche analitiche diverse e confronti intertecnica. Pertanto l'ENEA ha effettuato lo studio preliminare di trattamento secondo due diversi metodi che mirano alla precipitazione delle specie chimiche sopra descritte: A) trattamento con NaOH, e B) trattamento con flocculanti. La caratterizzazione della matrice tal quale e dopo ogni fase di trattamento è stata effettuata dall'università secondo i protocolli di analisi messi a punto per ogni singola specie chimica.

Caratterizzazione

Il refluo è stato filtrato, è stato misurato il pH che è risultato essere <6 ed è stato caratterizzato (Tabella 95).

Tabella 95. Caratterizzazione del refluo a pH<6

Cationi	Conc. µg/L	Cationi	Conc. µg/L	Cationi	Conc. µg/L	Cationi	Conc. µg/L	Anioni	mg/L
B	40000	**Mn**	7700	**Zn**	2600000	**Sn**	<20	**Cl^-**	500
Al	<100	**Fe**	<200	**As**	7	**Ba**	320	**SO^{4--}**	31000
Cr(tot)	<200	**Ni**	230000	**Se**	4	**Hg**	<6	**NO^{3-}**	240000
Cr(VI)	<200	**Cu**	380000	**Cd**	14	**Pb**	72000		

Dai dati riportati in Tabella 95 è possibile osservare l'elevata concentrazione di Zn, B, Mn, Ni, Cu e Pb (evidenziati nel testo in verde); è inoltre evidente l'elevata concentrazione dello ione nitrato (240 g/L).

Trattamento con NaOH: al refluo è stato aggiunto NaOH al 30% in peso secondo lo schema seguente (Figura 342).

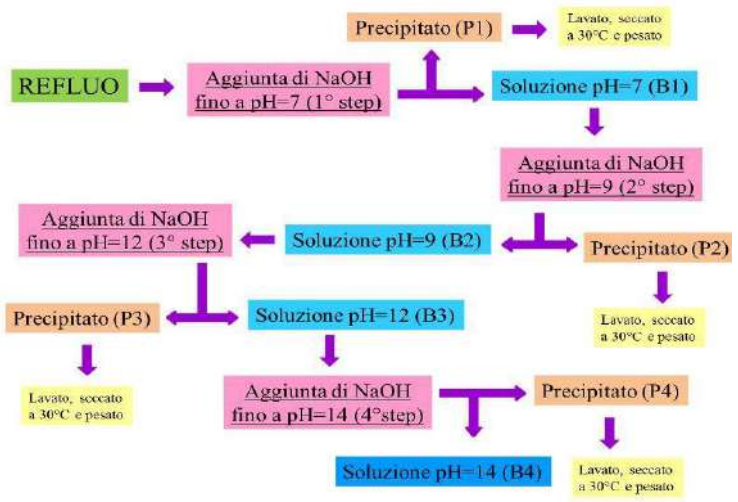


Figura 342. Schema trattamento con NaOH 30%

In Tabella 96 sono riportate le % di abbattimento per i pH=7-9-12 degli elementi in verde nella Tabella 95 rispetto al refluo tal quale.

Tabella 96. Efficacia del trattamento ai diversi valori di pH

Elemento	pH=7 (B1)	pH=9 (B2)	pH=12 (B3)
	% di abbattimento (riferita alle concentrazioni nel refluo tal quale)		
B	20	26	23
Mn	30	>99	>97
Ni	63	>99	>99
Cu	99	>99	>99
Zn	95	>99	>99
Pb	71	97	97

Da tali dati è possibile osservare che trattando il campione fino a pH=9 si ottiene una riduzione di Mn, Ni, Cu, Zn, Pb, di circa il 99% dimostrando l'efficienza di tale processo; il trattamento fino a pH=12 non migliora la resa di abbattimento. Il prodotto così ottenuto è costituito da nitrato di sodio con impurezze <0,02% per il B; <<0,001% per quanto riguarda i metalli e gli altri metalloidi oggetto di studio e di circa 1% per il Cl^-, 0,5% per il Br^- e 13% per il SO_4^{2-} che potrebbero far ipotizzare una valorizzazione come fertilizzante. Il trattamento è stato ripetuto trattando direttamente il refluo con NaOH fino a pH=9, evitando il primo step a pH=7 e ottenendo risultati analoghi: 1) riduzione della concentrazione di Mn, Ni, Zn al di sotto di 2ppm; 2) riduzione della concentrazione di Cr, As, Se, Cd e Hg al di sotto di 0,02ppm; 3) riduzione della concentrazione di Cu e Pb al di sotto di 0,6ppm. Tale trattamento non costituisce un efficace metodo per la rimozione del B.

Trattamento con flocculanti: il refluo tal quale è stato trattato con agenti flocculanti (polielettrolita anionico e cationico), neutralizzato a pH=7 e successivamente il residuo solido formatosi è stato separato dalla soluzione. Nella Figura 343 sono indicate le sei sequenze di trattamento studiate.

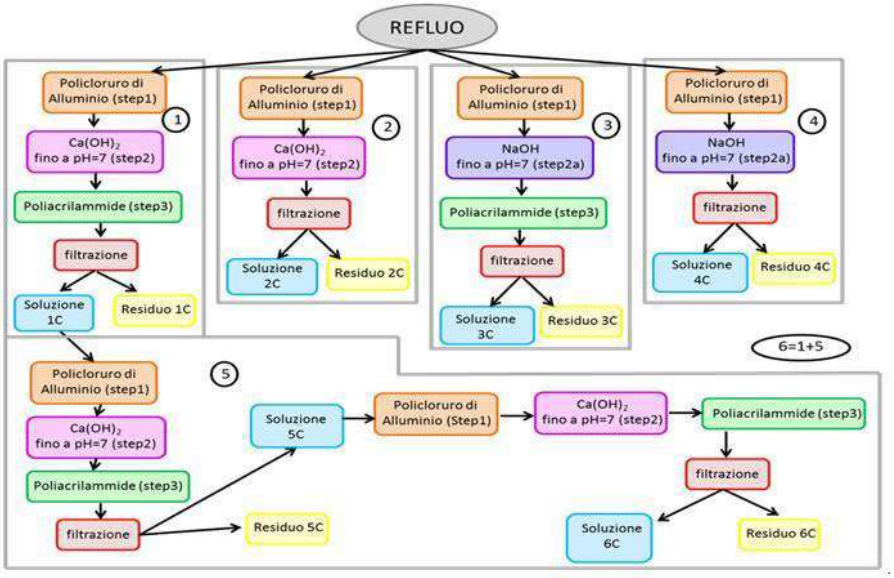


Figura 343. Schema dei diversi trattamenti con flocculanti

Tabella 97. Confronto dei diversi trattamenti con flocculanti

Elemento	% di abbattimento (riferita al valore misurato sul refluo tal quale)					
	Sol.1C	Sol.2C	Sol.3C	Sol.4C	Sol.5C	Sol.6C
B	16	15	-	-	14	30
Mn	97	96	32	36	99	99
Ni	100	100	95	96	100	100
Cu	100	100	99	99	100	100
Zn	100	100	96	97	100	100
Pb	100	99	84	73	100	100

Dai dati riportati in Tabella 97 è possibile osservare che: a) i trattamenti n.1 e n.2 sono più efficienti rispetto ai trattamenti n.3 e n.4 nei quali l'idrossido di calcio è stato sostituito con l'idrossido di sodio; b) confrontando rispettivamente i trattamenti n.1 e n.2 e n.3 e n.4 si può osservare che l'utilizzo della poliacrilammide non migliora il processo; c) i trattamenti n.5 e n.6 che costituiscono la ripetizione del n.1 sul prodotto del processo per una volta (n.5) e per due volte (n.6) migliorano del 2% l'abbattimento del Mn e del 15% il B aumentando tuttavia la quantità di Al di circa cento volte. Il trattamento con tali agenti flocculanti permette di ottenere risultati analoghi al trattamento con NaOH a pH=9, tuttavia introduce altre specie chimiche come l'Al con un maggior impatto ambientale. Data l'estrema eterogeneità della matrice e considerando che la composizione del refluo proveniente dal processo idrometallurgico sviluppato da Enea dipende strettamente dalla composizione dei RAEE utilizzati si sottolinea che i risultati ottenuti costituiscono prove preliminari da implementare sia nella casistica che per la tipologia delle specie chimiche da abbattere.

Osservazioni finali

La necessità di recuperare materie prime a rischio di approvvigionamento e di ridurre il fardello ecologico causato da rifiuti come i RAEE, ha spinto i legislatori a promuovere iniziative volte allo studio di processi di riciclo/recupero dei materiali in essi contenuti. L'eterogeneità di tali matrici, la presenza di una grande quantità di differenti specie chimiche in differenti concentrazioni rende necessario utilizzare tecniche selettive per la separazione e la purificazione delle sostanze in esse contenute. In tali matrici la sostenibilità dei processi di recupero è realizzabile solo valorizzando la maggior quantità possibile di materie prime secondo un approccio metodologico che vede l'intero rifiuto come risorsa e che miri al maggior numero di materiali da recuperare in termini di quantità e varietà (Approccio Prodotto-Centrico). Tale approccio si riflette sia nelle metodologie analitiche che di processo con la finalità di verificare in ogni fase di studio i bilanci di materia e la possibilità di recuperare (dove possibile) più specie chimiche. In questa ottica anche lo studio del refluo prodotto in un processo idrometallurgico diviene un chiaro esempio di chiusura del ciclo di trattamento e di recupero. Da questo punto di vista le tecniche idrometallurgiche costituiscono un efficace strumento per la separazione e la purificazione selettiva di specie chimiche diverse.

In tutti i casi studiati la caratterizzazione della matrice ha costituito la prima fase e ha permesso di individuare le specie chimiche presenti in maggior quantità e/o di maggior interesse per il recupero:

- nel caso dei microcircuiti ceramici il Pd è presente per 1,6 mg/g, valore superiore a quello dei minerali dai quali generalmente viene estratto;
- nel caso delle lampade a fluorescenza è stata individuata la presenza di elementi ad elevato valore aggiunto come Y (10,8 mg/g), Sb (1,44mg/g), Eu (1,24 mg/g);
- nel caso dei magneti permanenti è stata messa in evidenza la presenza di 280 mg/g di Nd e 630 mg/g di Fe.

Infine la caratterizzazione del refluo tal quale e dopo ogni fase di trattamento ha permesso di valutare l'efficienza dei processi studiati. Per quanto riguarda il palladio è stato studiato un processo che permette di recuperare quantitativamente (100%) tale elemento in forma metallica dalla matrice sopra descritta.

Nel caso delle lampade a fluorescenza si è riusciti a recuperare le seguenti quantità rispetto a quelle presenti nella matrice:

- l'80% dell'Sb ed il 30% del Cu con grado di purezza elettrolitico (superiore al 98%);
- il 90% dell'Y ed il 40% dell'Eu.

Per i magneti permanenti si è ottenuta una separazione quantitativa del Fe dal Nd che costituiscono oltre il 90% dei magneti. Per quanto riguarda gli studi preliminari effettuati sul refluo del processo sopra indicato il trattamento con NaOH ha ridotto la quantità di Mn, Ni, Cu, Zn e Pb di oltre il 99% .

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/040.

e.2 Recupero di materiali ad elevato valore aggiunto da AEE

in questo sotto-obiettivo è stato effettuato uno studio preliminare di fattibilità inerente il recupero dei materiali da AEE (Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) di ultima generazione (lampade a LED e a OLED).

I LED come indicato dal loro stesso nome (Light Emitting Diode) sono diodi che emettono luce. I LED per la loro fabbricazione richiedono l'utilizzo di alcuni particolari elementi chimici (fosforo, antimonio, arsenico, allumino, gallio e indio). Vista la loro sempre maggior diffusione, nel medio termine gli analisti si aspettano un aumento della domanda di questi elementi per rispondere alle maggiori esigenze di produzione.

Secondo le schede tecniche fornite dalle principali case produttrici, i LED sono dotati di un'eccezionale tempo di vita (circa 50000 ore in media): da questo dato, ipotizzando un utilizzo di 8 ore/giorno, si può stimare che possano trascorrere anche 15-20 anni prima che questi dispositivi diventino rifiuti. Poiché l'adozione di questi dispositivi in quantità significative è iniziata orientativamente nel 2008, la quantità a fine vita di queste apparecchiature LED è ancora trascurabile rispetto al totale dei RAEE raccolti, ma ci si aspetta un incremento nei prossimi anni.

Sullo scenario dell'illuminotecnica, un'alternativa ai LED potrebbe essere rappresentata dagli OLED la cui diffusione risulta ancora piuttosto limitata ma con grandi potenzialità di impiego in applicazioni future. La caratteristica principale degli OLED è uno spessore estremamente ridotto che li rende particolarmente versatili; rispetto ai LED, gli OLED non sono sorgenti puntiformi, sono in grado di garantire un basso consumo, sono composti da materiali organici poco costosi e possono essere fatti aderire su superfici flessibili, aprendo nuove prospettive alle architetture luminose.

Le loro prestazioni non sono ancora paragonabili a quelle dei LED e quindi probabilmente per una loro diffusione capillare sul mercato si dovrà attendere qualche anno. A questo proposito nel 2005 era stato stimato che

l'introduzione degli OLED nel settore dei personal computer era lontana almeno 4 o 5 anni, ma questa valutazione è ancora attuale: le applicazioni più diffuse sono ad oggi incentrate su dispositivi di piccole dimensioni.

Dal punto di vista del fine vita, molte sono le differenze tra le due tecnologie: gli OLED hanno una durata di vita nettamente inferiore a quella dei LED, anche se il trend sta migliorando conseguentemente ai grandi investimenti nel settore.

Tenendo conto che attualmente non sono disponibili tecnologie mature per il recupero/riciclo di questi rifiuti "di frontiera", è evidente l'urgenza di individuare strategie dedicate. Con queste premesse, le attività illustrate in questo lavoro sono state focalizzate sulla valutazione delle potenzialità di recupero sulla base del tasso di crescita della produzione.

Valutazione delle potenzialità delle filiera di LED e OLED

LED - Light Emitting Diode

A livello mondiale il mercato dell'illuminazione è in forte crescita e la tecnologia LED ha ottime prospettive di sviluppo nonostante ancora non sia possibile sostituirla completamente alle tecnologie tradizionali.

Un'indagine condotta da McKinsey & Company nel 2012, come riportato nelle Figure 344 e 345, ha indicato che l'industria si aspetta che i LED diventino la tecnologia commercialmente più diffusa per l'illuminazione e che il mercato atteso per i prodotti del settore illuminazione supererà i 100 miliardi di euro nel 2020.

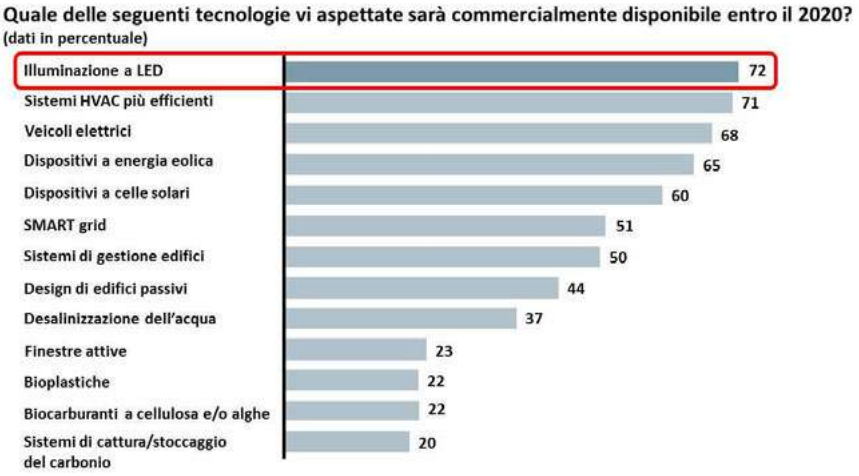


Figura 344. Indagine McKinsey & Company (2012) condotta intervistando 4000 manager impiegati in diversi settori industriali e differente posizione geografica



Figura 345. Aspettative di mercato dei prodotti di illuminazione per settore di applicazione con previsione al 2020 (McKinsey & Company, 2012)

Oltre a fattori puramente tecnologici (durata di vita, efficienza) altri aspetti come quelli normativi ed economici incidono sulla rapida diffusione dei LED. In particolare l'attuale regolamentazione, vincolando l'immissione sul

mercato dei vecchi sistemi di illuminazione (vedi ad esempio le lampade ad incandescenza) e prevedendo norme più stringenti sull'efficienza energetica, ha avuto ricadute positive sullo sviluppo del mercato dei LED.

Si sottolinea comunque che generalmente le apparecchiature che utilizzano LED hanno un tempo di vita media inferiore a quella dei LED stessi (per esempio per i monitor è compresa tra 3 e 5 anni), e quindi non è da escludere la possibilità di investire in tecnologie per il loro recupero integrale dal prodotto complesso, come ipotizzato in recenti attività di ricerca.

Secondo le previsioni degli analisti, intorno al 2025 tutte le apparecchiature relative all'illuminotecnica avranno adottato la tecnologia LED e inizieranno a giungere a fine vita le produzioni relative agli anni successivi al 2008.

Nel caso delle lampadine utilizzate prevalentemente in ambito domestico, prevedendo un tempo di vita medio di 15 anni e la presenza in ogni nucleo familiare di circa 20 dispositivi, al fine di valutare le potenzialità di recupero dei materiali si può ipotizzare che a partire dal 2025 possano giungere a fine vita annualmente circa 50 milioni di unità (lampadine).

Il dato è destinato a subire successivamente le sole fluttuazioni relative al mercato, in considerazione della completa sostituzione delle tecnologie tradizionali di illuminazione in tali settori. In previsione dell'arrivo di questi flussi di rifiuti, è quindi auspicabile individuare per tempo strategie di trattamento e recupero dei materiali in essi contenuti.

Organic Light Emitting Diode - OLED

La diffusione degli OLED è attualmente limitata dalla breve durata del ciclo di vita, nettamente inferiore a quella dei LED; prove effettuate su pannelli OLED TV hanno rilevato che dopo 1000 ore il potere illuminante blu era diminuito del 12%, quello del rosso del 7% e quello del verde dell'8%. Complessivamente gli OLED blu hanno una durata di circa 14000 ore a metà del potere illuminante originale (cinque anni a 8 ore al giorno), se utilizzato per gli schermi piatti. Questo dato è nettamente inferiore alla durata tipica di LCD LED e tecnologia PDP (Plasma Display Panels). Negli ultimi anni la ricerca si è focalizzata sul miglioramento delle proprietà e della durata di questi dispositivi, che tuttavia sono ancora soggetti ad una maggiore velocità di perdita del potere illuminante. Questo limite può in parte essere superato lavorando a corrente costante invece che a voltaggio costante.

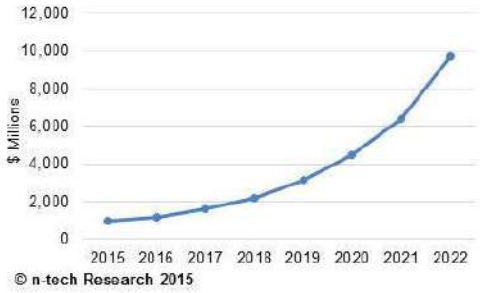


Figura 346. Previsioni del mercato degli OLED al 2022

E' prevista anche per questo settore una rapida crescita a causa delle loro caratteristiche peculiari che li rendono appetibili sia dal punto di vista del consumo energetico che per le possibili applicazioni in dispositivi ispirati alle nuove tecnologie di comunicazione integrata. Uno studio di n-tech Research (Nanomarkets) prevede fatturati che vanno da 970 milioni di dollari nel 2015 ad oltre 4,4 miliardi nel 2020 per raggiungere i 9,7 miliardi nel 2022 (Figura 346).

Per gli OLED, ancor più che per i LED, non sono ancora disponibili tecnologie di recupero efficaci e specifiche.

Stato dell'arte sui processi di recupero e individuazione dei progetti finanziati a livello europeo

I LED, che come discusso nella sezione precedente, sono candidati a diventare la tecnologia predominante per l'illuminazione artificiale, contengono in piccolissime quantità diversi materiali critici associati ai componenti elettronici come Ga, In e terre rare spesso inglobati in resine.

Un ostacolo al recupero di materiali ad alto valore aggiunto è dovuto alle difficoltà di separare i LED dai dispositivi in cui sono collocati e alla bassissima concentrazione in tali matrici.

Attualmente l'intero flusso di rifiuti da apparecchiature contenti LED non è stato ancora valorizzato a causa della scarsa disponibilità di prodotti arrivati a fine vita e dell'inadeguatezza delle filiere esistenti: questi rifiuti contengono sostanze pericolose come arsenico, piombo, gallio, indio e antimonio, che possono avere effetti nocivi sulla salute umana e sugli ecosistemi, tuttavia le difficoltà di rimozione dei dispositivi ottici dai prodotti complessi a fine vita rendono difficile la loro valorizzazione.

A livello europeo negli ultimi 10 anni c'è stato un crescente interesse che ha determinato lo stanziamento di finanziamenti alla ricerca sui LED e gli OLED, anche se attualmente la quasi totalità dei progetti finanziati dalla UE ha come obiettivi lo sviluppo di tecnologie per la produzione di dispositivi per aumentare l'efficienza e/o la durata

di vita. Per quanto riguarda la ricerca sul riciclo come strumento di efficientamento delle risorse si segnala il progetto cycLED che ha come obiettivo la produzione di LED con minor consumo di materie prime critiche.

Caso studio: studio preliminare per il recupero di materiali da lampadine a LED

Le lampadine a LED comprendono una notevole varietà di dispositivi per illuminazione differenti per struttura, composizione e tipologia di LED in esse contenute. Possono essere classificate in tre categorie a seconda dei LED che le costituiscono:

a) lampade con LED THT (Through Hole Technology): per svolgere la loro funzione devono essere posizionati all'interno di fori; sono i più piccoli LED esistenti e sono protetti da capsule tonde di materiale plastico di diametro compreso tra 3 e 5 mm all'interno delle quali è presente un chip appoggiato su un riflettore collegato al catodo;
b) lampade con LED SMD, (Surface Mounted Device), si presentano come un minuscolo parallelepipedo le cui facce laterali hanno la funzione di catodo e anodo e la base superiore emette luce; sono realizzati in materiale plastico che funziona anche da riflettore;
c) lampade con LED PL, (Power LED), sono caratterizzati da potenze di funzionamento superiori e per l'emissione di luce particolarmente brillante.

Al fine di studiare le potenzialità di recupero di materie prime dalle lampadine a LED è stata effettuata su di esse una caratterizzazione merceologica. Data l'estrema eterogeneità di tali dispositivi sono state prese in esame tre tipologie di lampadine a LED (una per categoria).

Per i LED THT sono state esaminate le lampadine modello VALEX (peso unitario medio 63 g) contenenti ciascuna 80 LED THT. I dispositivi sono stati disassemblati e i materiali in esso contenuti sono stati separati in quattro frazioni (plastica, vetro, metallo, LED THT) e pesati. In Tabella 98 è riportata la composizione percentuale delle quattro frazioni; i LED THT costituiscono circa il 15% in peso del campione.

Tabella 98. Composizione merceologica lampadina VALEX

Componente	Peso (%)
LED THT	15
Metalli	17
Plastica	42
Vetro	26





Per i LED SMD sono state esaminate le lampadine Wing Power (peso unitario medio 68g) contenenti ciascuna 14 LED SMD. In questo caso non è stato possibile dissaldare i LED SMD dalla base metallica perché troppo sottili; le rimanenti parti sono state separate come nel caso delle lampadine Valex in quattro frazioni riportate in Tabella 99.

Tabella 99. Composizione merceologica lampadina Wing Power

Componente	Peso (%)
LED SMD + Base	6
Metalli	41
Plastica	28
Vetro	25





Per i LED PL sono state esaminate le lampadine a faretto LED PL LEDION (peso unitario medio 64 g) contenenti ciascuna 3. Nella Tabella 100 è riportata la composizione % secondo le quattro frazioni individuate:

Tabella 100. Composizione merceologica lampadina LEDION

Componente	Peso (%)
Power LED	3
Metalli	57
Plastica	40





Dalla caratterizzazione merceologica effettuata sulle tre tipologie di lampade a LED esaminate, è emerso che solo una piccola percentuale in peso (tra il 3 e il 15%) è attribuibile ai singoli LED. La percentuale in peso dei LED varia

notevolmente da lampadina a lampadina sia a causa della struttura stessa del dispositivo illuminante che del tipo di LED in esso contenuti: ad esempio nelle lampadine modello VALEX sono contenuti 80 LED THT, in quelle Wing Power 14 LED SMD e in quelle LEDION 3 LED PL. Nella Tabella 101 sono riportati i pesi (ottenuti dalla media aritmetica su 50 campioni) per ciascun tipo di LED delle tre tipologie sopra citate. I PL pesano circa il doppio dei THT e venti volte più degli SMD.

Tabella 101. Peso medio per ciascun tipo di LED

LED	Peso [g]
THT	0,30
SMD	0,03
PL	0,60

In Tabella 102 sono riportate le quantità dei materiali potenzialmente recuperabili:

- tenendo conto dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione merceologica delle tre tipologie di campioni esaminate (nell'ipotesi che la quantità totale dei dispositivi dismessi sia costituita da un'unica tipologia di lampadine);
- prendendo in considerazione l'ipotesi di scenario illustrata nel precedente, secondo la quale è stato stimato un flusso di 50 milioni di lampadine a fine vita a partire dal 2025.

Tabella 102. Materiali potenzialmente recuperabili da 50 milioni di lampadine delle tipologie indicate

Lampadina	LED [ton]	Metalli [ton]	Plastica [ton]	Vetro [ton]
Valex	472,5	535,5	1323	819
Wing Power	204	1394	952	850
Ledion	96	1824	1280	-

Materiali come la plastica, i metalli e il vetro possono seguire percorsi di riciclo/recupero ormai consolidati mentre per quanto riguarda la frazione costituita dai LED (100-500 ton) è necessario individuare strategie per la loro valorizzazione.

Si sottolinea che le quantità sopra indicate sono relative solo all'uso domestico e che ulteriori flussi giungeranno dai settori industriali, professionali e auto motive.

Osservazioni finali

I dispositivi a LED/OLED sostituiranno nei prossimi decenni le tecnologie tradizionali di illuminazione, tuttavia mentre i LED si stanno diffondendo rapidamente nei più svariati settori, la diffusione degli OLED risulta ancora piuttosto limitata (nonostante le grandi potenzialità di impiego) per la loro attuale minore durata. Secondo le previsioni degli analisti, intorno al 2025 tutte le apparecchiature relative all'illuminotecnica avranno adottato la tecnologia LED e inizieranno a giungere a fine vita le produzioni relative agli anni successivi al 2008.

Nel caso delle lampadine utilizzate prevalentemente ad uso domestico, prevedendo un tempo di vita medio di 15 anni e il possesso di circa 20 dispositivi per nucleo familiare, si può ipotizzare che a partire dal 2025 possano giungere a fine vita annualmente circa 50 milioni di lampadine. A questo flusso di rifiuti corrispondono quantità di materiali comprese tra 100-500 t di LED, 500-2000 t di metalli, 1000-1400 t di plastica e circa 1000 t di vetro.

Per l'adeguata gestione di questi flussi è quindi auspicabile individuare per tempo strategie di trattamento e recupero dei materiali in essi contenuti. I materiali "tradizionali" come la plastica, i metalli ed il vetro possono essere trattati secondo quanto già avviene negli impianti per il trattamento dei RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) mentre per i LED è necessario pensare a nuovi processi di pretrattamento/riciclo/riuso.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/043.

f. Realizzazione di una facility per la sperimentazione e verifica di motori elettrici ad alta efficienza.

Analisi di mercato e definizione delle specifiche. Progettazione e approvvigionamento delle componenti della facility

Obiettivo dell'attività di ricerca svolta nel presente subtask è lo sviluppo di un protocollo, contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previsto dal Regolamento della Commissione 640/2009.

La parte iniziale delle attività ha avuto per oggetto l'analisi della normativa[13] per individuare una gamma di motori elettrici su cui indirizzare la ricerca e sviluppo e definire, quindi, il campo di applicazione sulla quale la facility dovrà operare.

La IEC 60034-30:2008 definisce le classi di rendimento IE1, IE2 e IE3 per i motori trifase con determinate specifiche, la successiva IEC 60034-30-1:2014 allarga la gamma dei motori interessati dalla norma (es. 8 poli e fino a 1000 kW) e definisce i parametri per una nuova classe di rendimento (IE4).

Da un punto di vista legislativo la Comunità Europea ha affrontato il problema con il Regolamento della Commissione 640/2009, adottato il 22 luglio 2009, il quale specifica i requisiti in materia di progettazione ecocompatibile per i motori elettrici definendo le specifiche per l'appartenenza alle classi di efficienza minima (IE2, IE3) e i tempi d'introduzione delle suddette classi di efficienza:

- dal 16 giugno 2011 i motori immessi sul mercato devono essere in classe di efficienza IE2;
- dal 1 Gennaio 2015 i motori con potenza tra 7,5 e 375 kW devono essere in classe di efficienza IE3 oppure IE2 se accoppiati ad inverter;
- dal 1 Gennaio 2017 la classe di efficienza imposta per i motori con potenza tra 0,75 e 375 kW sarà IE3 oppure IE2 se esse verranno accoppiati ad inverter.

I motori elettrici ad alta efficienza possono portare ad una significativa riduzione del consumo energetico con conseguente beneficio per l'ambiente. Un'importante ragione per la loro più ampia diffusione sul mercato è l'armonizzazione delle norme relativamente alle prove di funzionamento, alla definizione delle classi di rendimento e alla evidenza dei dati di targa.

La capillare diffusione dei motori a livello industriale, nell'ordine di oltre 19 milioni di unità installate ad oggi in Italia, fa sì che i tre quarti dell'energia elettrica consumata nel settore industriale sia attribuibile al funzionamento dei motori elettrici, valore che corrisponde a circa il 40% del consumo elettrico nazionale. Le potenzialità complessive di miglioramento dell'efficienza energetica di questi sistemi in modo economicamente efficace sono state quantificate nel 20-30% circa.

Attraverso un'attenta analisi di mercato e coinvolgendo alcune aziende produttrici, nonché il Gruppo Macchine Rotanti di ANIE Energia, è stato possibile ricavare una stima della distribuzione sia della domanda da parte del mercato, sia dell'attuale utilizzo dei motori elettrici in campo industriale in funzione delle specifiche tecniche degli stessi.

Tale risultato è stato reso possibile grazie anche all'analisi dei dati contenuti sul portale realizzato da ENEA (http://motorielettrici.enea.it) in collaborazione con il Gruppo Macchine Rotanti di ANIE Energia, che ha come obiettivo quello di raccogliere sul sito i prodotti conformi al Regolamento della Commissione (CE) 640/2009.

Alla luce dei risultati ottenuti e delle risorse disponibili in questa fase si è cercato di individuare la gamma di motori sul quale indirizzare la ricerca e sviluppo potendo così definire il campo di applicazione sulla quale la facility dovrà operare, definendo le specifiche per i motori che potranno essere testati. È stato quindi ristretto il campo di applicazione ai motori elettrici aventi le seguenti caratteristiche:

- motori asincroni;
- monovelocità e trifase;
- frequenza di 50 Hz o 50-60 Hz;
- tensione nominale fino a 1.000 V;
- potenza nominale compresa tra 0,12 kW e 15 kW;
- da 2 a 8 poli;
- per servizio continuo.

Per lo svolgimento di verifiche su motori elettrici asincroni fino a 15kW, l'identificazione delle grandezze da misurare, della strumentazione più idonea e delle tecniche di misura richiedono la valutazione dell'ordine di grandezza dei parametri dei motori oggetto di verifica. A tal fine è stato, quindi, investigato e sintetizzato lo stato dell'arte inerente le misurazioni delle grandezze necessarie alle prove sperimentali ed individuata la strumentazione commerciale più adatta agli specifici obiettivi che il progetto si è proposto di raggiungere. Sono state considerate e individuate le misurazioni di tensione, corrente, frequenza, potenza, resistenza, temperatura, velocità angolare e coppia.

Al fine di mantenere un adeguato livello di accuratezza delle misurazioni per tutto il range di potenze dei motori elettrici sulla quale la facility dovrà operare, si è scelto di progettare un laboratorio basato su due banchi prova

[13] Dettagli e approfondimenti sulla normativa vigenti sono nel rapporto RdS/PAR2014/044.

distinti, progettati adeguatamente per operare rispettivamente sui range di potenza 0,12-3kW e 3-15kW.

Dopo un'attenta disamina dello stato dell'arte e dopo aver considerato tutte le opzioni disponibili sul mercato si è scelto di adottare dei banchi prova realizzati con motori ed inverter a recupero ed un'adeguata meccanica che permettono di ottenere i seguenti vantaggi:

- recupero di energia;
- essendo i motori raffreddati con ventilazione forzata, si evita di realizzare un impianto di raffreddamento e trattamento acque necessario con l'adozione di freni a correnti parassite;
- esecuzione caratteristica meccanica portando il motore da velocità di sincronismo fino a zero giri (con i freni a correnti parassite non è possibile se non abbinando un freno a polveri nella configurazione Tandem con i relativi costi);
- esecuzione prove di trascinamento su organi passivi per verificarne l'assorbimento meccanico ai vari regimi (esempio: misura della resistenza meccanica delle giranti).

Per le misure di potenze si è scelto di adottare un Power Analyzer, con l'ausilio di adeguati TA, che possegga le seguenti caratteristiche:

- Range corrente: 0,5-40 A
- Range tensione: 15-1000 V
- Accuratezza: 0,1%
- Range frequenza: DC, 0,5 Hz - 100 kHz
- Misurazione simultanea di tensione, corrente, potenza e armoniche
- High-speed data updating (100 ms)

I banchi prova hanno un alto grado di automazione e sono corredati di software specialistici per la gestione del processo, l'elaborazione dei dati e la generazione di reportistica adeguata.

Il laboratorio di verifica dovrà soddisfare i requisiti di qualità previsti dalle norme in materia, la norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 che indica i requisiti generali per la competenza dei laboratori ad effettuare prove e/o tarature, compreso il campionamento. Essa si applica alle prove e tarature eseguite utilizzando metodi normalizzati, non-normalizzati e metodi sviluppati da laboratori.

Per come è stata strutturata, i laboratori di prova e di taratura che operano in conformità alla presente norma internazionale operano anche in conformità alla ISO 9001; non è da considerarsi però vero il viceversa, in quanto la conformità del sistema di gestione per la qualità, all'interno del quale opera il laboratorio, ai requisiti della ISO 9001, non costituisce da sé prova della competenza del laboratorio a produrre dati e risultati tecnicamente validi. La conformità dimostrata alla presente norma internazionale non implica la conformità del sistema di gestione per la qualità attuato dal laboratorio a tutti i requisiti della ISO 9001.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/044.

g. Analisi di soluzioni tecniche per l'efficientamento dei processi produttivi nelle PMI

Valutazione dell'implementazione di audit energetico nelle PMI per comparti industriali

Come noto, l'art. 8 della Direttiva Europea sull'Efficienza Energetica (2012/27/UE, di seguito indicata con l'acronimo EED, relativo a audit energetici e sistemi di gestione dell'energia, prevede al comma 2 che "gli Stati membri elaborano programmi intesi ad incoraggiare le PMI a sottoporsi a audit energetici e favorire la successiva attuazione delle raccomandazioni risultanti da tali audit". Il comma 9 dell'art. 8 del Decreto Legislativo 102/2014 che recepisce la citata EED nell'ordinamento italiano, prevede che entro il 31 dicembre 2014 sia pubblicato un "bando per il cofinanziamento di programmi presentati dalle Regioni finalizzati a sostenere la realizzazione di diagnosi energetiche nelle PMI o l'adozione nelle PMI di sistemi di gestione conformi alle norme ISO 50001".

La promozione di strumenti di informazione e di analisi dei consumi all'interno delle PMI rappresenta quindi un obiettivo preliminare prioritario per il perseguimento dei citati obiettivi, al fine di facilitare e rendere maggiormente efficace l'effettiva implementazione dell'audit energetico, nonché per avere contezza dell'ordine di grandezza dei risparmi energetici effettivamente conseguibili e dei relativi costi da sostenere dalle imprese per la realizzazione dei necessari interventi di efficientamento individuati attraverso l'audit.

A tale scopo, il presente studio propone l'analisi delle prestazioni energetiche e della propensione all'efficienza energetica di un campione di 104 imprese italiane, in particolare PMI, grazie ai dati ricavati dai questionari compilati nell'ambito del progetto CEEM[14] che, di fatto, ha rappresentato un laboratorio su scala regionale di

[14] Il progetto CEEM - *Central Environmental and Energy Management as a kit for survival* (http://www.ceemproject.eu/)

quello che, su scala nazionale, ENEA sarà chiamata a proporre in attuazione dell'articolo 8, comma 2, della Direttiva Europea sull'Efficienza Energetica, in tema di supporto alle PMI per incoraggiarle a sottoporsi a audit energetici. Inoltre, i dati a disposizione, raccolti tutti secondo lo stesso questionario (riportato nell'appendice del rapporto RdS/PAR2014/046) hanno anche permesso un confronto tra i vari paesi aderenti al progetto.

I dati grezzi di partenza, frutto della compilazione dei questionari, sono stati riorganizzati in un foglio MS Excel interrogabile attraverso delle macro, con la possibilità sia di un'analisi per paese e per (sotto)settore della performance energetica e della propensione all'efficienza energetica, sia di un confronto tra paesi per quanto riguarda gli indicatori sintetici di efficienza energetica.

Il campione di partenza (104 osservazioni) è costituito da micro imprese per il 41%, piccole imprese per il 38%, medie imprese 14% e grandi imprese 6%. Visti gli obiettivi di questo studio, l'analisi di dettaglio ha focalizzato soltanto sulle 98 micro, piccole e medie imprese del campione di partenza. Il nuovo campione è pertanto così definito: 44% di micro imprese, 41% di piccole imprese e il restante 15% di medie imprese.

Sulla base della spesa annuale per l'acquisto di energia elettrica e dei consumi elettrici dichiarati dalle aziende è stato possibile determinare il prezzo medio dell'energia elettrica in funzione delle dimensioni aziendali. Si è inoltre determinato il rapporto tra la spesa per l'acquisto di energia elettrica ed il fatturato delle aziende in funzione delle dimensioni aziendali. In a è riportato il confronto tra il prezzo medio dell'energia elettrica ed il rapporto tra spesa elettrica annuale e fatturato in funzione delle dimensioni aziendali. È possibile osservare come all'aumentare delle dimensioni aziendali il prezzo medio dell'energia elettrica diminuisca, passando dai 0,28 €/kWh nelle micro imprese, ai 0,23 €/kWh nelle piccole imprese per arrivare ai 0,19 €/kWh nelle medie imprese. Dal grafico in Figura 347a è possibile osservate come il rapporto tra spesa elettrica annuale e fatturato sia direttamente influenzato dal costo dell'energia elettrica. Infatti si passa dal 3,5% nelle micro imprese a circa il 2% nelle medie imprese. In Figura 347b è riportato il consumo di energia elettrica in funzione delle dimensioni aziendali. Dall'analisi dei dati disponibili risulta che il consumo medio di energia elettrica nelle micro imprese è di circa 70 MWh/anno, nelle piccole imprese è di circa 430 MWh/anno e nelle medie imprese è di circa 1,6 GWh/anno.

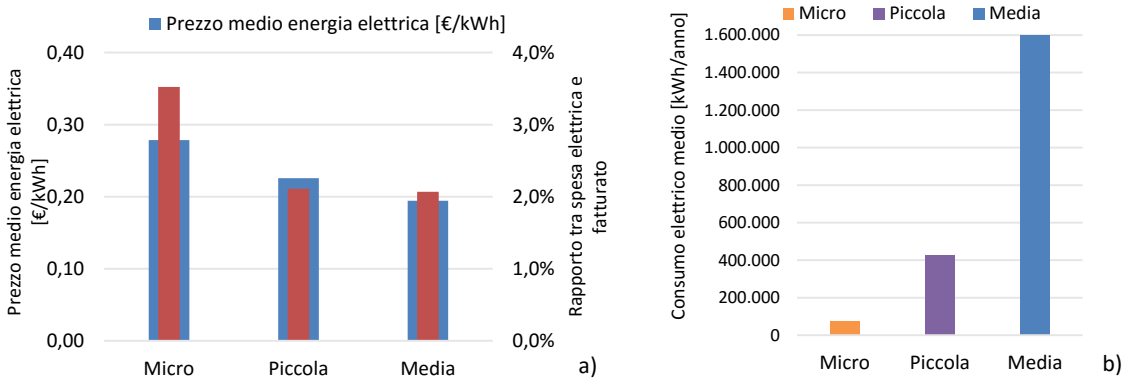


Figura 347. Confronto tra il prezzo medio dell'energia elettrica ed il rapporto tra spesa elettrica annuale e fatturato (a) e consumo elettrico medio (b) in funzione delle dimensioni aziendali

Su tali prestazioni incide evidentemente sia la presenza o meno di tecnologie efficienti installate all'interno dell'impresa sia l'adozione di misure di efficientamento. L'analisi ha pertanto analizzato quali misure siano state adottate in passato dalle imprese del campione sulla struttura dell'edificio (finestre, pareti, tetto, HVAC - *Heating, Ventilation and Air Conditioning*), negli uffici (illuminazione, *green office equipment*, *green procurement*, campagne di sensibilizzazione), nel processo produttivo (motori ad alta efficienza, sistema di gestione energetica, recupero del calore di scarto, gestione e riciclo dei rifiuti), nonché in termini di *Building Management System* e di altri programmi specifici (manutenzione preventiva, gestione energia, standard di qualità, eco-label).

Per quanto riguarda motori elettrici ad alto rendimento e illuminazione ad alta efficienza, due delle principali tecnologie installate, la situazione riscontrata nel campione è riportata in Figura 348 soltanto nel 20% delle imprese intervistate sono presenti motori elettrici ad alta efficienza (il dato cresce in funzione della dimensione); migliore il dato sull'illuminazione, sebbene non si arrivi neanche alla metà delle imprese intervistate, non osservando in questo caso alcuna correlazione con la dimensione aziendale.

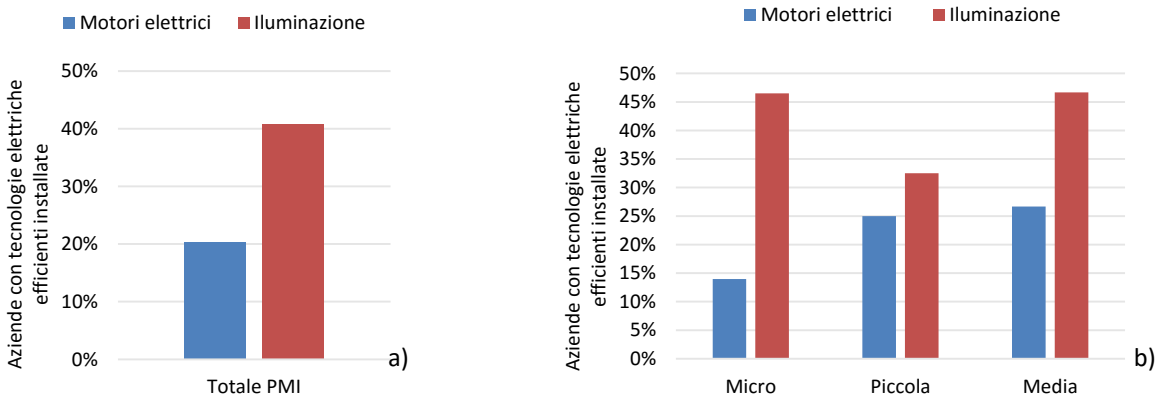
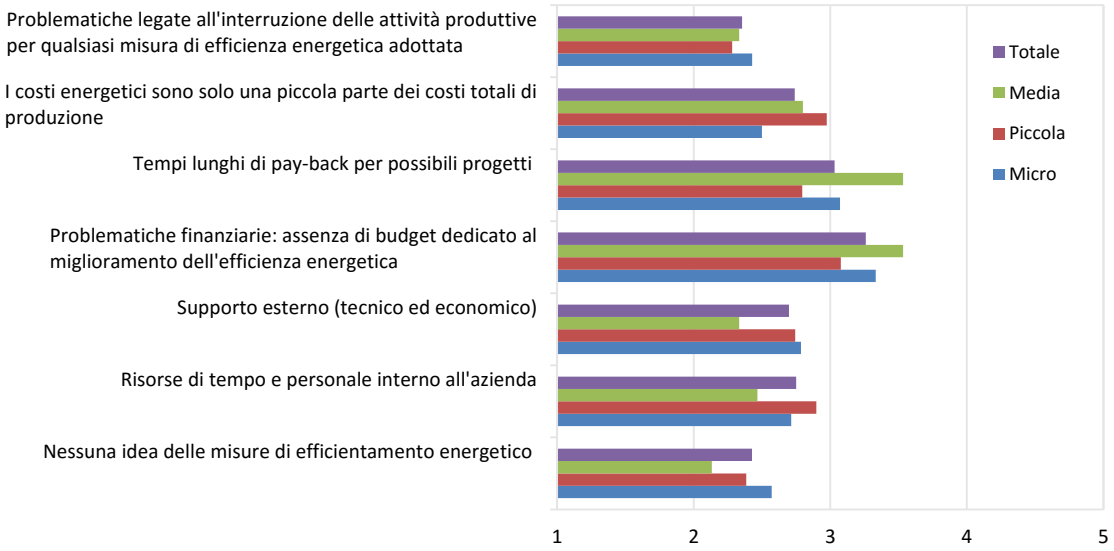


Figura 348. Diffusione delle tecnologie elettriche efficienti nelle PMI nel campione totale (a) e in funzione della dimensione aziendale (b)

In prospettiva futura delle attività di informazione e supporto alle PMI che coinvolgeranno a breve l'ENEA in attuazione della Direttiva sull'Efficienza Energetica, una sezione estremamente interessante è quella relativa alla percezione delle barriere e drivers dell'efficienza energetica. Attraverso una scala Likert, da 1 (piccolo ostacolo o bassa rilevanza) a 5 (grande ostacolo o alta rilevanza), emerge chiaramente dalla Figura 349 come l'assenza di un budget espressamente dedicato a progetti di questo tipo, nonché i tempi di realizzazione relativamente lunghi (che in alcuni casi potrebbero comportare un fermo delle attività), rappresentino le principali barriere all'adozione di misure di efficientamento. Non trascurabile la quota di imprese che non sono a conoscenza né, in generale, del tema dell'efficienza energetica, né delle relative misure adottabili nella propria impresa e delle relative opportunità che offre il mercato.



Legenda: 1. Poco rilevante; 2. Abbastanza rilevante; 3. Rilevante; 4. Molto rilevante; 5 .Estremamente rilevante

Figura 349. Percezione delle barriere all'efficientamento energetico nelle PMI in funzione della dimensione aziendale

Circa un terzo delle imprese intervistate ha riferito l'intenzione di adottare misure di efficientamento, nuove o addizionali rispetto a quelle già implementate: la Figura 350 riporta le informazioni relative alla tempistica prevista ed al relativo risparmio energetico atteso. Circa la metà degli interventi previsti sarà realizzata entro tre anni; si attende che oltre un terzo degli interventi produrrà un risparmio al di sotto del 10%, rispetto al consumo attuale.

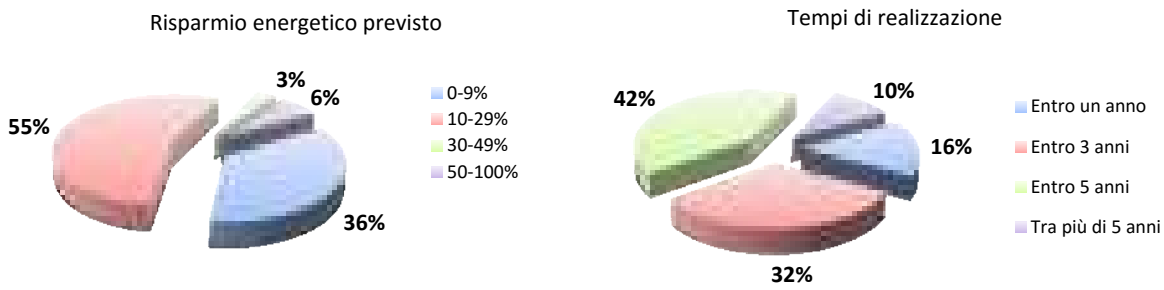


Figura 350. Interventi di efficientamento all'interno dell'impresa previsti per il prossimo futuro: tempi di realizzazione (a) e risparmio energetico previsto (b)

Infine, è risultata di particolare interesse anche l'analisi dei commenti forniti liberamente dagli utenti, nonché il feedback degli esperti coinvolti a supporto della compilazione del questionario da parte delle imprese. In particolare:

- Costo vs. consumo reale: è più facile rispondere a domande riguardanti il costo dell'energia rispetto a quelle in materia di consumo reale. Spesso le aziende hanno una chiara visione del costo, piuttosto che dei kWh consumati.
- Dialogo costruttivo con le aziende: le aziende già sensibili ai temi dell'efficienza energetica e della sostenibilità hanno mostrato interesse ad investigare le possibili soluzioni per l'efficienza energetica in termini di eventuali esigenze già individuate e proposte emerse da esterni (come "Casi Studio"). In altri casi, in cui le aziende non sono collegate alle problematiche dell'efficienza energetica, il dialogo è stato instaurato con difficoltà, e in generale lo strumento ha incrementato l'interesse solo quando la persona coinvolta aveva un lavoro o interessi personali vicini alle tematiche proposte.
- Proprietà vs. affitto: nei casi in cui l'azienda ha sede in un edificio non di proprietà, l'interesse per l'efficienza energetica degli edifici è limitato.
- Informazioni "nascoste": molto spesso, nelle aziende e PMI non vi è una persona specificamente incaricata della gestione energetica e ambientale, quindi le aziende hanno avuto l'opportunità di raccogliere informazioni che sono già presenti al loro interno, ma non sempre vengono messe in relazione tra loro.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti nelle linee G.1 e G.2 è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/046

h. Diffusione dei risultati

La diffusione scientifica dei risultati è stata realizzata con la partecipazione a network internazionali e attraverso la partecipazione e l'organizzazione da parte di ENEA di convegni e workshop. Nel luglio 2015 è stato organizzato un convegno tematico sull'intero Progetto presso ENEA Sede su" Efficienza energetica nei settori residenziale, terziario, industriale" orientato al mondo produttivo.

Infine, come ulteriore strumento di scambio di risultati si segnala l'attività di ricerca svolta attraverso la partecipazione al gruppo di lavoro dell'Annex 54 dell' IEA ("Sistemi ibridi di micro-cogenaratori negli edifici") e le attività EERA sul tema "smart grid" e "smart cities" (di cui ENEA ha il coordinamento), la "European Innovation Partnership sulla Smart City", il "JPI Urban Europe" ed il "Covenant of Mayors"(di cui ENEA ha il coordinamento nazionale).

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

a. Reti di poligenerazione

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

L'attività svolta ha riguardato la finalizzazione, messa a punto definitiva e avvio di un sistema di monitoraggio energetico remoto, in tempo reale, di una rete di teleriscaldamento, alimentata da un impianto di cogenerazione con motore a combustione interna, in funzione a Torino. È stato inoltre implementato un software per il

monitoraggio energetico, da cui è possibile scaricare i dati di monitoraggio per le successive analisi ed elaborazioni. Per mezzo di tali dati sperimentali, è stata valutata la consistenza e congruenza delle misurazioni ed è stata elaborata un'analisi energetica, al fine di calcolare le performance di funzionamento del cogeneratore e della rete di teleriscaldamento, anche per mezzo degli indici di valutazione definiti nel rapporto RdS/PAR2013/056 redatto nella precedente annualità.

Messa a punto di un sistema di monitoraggio energetico dell'impianto e della rete

Il sistema di monitoraggio è stato concepito per controllare i flussi di energia dell'impianto di teleriscaldamento, ovvero per effettuare la lettura remota dei dati di consumo relativi agli stabili allacciati alla rete e quelli relativi alla centrale termica che l'alimenta. Esso è entrato in funzione a inizio marzo 2015 e, considerando che il termine della stagione di riscaldamento è fissato al 15 aprile 2015, sono disponibili dati relativi a circa un mese e mezzo di misurazioni.

L'architettura definitiva del sistema di monitoraggio ha previsto la scelta di un sistema dotato di trasmissione dati via onde radio. Ciascuna stazione di rilevamento è stata dotata di un modulo di trasmissione radio, che invia i dati, su richiesta, ad un concentratore dati abilitato alla ricezione/invio segnali radio, installato sul tetto dell'edificio del gestore. I dati vengono poi inviati sul web tramite rete ethernet aziendale, per essere visualizzati ed elaborati sul portale virtuale. Tutti i collegamenti sono di tipo diretto (cablato).

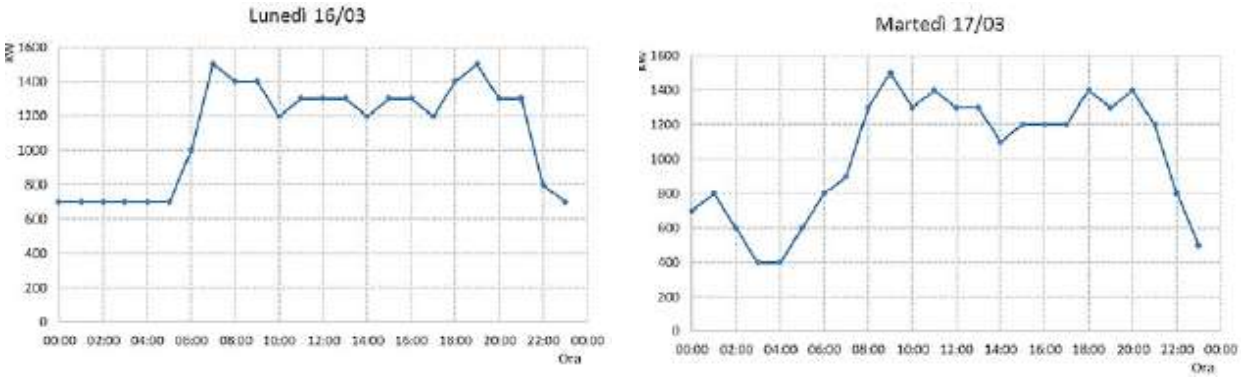
I dati trasmessi da ogni misuratore sono quindi inviati tramite rete ethernet aziendale ad un portale virtuale per il monitoraggio dei flussi energetici. Tramite questo portale, denominato To-Mo (Total Monitoring), è possibile la visualizzazione e la gestione di tutti i dati derivanti dai sensori installati. In particolare, la piattaforma permette l'esportazione in forma tabellare e grafica delle misurazioni ottenute dal sistema di monitoraggio installato.

Analisi dei dati sperimentali relativi alle prestazioni della rete di teleriscaldamento

E' stato analizzato il dato relativo all'energia termica prodotta dalla centrale termica diretta verso le utenze di quartiere, $E_{th,CT,TLR}$. Tale quota è stata successivamente confrontata con la quota totale di energia termica rilasciata ai piè di stabile, indicata con il termine $E_{th,UT.}$

In Figura 351 sono riportati gli andamenti dei profili giornalieri di carico termico, su un periodo settimanale di analisi (16 - 22 Marzo 2015). Si nota una certa granularità del dato sperimentale, dovuta al fatto che la sensibilità dello strumento installato è di 100 kW: esso è cioè in grado di registrare variazioni non inferiori a 100 kW.

Come è possibile osservare, il profilo di potenza termica nei giorni feriali assume il trend tipico caratterizzato dalla presenza di due picchi in fasce orarie corrispondenti alla maggiore domanda. La domanda di picco si presenta attorno alle 7-8 del mattino, dopodiché la potenza termica richiesta diminuisce progressivamente fino alle ore 17-18. Dopo le 19 si registra un nuovo picco minore però di quello del mattino; poi il carico decresce fino a stabilizzarsi, nelle ore notturne, su valori pari al 50% del carico massimo di utilizzo. Attorno alle ore 5-6 del mattino il carico ricomincia a crescere, soprattutto per i prelievi di acqua calda sanitaria, fino alla carico di punta delle ore 8. Questo comportamento si ripete dal Lunedì al Sabato, mentre l'andamento del carico termico relativo a Domenica 22/03, essendo un giorno festivo, presenta una maggiore stabilità, interrotta solamente da un lieve aumento della domanda nelle prime ore del mattino.



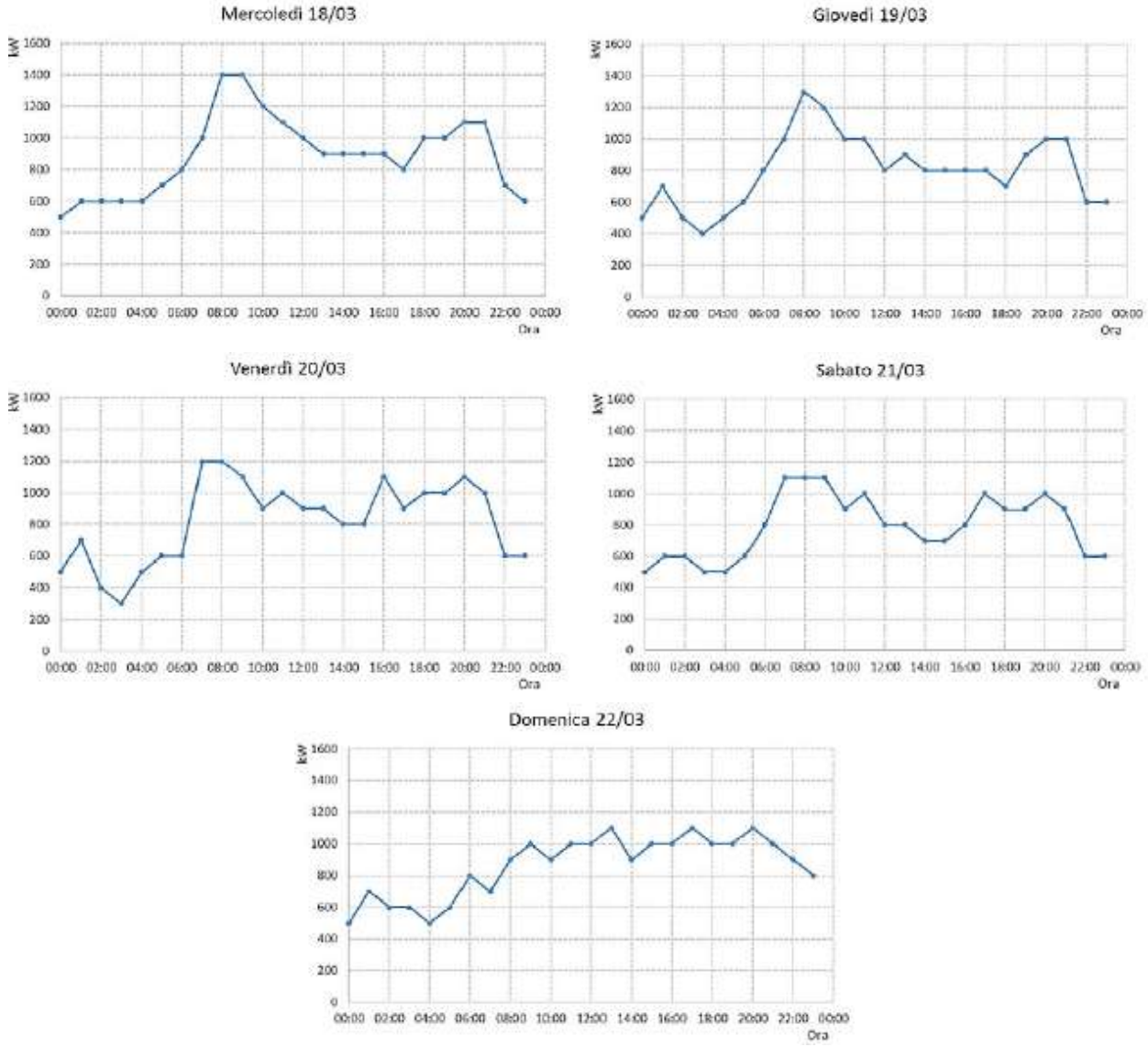


Figura 351. Andamento giornaliero potenza termica immessa in rete

In seguito, è stato scelto un periodo mensile che va dal 13 marzo al 12 aprile 2015, al fine di effettuare una valutazione sulla congruenza e consistenza dei dati ottenuti. In particolare è stata calcolata la quantità di energia termica $E_{th,CT,TLR}$ per il periodo considerato, per poterla in seguito confrontare con l'energia termica globale consegnata alle utenze residenziali $E_{th,ut}$, rilevata dai contatermie installati nei piè di stabile degli edifici teleriscaldati. I risultati ottenuti, utilizzando i dati sperimentali provenienti dal sistema di monitoraggio sono di:

$E_{th,TLR} = 549{,}6$ MWh

$E_{th,ut} = 487{,}5$ MWh

Confrontando questo valore a quello di $E_{th,CT,TLR}$ è possibile calcolare le perdite globali nella rete:

$$\text{Perdite globali} = \frac{E_{th,TLR} - E_{th,ut}}{E_{th,TLR}} \cdot 100 = \frac{549{,}6 - 487{,}5}{549{,}6} \cdot 100 = 11{,}3\%$$

Tale valore risulta in linea con i risultati presentati nel Report RdS/PAR2013/056.

In Figura 352 sono rappresentate le curve con gli andamenti dell'energia totale immessa in rete, $E_{th,TLR}$, e quella totale rilasciata ai piè di stabile, $E_{th,ut}$. Si nota la differenza tra le due curve, rappresentativa delle perdite di rete. Come è possibile osservare, l'ammontare mensile delle perdite sulla rete è di circa 60 MWh.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/017.

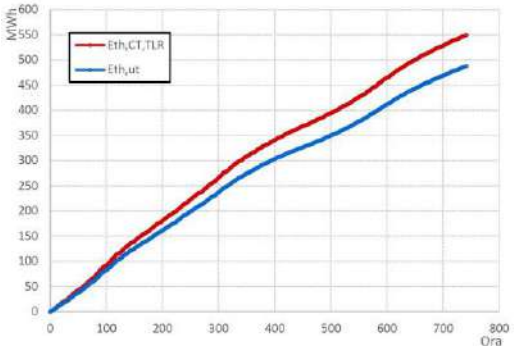


Figura 352. Confronto energia termica immessa in rete e prelevata dai piè di stabile

Università di Cassino e Lazio Meridionale, Dipartimento di ingegneria Civile e Meccanica

Un problema fondamentale e strettamente correlato all'attività di sviluppo di indici prestazionali delle reti termiche è quello legato alla migliore scelta della strumentazione per il monitoraggio delle prestazioni delle reti termiche. Anche la valutazione degli indici termodinamici di prestazioni dei sistemi cogenerativi quali ad esempio il rendimento globale η_{Unit}, ed il Power Energy Saving (*PES*), dipendono strettamente dalle misure di energia primaria fornita all'impianto e di energia termica ed elettrica prodotte.

Dai numerosi confronti con operatori del settore emerge che la variegata offerta di strumentazione di misura del calore disponibile sul mercato e la non completa conoscenza dei fenomeni fisici che governano tali strumenti da parte di utenti, gestori e progettisti, dà luogo a problematiche che non sempre consentono il corretto monitoraggio energetico degli impianti e si traducono in perdite di efficienza (energetica ed economica).

Obiettivo dello studio è stato la caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura installati presso le sottostazioni delle reti termiche distribuite, con particolare riferimento alle piccole reti locali, anche in relazione al reale apporto di fonte energetica rinnovabile alle utenze finali, ovvero, in presenza di apporto di sorgenti distribuite (e.g. solare termico, RSU, geotermia, cascami termici, ecc.). Pertanto a valle di un'analisi preliminare dei principali parametri che caratterizzano energeticamente le reti di teleriscaldamento poligenerative, è stata condotta una analisi dettagliata della strumentazione di misura diretta dei flussi di energia termica.

Uno degli elementi più critici nella gestione delle rete poligenerative è, infatti, la scarsa prevedibilità e dispacciabilità di molte delle nuove fonti e la presenza di nuove tipologie di utenze che possono trasformarsi da passive ad attive. Tutto ciò si aggiunge alla difficoltà di prevedere i profili di carico dei diversi utenti. L'installazione degli smart meter in queste tipologie di reti consentirebbe da un lato una migliore e più fedele fatturazione dei consumi, ma anche la possibilità di sfruttare le conoscenza delle utenze a vantaggio dello stato della rete. Questi strumenti consentono infatti: a) la registrazione e trasmissione del dato; b) la correzione locale del dato di misura; c) la gestione dati di qualità della fornitura; d) la diagnosi del misuratore; e) il pricing dinamico; f) il billing effettivo; g) il benchmarking; h) il miglioramento della sicurezza; i) il miglioramento della CRM; j) l'integrazione con altri sensori e apparecchiature di controllo e regolazione domestici. D'altra parte l'aspetto sicuramente più rilevante nelle ulteriori funzionalità consentite dagli smart meter riguarda la gestione ottimale della rete stessa ed in particolare la gestione dei sovraccarichi e dei vuoti di consumo (i.e. il bilanciamento della rete), l'efficientamento energetico nel trasporto e distribuzione, la sicurezza ed il bilancio in tempo reale della rete.

Un aspetto fondamentale per l'analisi energetica di una rete è il bilancio dei flussi energetici. In particolare, a causa dell''elevato numero e della loro dispersione geografica, i punti di riconsegna termici (ovvero dello scambio con le utenze) rappresentano l'elemento di maggiore criticità. In particolare le configurazioni che generalmente i sistemi di misura possono assumere in corrispondenza dei punti di riconsegna, sono:

- un contatore di energia termica in corrispondenza del punto di riconsegna, quindi a livello condominiale nel caso di edifici condominiali o polifunzionali;
- un contatore di energia termica individuale per ogni unità immobiliare.

E' opportuno inoltre evidenziare che, nel caso di utenze attive, non essendo omologabili MID contatori bidirezionali, è necessario prevedere l'installazione di un ulteriore contatore per la misura delle quantità di energia immesse in rete dall'utenza.

La misura del flusso di energia presso una sottostazione di scambio termico piuttosto che in altri punti della rete (e.g. poli di produzione, presenza di accumuli, etc.) può essere effettuata per mezzo dei cosiddetti sistemi di misura diretta. Gli strumenti tradizionalmente impiegati per la contabilizzazione diretta sono i cosiddetti contatori

di energia termica (i.e. heat meter, HM). Tali strumenti sono costituiti da: i) un misuratore di portata; ii) una coppia di sensori di temperatura; iii) un modulo di calcolo per l'acquisizione dei segnali provenienti dai sensori e per il calcolo dell'energia termica.

Durante l'attività di ricerca sono stati analizzati i principi di misura e le problematiche connesse alla misura diretta dei flussi di energia termica. In particolare è stata effettuata:

- un'analisi metrologica di HM completi con sensori di flusso di tipo statico e tradizionale;
- un'analisi degli effetti di installazione.

Per quanto riguarda l'analisi metrologica, sono stati analizzati diverse tipologie di HM completi con sensori di flusso di tipo statico e tradizionale. I risultati sperimentali mostrano che sia i misuratori meccanici che statici presentano migliori prestazioni alle portate più elevate, con alcune situazioni critiche di sforamento dei limiti metrico-legali alle basse portate. Inoltre, i misuratori meccanici sembrano risentire maggiormente gli effetti della temperatura. Per quanto riguarda l'analisi degli effetti di installazione, i risultati sperimentali mostrano che alcuni disturbi di flusso (e.g. "swirl", "cross flow") possono determinare, soprattutto negli HM meccanici), errori grossolani.

Al contempo è stato condotto uno studio dei sistemi di ripartizione del calore indiretti. Tali sistemi, oggi sempre più diffusi anche a seguito dei recenti obblighi normativi, non effettuano una vera e propria misura dell'energia termica consumata dalle utenze ma solo una stima indiretta di essa. I sistemi di contabilizzazione indiretta standardizzati oggi disponibili fanno riferimento a tre diversi principi di misura, ovvero: i) i ripartitori di calore elettronici (HCA); ii) i contatori dei tempi di inserzione compensati dalla temperatura media del fluido termovettore (ITC-TC); iii) i contatori dei tempi di inserzione compensati dai gradi giorno effettivi (ITC-DDC).Tali sistemi sono regolati da standard tecnici internazionali (EN 834) e nazionali (UNI 11388, UNI 9019), ma non dalla metrologia legale. Durante l'attività di ricerca sono stati quindi analizzati i principi di misura e le problematiche connesse alla misura indiretta dei flussi di energia termica ed in particolare:

- un analisi metrologica dei sistemi di ripartizione del calore;
- una sperimentazione preliminare per l'individuazione delle prestazioni in campo dei sistemi di ripartizione.

Le indagini sperimentali sono state condotte presso il laboratorio LAMI dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale e su un edificio residenziale. I risultati ottenuti mostrano che:

- dal punto di vista teorico le incertezze associate ai sistemi di contabilizzazione diretta sono in linea con i requisiti normativi e legislativi, mentre le incertezze di misura associate alle misure effettuate con i sistemi indiretti potrebbero, in alcune condizioni critiche, raggiungere valori molto elevati (Tabella 103);
- i sistemi di contabilizzazione diretta presentano una buona affidabilità in campo, mentre le misure effettuate con sistemi di ripartizione indiretta non sempre risultano in linea con le incertezze tipiche stimate dagli autori nell'analisi a priori.

Attraverso il coinvolgimento di alcuni operatori del settore, è stata infine condotta un'indagine sulla strumentazione installata a piè di stabile di alcune reti di teleriscaldamento esistenti; la mappatura ha consentito di valutare le caratteristiche dei misuratori installati in termini di tecnologie e modalità di acquisizione dati. Da tale analisi emerge che i misuratori di energia installati non sono generalmente interfacciabili con i ripartitori di calore condominiali e non consentono attualmente un bilancio della rete in tempo reale.Le maggiori criticità riscontrate sono: i) l'utilizzo dello strumento al di fuori della propria rangeability; ii) l'assenza di un protocollo condiviso tra i diversi operatori sulle modalità di installazione; iii) la presenza di un cospicuo numero di strumenti installati non MID non soggetto alle stringenti regole di verifica della metrologia legale.

Tabella 103. Incertezza stimate mediante analisi metrologica teorica (analisi a priori)

	Incertezza estesa		
	tipica	*min*	*max*
Contatori di energia termica	4,4%	2,9%	8,9%
Ripartitori di calore elettronici*	9,2%	3,5%	40,5%
Contatori dei tempi di inserzione compensati della temperatura di mandata del fluido*	13,4%	5,8%	87,8%
Contatori dei tempi di inserzione compensati dei gradi-giorno*	21,6%	14,4%	30,7%

** sul singolo corpo scaldante*

Progettazione di un laboratorio per la riproduzione in scala di una rete di teleriscaldamento Pro.Re.Te

Allo scopo di verificare il comportamento di una rete di teleriscaldamento al variare dei principali parametri di esercizio della rete e delle condizioni climatiche esterne, l'ENEA intende progettare e realizzare un sistema di

teleriscaldamento in scala, completamente strumentato e potenzialmente operante in differenti configurazioni:

a) utenze passive e attive (utenti prosumers);
b) fornitura diretta e indiretta;
c) diversi livelli termici del fluido termovettore (i.e. acqua calda, acqua surriscaldata);
d) rete ramificata, ad anello e magliata.

L'impianto potrà consentire, inoltre, sia di validare modelli e codici di simulazione delle reti, che di verificare sperimentalmente prototipi di dispositivi innovativi come smart meter, sistemi di accumulo, ecc.

Obiettivo del presente lavoro è la progettazione di massima di un prototipo di rete di teleriscaldamento (Pro.Re.Te.) in grado di replicare su opportuna scala le reali condizioni di lavoro delle grandezze fisiche identificate dei parametri di esercizio e che consenta di caratterizzare reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento nelle tipiche configurazioni disponibili. Il sistema progettato è costituito da:

- un sistema di generazione;
- una torre evaporativa (o in alternativa dei dry cooler dedicati);
- una rete riconfigurabile (i.e. magliata, ad anello e ramificata);
- almeno n. 12 elementi di accumulo concentrati per consentire di simulare la capacità termica della rete e quindi il comportamento in assetto dinamico;
- n.12 sottostazioni di fornitura (costituite da sistemi di misura dell'energia termica in ingresso in configurazione passiva ed uscita in configurazione attiva);
- n. 12 utenze simulate (costituite da scambiatori di calore controllati da un sistema per la modellazione delle utenze); il prototipo è stato infatti progettato in modo da simulare i diversi profili di carico (caratteristici dell'utenza che si vuole studiare) e le diverse tipologie di utenze attive in modalità passiva o attiva;
- un sistema di controllo, monitoraggio e interfaccia utente dell'impianto Pro.Re.Te.

Progettazione di un sistema di contabilizzazione dell'energia termica diretta ed indiretta in una rete di riscaldamento condominiale

Il sistema sperimentale per la contabilizzazione dell'energia termica diretta ed indiretta in una rete di riscaldamento condominiale è stato ideato e progettato con l'obiettivo di verificare e confrontare in campo le diverse metodologie di misura e contabilizzazione del calore ad oggi disponibili. Sono stati messi a confronto:

- i sistemi di contabilizzazione diretta (HM);
- i ripartitori di calore (HCA);
- i sistemi di contabilizzazione del calore (totalizzatori) basati sui tempi di inserzione compensati dalla temperatura media del fluido termovettore (ITC-TC);
- i sistemi di contabilizzazione del calore (totalizzatori) basati sui tempi di inserzione compensati dai gradi giorno effettivi dell'unità immobiliare (ITC-DDC).

Per verificare le prestazioni metrologiche nelle effettive condizioni di utilizzo in ambito residenziale, è stato scelto un edificio campione con caratteristiche idonee all'installazione di tutte le tipologie di contabilizzazione. L'edificio scelto risulta edificato agli inizi degli anni 50 ed è situato nel territorio del Lazio meridionale nel centro urbano di Cassino (FR). Esso è composto complessivamente da 4 piani, uno dei quali adibito a servizi e tre ad uso residenziale (suddiviso in 6 unità immobiliari) serviti da impianti autonomi con distribuzione orizzontale. La scelta di un impianto con distribuzione orizzontale (sebbene costituito da generatori di calore autonomi) è stata fondamentale per consentire anche l'installazione di sistemi di contabilizzazione diretta. Successivamente all'acquisizione della disponibilità da parte di tutti i proprietari ed occupanti dell'edificio è stato stilato un protocollo di sperimentazione per l'installazione, la gestione e la dismissione dei sistemi di contabilizzazione. La campagna sperimentale prevede nella fase iniziale solo le sei unità immobiliari con destinazione d'uso residenziale.

Ciascun unità immobiliare (Figura 353) è dotata di:

- un contatore diretto, HM, con sensore di flusso a turbina e due termometri a resistenza al platino conformi alla MID con interfaccia per la trasmissione dati remota;
- un sistema di ripartizione indiretta con HCA prevede l'installazione di un dispositivo su ogni radiatore e di un sistema centrale di acquisizione dati. Gli HCA utilizzati nella sperimentazione sono del tipo a due sensori (i.e. un sensore per la misura della temperatura superficiale del radiatore ed una per la temperatura dell'aria) e sono approvati secondo lo standard Europeo EN834:2013. Sono inoltre dotati di una interfaccia di trasmissione wireless ed una centralina di acquisizione, memorizzazione e trasmissione dati;
- un sistema di contabilizzazione indiretta con ITC consente anche la termoregolazione indipendente di ogni unità abitativa nonché di ogni zona termica. Il sistema installato è composto da: un termostato per ogni zona; valvole on-off su ogni radiatore; sensore di temperatura esterno; sensore di temperatura del fluido

termovettore installato sulla tubazione di mandata del generatore; un'unità di calcolo centrale. La comunicazione tra i vari elementi del sistema è garantita da interfacce di comunicazione wireless M-Bus

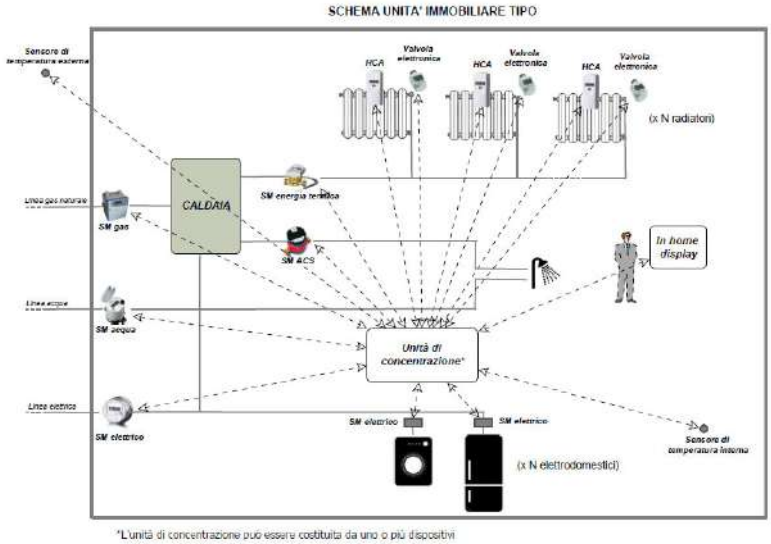


Figura 353. Configurazione del sistema completo per appartamento tipo

L'installazione e la programmazione dei dispositivi è stata effettuata secondo le indicazioni fornite dai costruttori e coerentemente alle norme di prodotto applicabili (EN 834:2013,UNI 11388:2015; UNI 9019: 2013). In particolare, la determinazione dei fattori di valutazione K_C e K_Q per gli HCA è stata effettuata rispettivamente sulla base dei dati forniti dal costruttore del dispositivo di misura e delle certificazioni fornite dai costruttori dei corpi scaldanti in conformità della norma EN 442: 2015 laddove disponibili (in alternativa i valori di potenza nominali sono stati determinati sulla base del metodo dimensionale in conformità alla norma UNI 10200: 2013.

Come noto, le prestazioni metrologiche dei diversi sistemi di contabilizzazione impiegati nella sperimentazione risultano molto diverse e ciascun sistema presenta specifiche criticità. Per tali motivi, l'incertezza di misura in particolari condizioni operative e/o impiantistiche può assumere valori molto elevati. L'incertezza, infatti, è una funzione complessa di numerosi parametri quali ad esempio:la differenza tra la temperatura di ingresso e uscita del fluido termovettore; la differenza di temperatura radiatore-ambiente; la portata del fluido termovettore; le condizioni di installazione dei dispositivi; v) la configurazione del sistema di riscaldamento.

E' opportuno inoltre evidenziare che l'incertezza di misura su di un singolo ripartitore non sempre corrisponde all'incertezza del sistema di ripartizione di un intero edificio. In tal caso è, infatti, necessario tenere conto degli eventuali effetti correlativi tra i ripartitori/totalizzatori in quanto alcuni errori sistematici possono compensarsi quando l'istallazione di questi dispositivi viene effettuata su corpi scaldanti simili tra loro ed operanti nelle medesime condizioni all'interno dell'intero edificio.

A tale scopo è previsto nella fase di sperimentazione: la messa a punto di un modello per la stima degli effetti di correlazione nella misura indiretta; la progettazione degli esperimenti in differenti condizioni di utilizzo dell'impianto; la raccolta e l'analisi dei dati in almeno due stagioni di riscaldamento; la validazione del modello di stima dell'incertezza nella ripartizione del calore; la definizione di una linea guida per la progettazione, installazione e programmazione dei sistemi di misura indiretti.

Analisi dei risultati

Dai risultati ottenuti nella presente ricerca è possibile evincere che: i) gli strumenti di misura diretti utilizzati nella contabilizzazione dell'energia termica nelle reti di riscaldamento presentano incertezze adeguate alle necessità se l'utilizzo dello strumento è conforme ai limiti caratteristici del misuratore. In particolare, il funzionamento a ridotte differenze di temperatura o a portate inferiori a quella permanente compromettono sensibilmente le prestazioni metrologiche. Altri aspetti quali l'impossibilità di utilizzare contatori bidirezionali, di installare in modo opportuno il misuratore e di valutare la qualità dell'energia termica fornita aprono ampi spazi di miglioramento della tecnologia di misura e della normativa ad essa connessa; ii) i sistemi indiretti di ripartizione, sebbene già diffusi in alcuni paesi europei (soprattutto i ripartitori di calore HCA) non risultano adeguatamente investigati dal punto di vista delle prestazioni metrologiche in campo. I ripartitori analizzati presentano infatti anch'essi

caratteristiche generalmente conformi alle normative europee, ma nelle effettive condizioni operative e di installazione possono presentare errori non facilmente prevedibili.Tali risultati sono stati il presupposto per la progettazione di un sistema prototipale per la simulazione in laboratorio delle reti di teleriscaldamento e un sistema per il confronto in campo delle tecniche di contabilizzazione indiretta.

Con i suddetti sistemi saranno possibili ulteriori sviluppi quali: i) l'esecuzione di prove in campo per il confronto dei sistemi di ripartizione in diverse condizioni operative ed impiantistiche nel settore residenziale; ii) l'integrazione con altri sistemi di misura (e.g. smart meter gas, elettrici, acqua) ai fini di una diagnosi energetica dell'edificio in tempo reale e l'implementazione di tecniche di fault detection and isolation; iii) L'analisi del risparmio energetico ottenibile con l'adozione di sistemi di contabilizzazione individuale dei consumi energetici, anche sulla base delle diverse modalità con cui viene informato l'utente finale (i.e. con in-home display in tempo reale, via internet non in tempo reale); iv) la validazione di modelli di funzionamento delle reti di teleriscaldamento, nonché la prova di diversi componenti e strumenti nei diversi assetti; v) la valutazione di indici di prestazione delle reti di teleriscaldamento e la sperimentazione di diverse strategie di conduzione e gestione.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/021.

Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Industriale

L'attività svolta si è concentrata sulla trasformazione di reti di teleriscaldamento esistenti in reti attive ovvero integrate con sistemi decentralizzati di produzione termica (da fonte rinnovabile o motori primi in assetto cogenerativo) e caratterizzate da sottostazioni presso le utenze in grado di scambiare bidirezionalmente energia termica.

Lo studio si è articolato in due fasi, nella prima è stato analizzato l'effetto dello scambio bidirezionale tra utenze e rete di teleriscaldamento per un caso reale e nella seconda, invece, è stata analizzata e riprogettata una sottostazione di scambio termico esistente, con l'obiettivo di trasformarla in una sottostazione attiva.

Per quanto riguarda la prima parte dello studio, si è proceduto ad individuare una rete di teleriscaldamento esistente, situata a Bologna nel comprensorio urbano denominato Corticella. Per tale rete sono state acquisite tutte le informazioni necessarie alla sua impostazione sia "geometrica" (geometria della rete, disposizione nodi, utenze, diametri delle condotte, spessori d'isolante, ecc.) che "energetica" (potenze termiche richieste dalle utenze e introdotte dai sistemi di generazione che alimentano la rete stessa, portate circolanti, temperature di immissione in rete e di ritorno in centrale, ecc.) all'interno del software IHENA 2.0 sviluppato dal Dipartimento stesso. Il modello di calcolo della rete oggetto dello studio è rappresentato in Figura 354. La scelta di tale rete di teleriscaldamento è stata fatta in ragione della sua non eccessiva estensione e della presenza di utenze allacciate di diversa tipologia (si tratta infatti sia di utenze residenziali che appartenenti al settore terziario). Inoltre, la rete di teleriscaldamento di Corticella è attualmente servita da una centrale costituita sia da sistemi di produzione tradizionali (ovvero delle caldaie) sia da un motore a combustione interna in assetto cogenerativo.

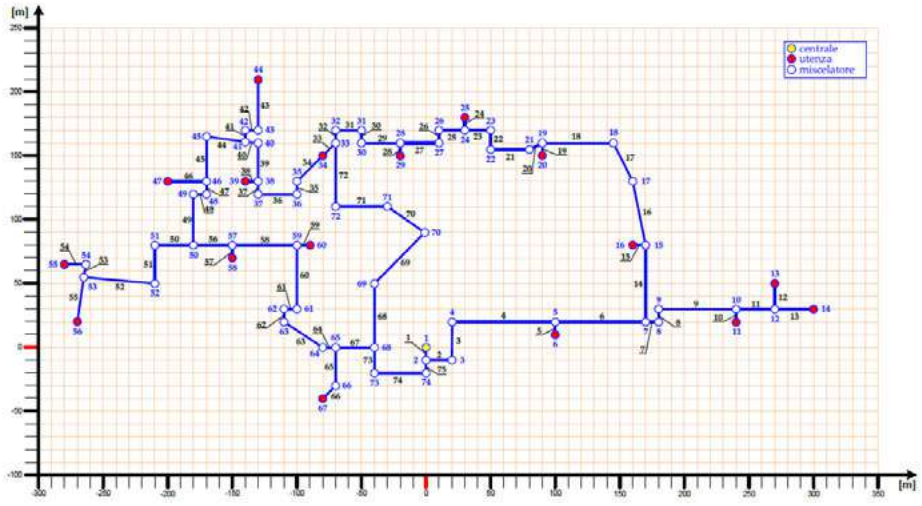


Figura 354. Implementazione della rete di teleriscaldamento di Corticella nel software IHENA 2.0

L'analisi condotta sulla rete può essere suddivisa in due macro-scenari, a seconda che siano considerate utenze

attive le utenze periferiche (rispetto alla centrale e/o ai due anelli della rete – Figura 355) o, viceversa, alcune utenze non periferiche. Per dato scenario, è stato valutato il comportamento della rete in assetto attivo, al variare dello schema di scambio termico bidirezionale.

L'analisi delle simulazioni ha permesso di mettere in luce sia aspetti positivi che diverse criticità. Il vantaggio più evidente è la possibilità di ridurre le spese di pompaggio: tale aspetto risulta di fondamentale importanza poiché si riduce l'energia elettrica assorbita, con un conseguente vantaggio sia per quanto riguarda le spese del gestore della rete che per l'alleggerimento del sistema elettrico nazionale (soprattutto nel caso in cui questa tipologia di reti trovi un'ampia diffusione). Come conseguenza ulteriore, inoltre, si potrebbero registrare eventuali risparmi per gli utenti finali. A seconda del tipo di schema attivo adottato, le simulazioni hanno mostrato per la rete di Corticella quanto segue:

- l'adozione di utenze attive che agiscono dal ritorno alla mandata consente una riduzione della potenza impiegata per il pompaggio fino ad un massimo del 45%;
- l'impiego di utenze attive secondo lo schema mandata su ritorno, consente una più modesta riduzione della potenza necessaria al pompaggio solo nel caso di regolazione a delta di temperatura costante e per temperature esterne inferiori a quella di riferimento (-5°C). Nel caso di temperature maggiori si assiste ad un aumento della spesa per pompaggio. Va comunque rilevato che la regolazione con portata costante, consente l'adozione dello schema mandata su ritorno senza alterare la potenza di pompaggio;
- la rete con utenze attive che si interfacciano esclusivamente con la mandata o con il ritorno mostra riduzioni della potenza necessaria per il pompaggio quantificabili in un valore massimo pari al 17%.

È importante considerare che la riduzione della potenza necessaria al pompaggio, non si traduce soltanto in una riduzione dei consumi di energia elettrica (si veda il punto successivo) e quindi dei costi annui da sostenere, ma può rappresentare anche una riduzione della potenza elettrica contrattuale impegnata ovvero dei costi fissi annui da sostenere da parte del gestore della centrale.

È stata inoltre condotta un'analisi energetica semplificata, finalizzata a quantificare la riduzione dell'energia elettrica totale spesa per il pompaggio in un intero anno di funzionamento della rete di Corticella. I risultati emersi, hanno evidenziato, rispetto al funzionamento sempre passivo della rete, quanto segue:

- l'adozione di utenze attive che agiscono dal ritorno alla mandata consente, a parità di strategia di regolazione, le maggiori riduzioni di energia elettrica spesa per il pompaggio che possono essere quantificate in un valore pari ad oltre il 30% (regolazione a portata costante) o di poco inferiore al 40% (regolazione a delta di temperatura costante);
- lo schema di utenza attiva tra mandata e ritorno quando la regolazione è fatta a portata costante, non modifica le spese di pompaggio, mentre le aumenta notevolmente nel caso di regolazione a delta di temperatura costante;
- la rete con utenze attive che si interfacciano esclusivamente con la mandata o solo con il ritorno ha fatto osservare riduzioni delle spese di pompaggio simili quantificabili in oltre il 10% e in circa il 15% rispettivamente nel caso di regolazione a portata costante e a delta di temperatura costante.

I risultati ottenuti si basano sull'ipotesi che la rete di teleriscaldamento funzioni in assetto passivo durante l'anno termico (dal 15 ottobre al 15 aprile per la città di Bologna) e in assetto attivo per i restanti giorni. Le simulazioni sono state effettuate su base oraria per un totale di 8760 ore.

Tutte le ipotesi di trasformazione della rete analizzate hanno consentito una riduzione della potenza termica prodotta in centrale. Tale riduzione, che consente anche lo spegnimento dei sistemi di produzione in centrale per temperature esterne quasi sempre pari o superiori ai 20 °C, può avere un impatto economico e un effetto di miglioramento delle efficienze di conversione e riduzione dell'impatto ambientale, a seconda del tipo di sistema di produzione installato nell'utenza attiva. Da questo punto di vista, le temperature a cui è gestita la rete consentirebbero l'impiego di micro-cogeneratori (microturbine e/o motori a combustione interna) e/o pannelli solari sottovuoto. Va inoltre sottolineato che lo spegnimento dei sistemi di produzione in centrale non necessariamente implica lo spegnimento del gruppo di pompaggio. Le simulazioni svolte hanno mostrato che l'adozione di utenze attive tra il ritorno e la mandata è l'unico caso che consente la completa esclusione della centrale sia dal punto di vista termico che del pompaggio, in quanto la pressione di rete è mantenuta dalle utenze attive stesse. In tutti gli altri casi invece, la centrale di produzione, pur non intervenendo più nella produzione termica, mantiene attivo il gruppo di pompaggio. I periodi di spegnimento della centrale – plausibilmente concentrati nei periodi primaverili e/o estivi – possono essere impiegati per le operazioni di manutenzione ordinaria.

L'analisi energetica semplificata ha permesso di valutare anche l'energia termica che la centrale deve immettere in rete in un anno di operatività. I risultati ottenuti hanno mostrato che dal punto di vista termico non sono

apprezzabili grandi variazioni, a parità di schema di scambio termico, variando la strategia di regolazione della rete. Ovviamente, nel passaggio da una rete passiva ad una rete attiva la produzione centralizzata decresce, grazie all'immissione in rete di energia da parte delle utenze attive. Nell'ipotesi che i sistemi di produzione presso tali utenze siano da fonte rinnovabile, questo comporta ovviamente una riduzione dei consumi di energia primaria di tipo fossile.

Per quanto riguarda le criticità dovute alla conversione della rete in analisi da passiva ad attiva, si osserva quanto segue:

- L'adozione di utenze attive che agiscono dal ritorno alla mandata comporta il riassetto idraulico della rete. Tale fenomeno genera l'inversione del flusso in più rami, in maniera variabile a seconda del valore della temperatura esterna, rendendo estremamente delicata e complessa la gestione della rete. Come facilmente comprensibile, quindi, l'immissione in rete di potenza termica da parte delle utenze deve necessariamente essere regolamentata – se non direttamente controllata – dal gestore stesso della rete.
- In ogni caso, sempre con riferimento ad utenze che agiscono dal ritorno alla mandata, le simulazioni svolte non hanno messo in luce particolari interferenze tra le tre utenze considerate contemporaneamente attive, sotto il punto di vista strettamente termico. Va comunque compreso che le tre utenze, funzionando di fatto come delle centrali, devono mettersi in equilibrio idraulico tra loro e con tutto il resto della rete; questo aspetto, oltre che ribadire il fatto che le utenze attive debbano essere direttamente controllate dal gestore della rete, può ovviamente alterare la potenza termica che ogni utenza può immettere in rete.
- Il caso di utenze attive che agiscono dalla mandata al ritorno non pone i problemi di equilibrio idraulico visti nei punti precedenti. In questo caso, poiché le utenze attive scelte non si influenzano tra loro, l'unica criticità possibile è legata alla temperatura a cui possono portare l'acqua nel percorso di ritorno e quindi in centrale. Infatti, nel caso in cui la centrale abbia come sistemi di produzione in funzione solo le caldaie, un aumento della temperatura di ritorno comporta esclusivamente un abbassamento del carico delle caldaie. Nel caso invece in cui sia in funzione il cogeneratore, variare la temperatura di ritorno potrebbe causare un peggioramento del recupero termico dal motore a combustione interna.
- Utenze attive che agiscono esclusivamente sulla mandata possono porre al gestore della rete – anche se in misura minore – gli stessi problemi evidenziati al punto precedente. Infatti l'incremento della temperatura sulla mandata della rete si propaga anche sul ramo di ritorno.
- Dal punto di vista dell'interazione tra utenze, soprattutto se consecutive nel tracciato della rete, le criticità sono sicuramente maggiori. Infatti, l'incremento della temperatura di mandata da parte di un'utenza a monte può limitare o annullare la possibilità di immettere potenza termica per un'utenza a valle.
- Utenze attive che agiscono esclusivamente sul ritorno portano alla luce le stesse criticità osservate al punto precedente, sia per quanto riguarda il gestore della rete che per l'interazione tra più utenze attive. Unica differenza con l'azione attiva esclusivamente sulla mandata è la possibilità di avere temperature mediamente maggiori sul percorso di ritorno.

Come ulteriore osservazione, si pone all'attenzione che tutte le ipotesi di rete attiva elaborate hanno portato ad una lieve riduzione dell'efficienza di distribuzione, ovvero ad un incremento della potenza termica dissipata dalla rete. Tale comportamento è dovuto sia alla riduzione delle velocità di attraversamento dei rami della rete che all'incremento di temperatura che le utenze attive mediamente provocano.

Nella seconda parte dello studio è stata analizzata, come detto, una sottostazione di scambio termico esistente al fine di valutare la possibilità di conversione della stessa in sottostazione attiva. La sottostazione in oggetto è inserita all'interno di una rete di teleriscaldamento gestita dalla Cogeme S.p.a. e situata nella località di Castegnato (BS). Tale sottostazione è preposta al soddisfacimento dei fabbisogni di acqua calda sanitaria e di calore per il riscaldamento invernale di una scuola materna. È stata effettuata una campagna di monitoraggio e acquisizione dei consumi, con l'ausilio di strumentazione di proprietà ENEA appositamente installata presso la sottostazione, che ha permesso di valutare l'andamento temporale del fabbisogno richiesto da parte dell'utenza in esame e ha costituito il punto di partenza per la riprogettazione della sottostazione nell'ottica di rendere possibile lo scambio bidirezionale di energia termica. Il periodo di monitoraggio è stato fatto dal 13 febbraio fino al 10 luglio 2015, misurando – tra le altre grandezze fisiche d'interesse – la portata in massa circolante nel circuito primario dello scambiatore di calore e la temperatura in ingresso ed in uscita dallo scambiatore, considerando il circuito primario. Si riportano di seguito le due soluzione progettuali e i relativi costi presunti per convertire la sottostazione esistente in utenza attiva.

La prima soluzione (Figura 355) ha come obiettivo quello di rendere minime le modifiche alla sottostazione esistente. Per questo motivo, si considera lo schema attivo (mandata-ritorno), in cui si preleva una portata dal circuito di mandata e la si immette (a temperatura maggiore) sul circuito di ritorno. In questa prima soluzione, inoltre, si considera un sistema di generazione distribuita costituito da pannelli solari termici sottovuoto. Nell'ottica di apportare le minime modifiche e considerando che la potenza di picco ottenuta per il solare è uguale alla potenza nominale dello scambiatore esistente, non si rende necessaria l'aggiunta di alcuno scambiatore di calore. Il sistema di generazione distribuita si interfaccerà quindi con il circuito secondario dello scambiatore di calore, sul ramo di ritorno dall'utenza, tramite un serbatoio di accumulo. Di conseguenza, lo scambio termico avverrà sempre tramite lo scambiatore di calore esistente: (i) nella direzione che va dalla rete all'utenza qualora il sistema di generazione distribuita non sia in grado di soddisfare completamente il fabbisogno dell'utenza, (ii) nella direzione che va dall'utenza alla rete di teleriscaldamento qualora il sistema di generazione distribuita produca in eccesso rispetto al fabbisogno. In questo ultimo caso è ovviamente presente l'ulteriore vincolo sulla temperatura alla quale è disponibile l'energia termica prodotta dal sistema: tale temperatura dovrà essere superiore alla temperatura sulla mandata della rete di teleriscaldamento, affinché la cessione di calore alla rete stessa possa avvenire.

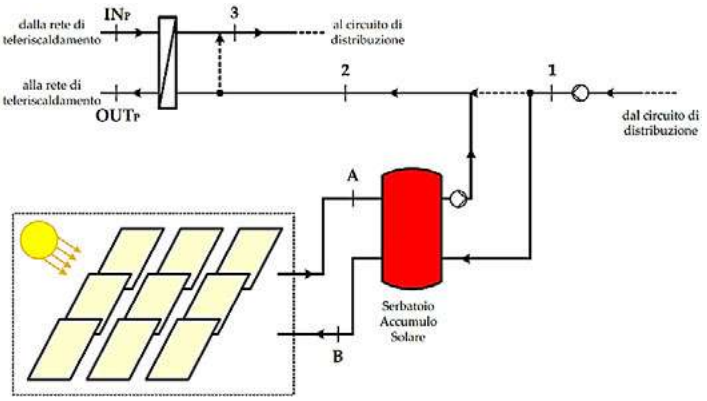


Figura 355. Schema della sottostazione attiva con pannelli solari termici

La riprogettazione preliminare condotta su questa ipotesi ha consentito di determinare, tra le altre cose:

- la potenza termica massima da installare in pannelli solari termici del tipo sottovuoto oltre che il numero ed il modello commerciale degli stessi;
- tipologia, volume e modello commerciale del serbatoio di accumulo;
- piping di connessione tra circuito secondario, serbatoio di accumulo e sistema di produzione termica decentralizzato;
- tipologia, numero e caratteristiche principali della strumentazione di misura necessaria.

È stata definita la logica di funzionamento (Figura) della prima ipotesi di trasformazione della sottostazione in attiva. La logica sviluppata – testata mediante un modello di calcolo sviluppato ad hoc – ha come obiettivo quello di mantenere costanti le temperature nelle sezioni in 1 e 3 (rispettivamente monte e valle dell'utenza), variando la portata prelevata dal serbatoio, e di garantire in prima battuta l'impiego della fonte solare per soddisfare il fabbisogno dell'utenza.

La seconda soluzione analizzata (Figura 356) prevede l'integrazione dello schema attivo (ritorno-mandata) con un micro-cogeneratore. Tale configurazione presenta il vantaggio di permettere l'immissione di energia termica in rete anche senza alterare la temperatura della direttrice di mandata; ovviamente risulteranno però alterate le portate circolanti e pertanto anche in questo caso si rendono necessari degli interventi da parte della centrale. Questa soluzione prevede l'installazione presso l'utenza di un micro-cogeneratore.

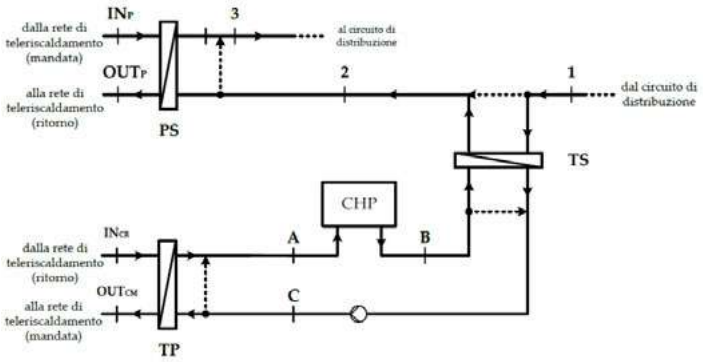


Figura 356. Schema della sottostazione attiva con micro-cogeneratore

La riprogettazione preliminare condotta su questa ipotesi ha consentito di determinare, tra le altre cose:

- il modello commerciale di micro-cogeneratore da integrare nella sottostazione di scambio termico;
- il piping del circuito in cui è inserito il cogeneratore;
- il piping di allacciamento con la rete di teleriscaldamento al fine di consentire lo scambio attivo con la stessa;
- il piping di connessione tra circuito secondario e sistema di produzione termica decentralizzato;
- tipologia e caratteristiche degli scambiatori di calore aggiuntivi tra circuito terziario e secondario e tra circuito terziario e primario;
- tipologia, numero e caratteristiche principali della strumentazione di misura necessaria.

Anche in questo caso è stata definita la logica di funzionamento della sottostazione attiva che si basa sull'assumere costanti la portata del circuito secondario e la temperatura a cui questa è inviata all'utenza (T_3); la temperatura T_1 (misurata) è utilizzata per monitorare il fabbisogno dell'utenza. Anche le temperature A e B del circuito terziario vengono assunte costanti al fine di massimizzare l'efficienza di recupero del CHP.

Risultato finale, nonché obiettivo ultimo della seconda parte dello studio, è stato la determinazione dei P&I delle due ipotesi di sottostazione attiva elaborate. Per i casi in esame, è stato determinato inoltre il costo di massima necessario per convertire la sottostazione attuale in attiva. I valori determinati sono pari a 310˙000 € e 180˙000 € rispettivamente per l'ipotesi con solare termico e con CHP (comprensivi di sistema di generazione locale).

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/019.

Università DI Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici

Il presente studio si focalizza sull'analisi di fattibilità per la realizzazione di reti di teleriscaldamento e/o teleraffrescamento nelle isole minori italiane non collegate alla rete elettrica nazionale. Si tratta in particolare delle isole di: Lampedusa, Linosa, Favignana, Levanzo, Marettimo, Pantelleria, Ustica, Lipari, Ponza, Giglio, Capri e Isole Tremiti (San Domino). L'idea di base è di verificare se è possibile sfruttare il calore di "scarto" delle centrali elettriche presenti in ciascuna isola per poter servire le utenze presenti nel territorio e prefigurare maggiori economie nel processo di generazione elettrica, oggi realizzato in condizioni sfavorite e necessitante quindi di incentivazione statale (UC4). Si è quindi analizzata la consistenza e la distribuzione spaziale e temporale dei fabbisogni termici mensile di ciascuna isola distinguendo le utenze residenziali dalle utenze puntuali come alberghi o scuole e mettendo inoltre in evidenza caso per caso richieste termiche provenienti da utenze singolari come aeroporti (Pantelleria e Lampedusa) e la struttura penitenziaria presente nell'Isola di Favignana.

A seconda della loro distribuzione all'interno del territorio e della loro posizione rispetto alla centrale (di cui si sono rilevate le caratteristiche tecniche e le potenzialità di upgrade), nonché all'analisi del tessuto urbano e dell'orografia dei luoghi svolto secondo un approccio metodologico di tipo GIS, in ciascuna isola sono stati identificati potenziali bacini di utenza costituiti da singole grandi utenze a carattere puntuale e/o da cluster di utenze significative. Noti quindi per ciascuna isola, i fabbisogni termici e frigoriferi mensili delle diverse tipologie di utenze, le caratteristiche di produzione delle centrali termoelettriche, la distribuzione delle utenze in relazione alla posizione delle stesse centrali e l'andamento altimetrico dei rami principali della rete, si è avviato lo studio di fattibilità di soluzioni impiantistiche per il recupero dei cascami termici dalle centrali elettriche e la distribuzione di tale calore alle utenze tramite reti di teleriscaldamento e/o teleraffrescamento. L'acquisizione dei dati "di targa" da parte dei gestori degli impianti è andata a buon fine per 9 isole su 12. Nei casi di mancata comunicazione si è proceduto a stimare le caratteristiche per analogia. È intuitivo come, per le tipologia di comunità isolane esaminate, la principale difficoltà consista nella modesta densità di carico derivante dalla ridotta densità abitativa e dalla forte stagionalità delle presenze. In tal senso era lecito attendersi che un contributo significativo alla fattibilità delle ipotesi progettuali di teleriscaldamento/teleraffrescamento potesse essere legato ai fabbisogni delle grosse utenze, in particolare alberghi e scuole (oltre ad utenze particolari quali, ad esempio, la casa circondariale presente a Favignana), in virtù sia dei maggiori consumi connessi al notevole tasso di occupazione in alcuni periodi (stagione turistica, anno scolastico, ecc.) sia del fatto che tali utenze presentano in genere impianti di tipo centralizzato, e richiederebbero quindi costi limitati per la connessione ad una rete di distribuzione del calore. Tuttavia, a causa del modesto numero di "grosse utenze" presenti in diverse delle isole esaminate, si è reso necessario considerare anche la possibilità di realizzare una rete "ad elevata ramificazione", ossia orientata a distribuire i vettori termici caldo/freddo capillarmente nelle aree a più elevata densità abitativa, così da consentire la connessione alla rete di singole abitazioni.

Metodo

Al fine dell'identificazione del potenziale bacino di utenze (puntuali e cluster) e dello studio dell'orografia dell'area

oggetto di studio si è proceduto, attraverso metodologia GIS, all'elaborazione e alla restituzione su mappa dei siti d'interesse. In particolare, mediante estrapolazione dei "tematismi" dai dati di base (Carta Tecnica Regionale - CTR, Limiti Amministrativi ISTAT, Modello Digitale di Elevazione - DEM, etc.), creazione di un database geografico (omogeneizzazione e georeferenziazione dei dati di base provenienti da fonti diverse), analisi ed elaborazioni spaziali, si è potuto implementare un sistema di gestione dedicato SIT (Sistema Informativo Territoriale) definito da strati informativi tematici.

Adottando quindi alcuni strumenti analitici basati sulla densità lineare di carico (per metro di rete) ed in genere utilizzati, in sede di studio di fattibilità di reti di teleriscaldamento urbano, per la definizione dei limiti periferici delle reti stesse, è stato possibile identificare per ciascuna isola una morfologia di massima delle dorsali principali della rete e delle eventuali ramificazioni più capillari. È risultato evidentemente poco conveniente servire singole utenze a grande distanza dalla centrale e da altri utilizzatori, e ci si è orientati a configurare una rete che servisse solo le aree in cui la densità di fabbisogno termico o frigorifero si presenta più elevata (in genere in prossimità del centro abitato). Si è quindi proceduto, per ciascuna isola, ad una stima di massima dei fabbisogni e alla progettazione di massima delle reti, basate sul calcolo dei diametri di ogni ramo o dorsale in relazione al carico di punta dell'area servita. Si è altresì identificata la capacità di recupero termico da installare, definendo un dimensionamento di massima per gli scambiatori a fascio tubiero ed a piastre necessari al recupero termico dai motori.

Il fabbisogno termico (climatizzazione e ACS) delle isole è stato in prima istanza valutato a partire da una caratterizzazione delle utenze basata sui metri quadri di edificato per le residenze e sul numero dei posti letto per le strutture ricettive, ai quali rapportare dei valori di richiesta termica specifica. Per quanto riguarda la prima tipologia di utenze, quelle residenziali, si è quindi identificato isola per isola un appartamento-tipo basandosi sui dati del "Censimento della Popolazione e delle Abitazione-2001"; mentre dall'analisi del tessuto urbano si sono identificati due tipologie di aggregazione a livello di isolato (schema in linea e schema a corte) oltre all'orientamento prevalente dei fabbricati. Le caratteristiche dell'involucro edilizio sono state infine dedotte dal Report del Comitato Termotecnico Italiano "Prestazioni energetiche degli edifici: climatizzazione invernale e preparazione acqua calda sanitaria per usi igienico-sanitari". A livello generale, è significativo e utile ai fini dello studio che la maggior parte delle abitazioni ricade all'interno dei centri, nella vicinanza dei quali spesso si trovano anche le centrali elettriche. Fanno eccezione le isole di Ustica, Pantelleria e Lampedusa dove si riscontra una certa percentuale di "case sparse" ossia di costruzioni disseminate nel territorio comunale a distanza tale tra loro da non poter costituire un nucleo abitato. Inoltre dall'analisi dei dati ISTAT si evince che la totalità delle abitazioni occupate è fornita di acqua calda sanitaria mentre gli impianti di riscaldamento propriamente intesi sono meno frequenti e là dove presenti sono autonomi e solo in pochi casi dotati di apparecchi fissi. In particolare possono distinguersi le isole Siciliane (tutte in zona climatica A o B) in cui solo il 25% delle abitazioni è dotato di un impianto di riscaldamento dalle altre Isole (zona climatica C-D) in cui tale percentuale sale al 79%.

Per ogni isola, sono state quindi eseguite delle simulazioni numeriche con il software Energy+ su degli edificio tipo che, così come rilevato dal censimento ISTAT, possono svilupparsi su uno, due e tre elevazioni fuori terra. Sommando di conseguenza i fabbisogni mensili per ciascuno appartamento sono stati valutati i fabbisogni termici per gli edifici a diverse elevazioni. Utilizzando i rilievi cartografici, questi ultimi valori successivamente sono stati mediati considerando il peso che gli edifici di diverse elevazioni hanno all'interno del tessuto urbano in ciascuna isola. Si sono così ottenuti i valori di consumo al metro quadro caratteristici dell'edificato delle varie isole attraverso i quali, nota la superficie residenziale, è stato possibile risalire al fabbisogno per ciascun bacino di utenze in ciascuna isola.

Per quanto riguarda le strutture puntuali, queste sono state identificate e localizzate a partire dagli elenchi ufficiali reperibili presso i siti istituzionali (camera di commercio, assessorati regionali al turismo, ecc.). Al fine di determinare il fabbisogno termico di queste utenze sono stati individuati nella letteratura scientifica dei valori specifici stagionali rappresentativi per le località in esame (in base al numero di posti letto per gli alberghi, in base alla volumetria per le scuole e in base al numero di utenti per la struttura penitenziaria). I dati relativi al fabbisogno degli aeroporti sono stati invece tratti dai risultati del rapporto POIN commissionato dall'ENAC. Per potere, infine, identificare un andamento mensile dei fabbisogni termici, si è fatto riferimento ai dati ufficiali sull'afflusso turistico al 2012 nelle regioni di pertinenza, pubblicati nel Report dell'Agenzia Regionale al Turismo della Puglia.

I risultati dell'analisi sui fabbisogni termici delle isole sono riportati Figura 357, distinguendo le utenze residenziali dalle grandi utenze che comprendono alberghi, scuole e utenze speciali (laddove presenti). Essendo il calcolo delle utenze residenziali e di quelle scolastiche basato sulle superfici delle stesse e di conseguenza sull'analisi cartografica, non è stato possibile stimare il fabbisogno nelle isole di Ponza e Capri per quali la cartografia di base non era reperibile nella risoluzione necessaria.

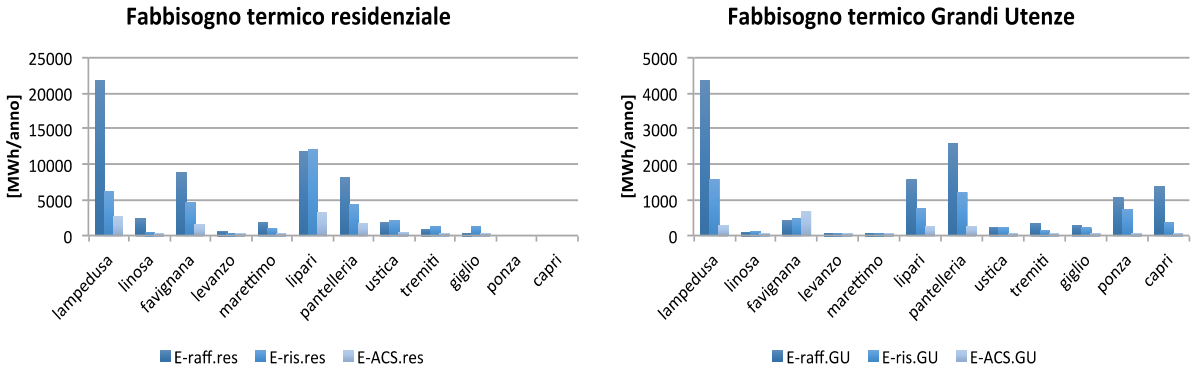


Figura 357. Fabbisogni termici annuali delle utenze in ciascuna isola

Per quanto riguarda nello specifico la progettazione della rete, è stato altresì necessario porre preliminarmente l'attenzione su alcuni punti critici:

1. l'eterogeneità dei dati relativi ai cicli giornalieri ed alle fluttuazioni stagionali delle condizioni di carico dei gruppi di generazione elettrica, unitamente alla difficoltà nel definire l'articolazione dei profili giornalieri di domanda termica e frigorifera, rendono poco agevole un approccio rigoroso volto a calcolare il grado di contemporaneità tra disponibilità di calore e relativi fabbisogni. Si è pertanto adottato un approccio approssimato, basato sull'assunzione di un ragionevole "fattore di copertura" del fabbisogno tramite recuperi termici da funzionamento dei motori. A tale fattore sono stati assegnati valori elevati, nell'ordine dell'80%, in virtù del fatto che la potenza termica mediamente recuperabile dal funzionamento dei motori è in genere superiore a quella media richiesta dal parco utenze;
2. appare necessario prevedere la possibilità che, nel caso di comunità isolane in cui i fabbisogni frigoriferi da parte di utenze alberghiere risultassero particolarmente significativi, tali fabbisogni possano essere parzialmente soddisfatti tramite frigoriferi ad assorbimento "a fiamma indiretta", installati in loco ed alimentati per mezzo di calore distribuito tramite la rete di teleriscaldamento. Pertanto, si sono considerate essenzialmente due macro-opzioni impiantistiche: distribuzione di acqua calda a temperatura nell'ordine di 85°C, per l'alimentazione di utenze esclusivamente termiche, quali riscaldamento ed acqua calda sanitaria; distribuzione di acqua surriscaldata a temperature nell'ordine di 110 °C, per l'alimentazione non solo di utenze termiche, ma anche di frigoriferi ad assorbimento per il soddisfacimento di fabbisogni frigoriferi;
3. i costi delle sottostazioni di connessione dell'utenza alla rete sono significativi, nell'ordine di alcune migliaia di euro (variabili a seconda della potenzialità della stazione). Mentre nelle reti asservite a distretti urbani che includono grossi edifici tali costi sono in genere sostenuti dal privato che avanza richiesta di connessione, in un tessuto abitativo costituito prevalentemente da edifici di modeste dimensioni ad uno o due livelli, è necessario considerare che se il privato dovesse sostenere i rilevanti costi di connessione (magari per un'abitazione utilizzata solo in un ristretto periodo dell'anno), sarà probabilmente portato a rinunciare alla fornitura, così contribuendo ad un'ulteriore riduzione della potenziale densità di carico termico servita dalla rete. Si è operata pertanto l'adozione di due distinti scenari, denominati "A" e "B", caratterizzati l'uno dall'assunzione di costi di connessione a carico dell'utente finale e l'altro dall'assunzione di costi a carico della società distributrice del calore; tali due scenari sono associati a densità di carico termico differenziate, in virtù del minor numero di utenze connesse che si può prevedere nel caso in cui gli oneri di connessione siano a carico degli utenti finali.

Sulla base delle considerazioni sopraesposte, si sono dapprima suddivise le superfici di interesse (identificate in virtù della loro maggiore densità abitativa o della presenza di utenze puntuali significative) in un conveniente numero di aree, e si è pervenuti all'identificazione di una morfologia di massima della rete di distribuzione del calore che consentisse di servire ciascuna di esse. Sulla base dei fabbisogni associati a ciascuna area si sono quindi calcolati, per ogni ramo della dorsale principale della rete di distribuzione, i picchi di potenza termica in transito ed il conseguente diametro ottimale della condotta, nonché una stima dell'energia termica in transito su base annua. A titolo di esempio si mostra in Figura 358 la suddivisione in aree e la morfologia della dorsale principale della rete di distribuzione ottenute per l'isola di Lampedusa.

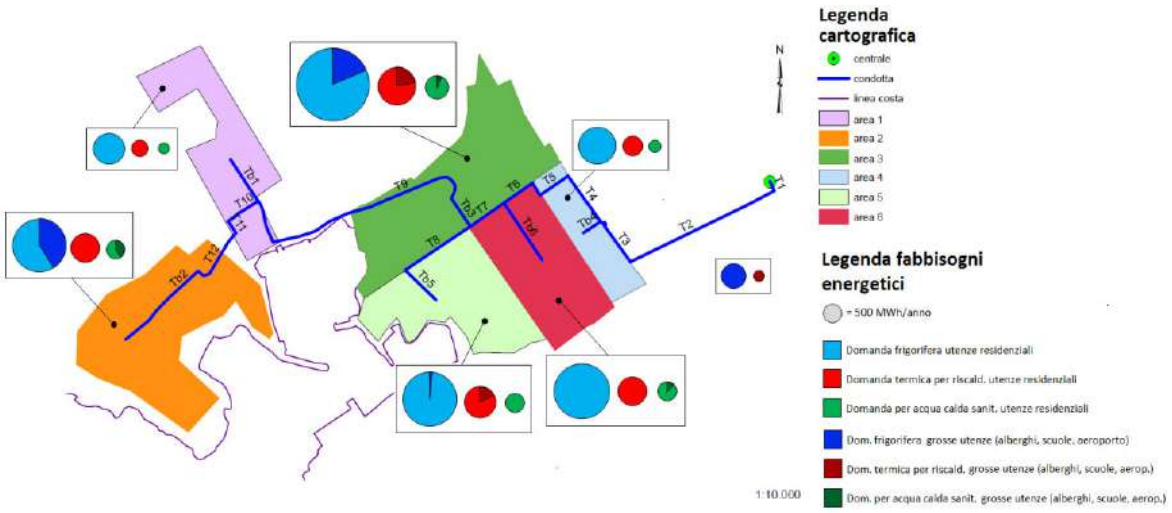


Figura 358. Rappresentazione delle aree identificate e della morfologia di massima della dorsale della rete di distribuzione adottate per l'isola di Lampedusa

L'ipotesi progettuale di massima risultante è stata quindi valutata, per ciascuna isola, dal punto di vista economico. Sulla base di *cost figures* di ragionevole validità per quanto concerne i costi delle tubazioni di distribuzione e degli elementi speciali di cui una rete di distribuzione necessita, nonché dei costi presumibili per l'acquisto e l'installazione dei componenti per il recupero termico, si è stimato un costo complessivo della componentistica. Effettuando altresì una stima dei costi relativi alla realizzazione delle opere civili ed alla posa delle tubazioni, è stato possibile pervenire ad un'indicazione di massima sul possibile costo di investimento. Per quanto concerne i ricavi connessi all'esercizio della rete, si sono assunti prezzi del kWh termico ceduto differenziati sulla base dell'utilizzazione del calore (riscaldamento o acqua calda sanitaria) e della tipologia di utenza (residenziale o commerciale), ed in linea con i valori mediamente adottati dagli operatori del settore sul territorio nazionale. È stato così possibile calcolare alcuni indicatori sintetici quali il Valore Attuale Netto dell'investimento, il relativo tempo di ritorno e l'indice di profitto.

Sebbene i risultati dell'indagine siano fortemente differenziati tra diverse le isole, è possibile provare a riassumerli sulla base di alcuni elementi comuni:

1. dal punto di vista del fabbisogno termico, è possibile distinguere le isole siciliane dalle restanti in termini di utilizzo finale dell'energia; i fabbisogni di consumo residenziali per il raffrescamento nelle isole siciliane si assestano mediamente intorno al 58% del totale, contro il 6% dell'Isola del Giglio; ben diverso è invece il potenziale di consumo delle strutture alberghiere che, dato il loro profilo di occupazione stagionale, non risente delle differenze climatiche e si assesta intorno al 58% per il raffrescamento, il 28% per il riscaldamento e il 15% per la produzione di ACS;
2. pressoché in tutte le isole esaminate la disponibilità di calore di recupero dai numerosi motori diesel installati presso le centrali elettriche è risultata largamente in esubero rispetto alla domanda termica di picco calcolata per la comunità, per cui si è assunto che solo una frazione dei motori stessi venga riconfigurata in assetto cogenerativo;
3. le densità di carico termico annuo per metro di rete sono risultate in genere comprese tra 0,2 e 0,8 GJ/(m×a), e quindi ben al di sotto della soglia di fattibilità stimata su valori nell'ordine di 2 GJ/(m×a). Ciò indica chiaramente una difficoltà nel conseguimento di condizioni di fattibilità economica delle ipotesi progettuali. Peraltro, l'ipotesi di distribuire il calore anche nel periodo estivo, per alimentare frigoriferi ad assorbimento e soddisfare le richieste di freddo da parte di utenze alberghiere, produce solo in un caso (i.e. Lampedusa) un significativo beneficio in termini di accresciuta densità di carico termico. Pertanto, mentre con riferimento all'isola di Lampedusa la soluzione identificata consiste nella distribuzione (a mezzo di rete con tubazioni in acciaio preisolato, con $p_{max\ ammissibile}$=25 bar) di acqua surriscaldata in pressione a 110 °C e la produzione in loco di freddo per le utenze alberghiere a mezzo di assorbitori a singolo effetto, per tutte le altre isole è risultata conveniente l'adozione di una rete "termicamente moderata" (temperatura di mandata nell'ordine di 85 °C, compatibile con la realizzazione della rete con tubazioni flessibili in polietilene reticolato, $T_{max\ ammissibile}$= 95 °C), per il soddisfacimento delle sole richieste di acqua calda sanitaria e riscaldamento ambientale;

4. al fine di garantire sufficiente affidabilità del servizio (rispetto a manutenzioni ordinarie e straordinarie) ed ampi margini di flessibilità nell'esercizio dei gruppi di generazione diesel (il cui funzionamento deve rimanere orientato al soddisfacimento prioritario della domanda elettrica isolana), si è prevista in logica di ridondanza l'installazione di sistemi di recupero ad alta ed a bassa temperatura su più motori di capacità differente;
5. la complessa orografia dei siti, rilevata tramite l'analisi dello sviluppo altimetrico della condotta lungo il suo ipotetico percorso dalle centrali elettriche ai punti di possibile utilizzazione del calore di recupero, ha suggerito, in alcuni casi, la sussistenza di ostacoli di natura tecnico/economica alla realizzazione della rete. E' questo ad esempio il caso dell'isola di Capri, in cui buona parte delle utenze è ubicata in un'area ad una certa distanza dalla centrale elettrica e sopraelevata di oltre 150 metri rispetto alla stessa, con versanti di possibile connessione caratterizzati da pendenze molto elevate.

La valutazione economica è stata condotta sulla base dell'assunzione di una vita utile attesa delle *facilities* pari a 30 anni. Ipotizzando la copertura dei costi interamente a carico del soggetto proprietario/gestore della rete, il Valore Attuale Netto dell'investimento risulta in genere negativo (tranne che per alcune isole quali Lampedusa ed, in parte, Ustica), il che conferma le previste difficoltà nel conseguimento di condizioni di fattibilità economica. Tuttavia, considerando che la realizzazione delle opere civili e la posa delle tubazioni rappresenta una frazione molto elevata dell'investimento complessivo, più ampi margini di fattibilità possono essere ottenuti nell'ipotesi in cui si riuscisse a coprire parte dei costi associati a tali attività tramite finanziamenti di natura pubblica nell'ambito di programmi finalizzati all'efficientamento energetico. Ulteriori margini di fattibilità potrebbero emergere dall'inclusione, tra i ricavi di esercizio, di eventuali proventi dalla proventi dalla vendita di Titoli di Efficienza Energetica o di CV-TLR (Certificati Verdi per gli impianti di cogenerazione abbinati al teleriscaldamento) che, al momento, non risultano computati nello studio di fattibilità.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/020.

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE)

Dai risultati delle analisi prestazionali condotte sulla piattaforma software (Matlab-Simulink) sviluppata da ENEA nel corso delle annualità precedenti, è emersa l'esigenza di cercare degli strumenti che approfondiscano il comportamento della rete energetica in funzione dei livelli termici dei fluidi termovettori impiegati, nonché delle perdite che si presentano durante la distribuzione del fluido termovettore stesso. Dagli studi effettuati da ENEA nel corso della scorsa annualità del Programma, è emerso che l'approccio energetico non è sufficiente a fornire un quadro completo del fenomeno. Per questo motivo si è cominciato a studiare le reti attraverso l'analisi exergetica. In particolare, l'attività svolta in precedenza da ENEA ha consentito di analizzare diverse configurazioni di reti con un approccio exergetico, allo scopo di valutare in dettaglio la qualità dei flussi energetici scambiati fra le varie componenti della rete e il livello ottimale con cui distribuire il fluido termovettore in funzione delle esigenze dell'utenza e delle caratteristiche climatiche.

In tale contesto, l'attività del Dipartimento DIAEE è stata quella di implementare nuove tipologie di indici prestazionali che prendono in esame anche i vantaggi relativi alla grandezza exergia e che prevedono l'utilizzo di fonti primarie alternative, quali le fonti rinnovabili. Inoltre si è estesa la complessità della rete di teleriscaldamento da analizzare, passando da una configurazione semplificata con 3 edifici ad un quartiere residenziale.

L'attività è stata sia di tipo teorico che numerico, eseguita con i codici Matlab-Simulink, analizzando un caso studio realistico, con il duplice scopo di verificare le potenzialità della piattaforma software utilizzata come strumento di pianificazione e di fornire, allo stesso tempo, informazioni sulle potenzialità delle reti energetiche di teleriscaldamento. Per quest'ultimo motivo è stato scelto un distretto residenziale con caratteristiche di replicabilità molto elevate, sul quale è stata eseguita una campagna di simulazioni, prevedendo la presenza sia di fonti primarie fossili sia di fonti rinnovabili.

Partendo dagli indici exergetici tradizionali, si è cercato di proporre degli indici più completi anche attraverso l'introduzione di grandezze energetiche classiche. Di seguito sono riportati gli indici teorizzati:

Indice di efficienza locale $\quad I_{e_loc} = \dfrac{\varepsilon_{componente}}{\varepsilon_{tot}}$

Questo indice definisce l'efficienza del singolo elemento sull'intero sistema, fornendo informazioni sullo stato del componente.

Indice di efficienza globale $\quad I_e = \dfrac{E_{RICHIESTA}}{E_{FORNITA} \cdot \varepsilon_{tot}}$

Questo indice fornisce l'efficienza globale, in base all'energia che entra nel sistema, e mostra in che modo il sistema stesso reagisce.

Indice di perdita locale $$I_{p_loc} = \frac{E_{LOSS} \cdot \varepsilon_{componente}}{E_{FORNITA}}$$

Questo indice fornisce le performance relativa del singolo componente della rete, comprese le perdite, permettendo di effettuare un confronto tra le perdite della rete per tutti i componenti.

Indice di perdita globale $$I_p = \frac{E_{LOSS}}{E_{FORNITA} \cdot \varepsilon_{tot}}$$

Questo indice fornisce le performance globale della rete, comprese le perdite, permettendo di effettuare un confronto tra diverse configurazioni di rete e stabilire quale sia la più performante.

La rete di teleriscaldamento presa in considerazione è relativa ad un quartiere di una città di medie dimensioni con caratteristiche climatiche coerenti con quelle che si riscontrano alle latitudini del nord Italia. Il quartiere preso in esame risulta essere prevalentemente residenziale. Non è stata però esclusa la presenza di altre tipologie di edifici che si possono trovare in un contesto del genere, e quindi sono state inseriti edifici ad uso commerciale ed edifici ad uso terziario.

Con questa topografia del quartiere scelto, vi era la possibilità di due configurazioni di rete: una di tipo a maglia e una di tipo ramificata.

La scelta di una o dell'altra configurazione è stata dettata da alcune considerazioni riguardanti i costi di installazione e la praticità di utilizzo. La configurazione a maglia permette l'allaccio di utenze future, risparmiando su i costi di scavo e posa delle tubazioni. Di contro il costo di gestione e manutenzione risulta notevolmente maggiore rispetto alla configurazione ramificata. Nella configurazione ramificata, tuttavia, si risparmia anche sul costo delle tubazioni. E' stato stimato un risparmio sulla lunghezza delle tubazioni pari a 1700 m. Inoltre i tempi di implementazione nel software e i tempi di calcolo, risultano inferiori in quest'ultima configurazione.

Il passo successivo è stato quello di semplificare la rete scelta. Blocchi di edifici di stessa tipologia sono stati considerati come un unico grande edificio. Si è prestata particolare attenzione ad unire edifici con caratteristiche similari.

In questa configurazione la rete (Figura 359) si compone di 11 edifici, 10 tratti di tubazioni principali, 10 tratti di tubazioni secondarie (questi sono i tratti che si diramano dalla rete principale fino agli edifici), da 2 nodi principali e 9 nodi secondari. La portata circolante è variabile nei singoli tratti in funzione delle velocità massime ammissibili.

In particolare sono state scelte le configurazioni in cui ad alimentare la rete fossero presenti alternativamente solo la caldaia, solo il campo solare, solo il CHP o il CHP in presenza del campo solare.

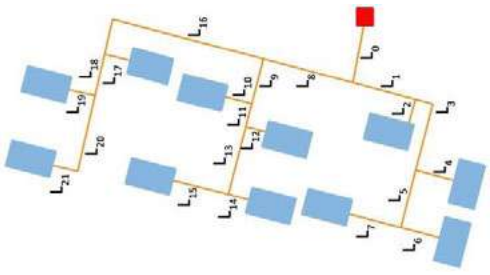


Figura 359. Schema rete semplificata

Le simulazioni, in tutte e 4 le configurazioni, sono state effettuate fissando una potenza pari a 7000 kW, tale da soddisfare le esigenze della rete. Dapprima si è cercato il volume d'accumulo ottimo della rete (VaccCE) per ogni configurazione e una volta trovato, si è poi variata la potenza di ±20%, tenendo fisso il VaccCE ottimo trovato. Nelle simulazioni del solo campo solare, la potenza per la rete era soddisfatta da un numero di pannelli paria 1400, mentre per l'accoppiamento CHP più solare la potenza è suddivisa in 700 pannelli per il campo solare e 3500 kW per il CHP.

Di seguito vengono mostrati i confronti tra le 4 configurazioni (Tabella 104, Figure 360) sia per l'indice di efficienza globale che per l'indice di perdita globale:

Tabella 104.Valori Indici di efficienza e perdita globali per le varie configurazioni

P [kW]		I_e	I_p		I_e	I_p		I_e	I_p		I_e	I_p
5600	**Caldaia**	0,0385	0,0269	**Solare**	0,0131	0,0064	**CHP**	0,0376	0,0254	**CHP + Solare**	0,0377	0,0257
7000		0,0383	0,0057		0,0196	0,0008		0,0374	0,0050		0,0373	0,0052
8400		0,0385	0,0096		0,0126	0,0012		0,0374	0,0051		0,0375	0,0052

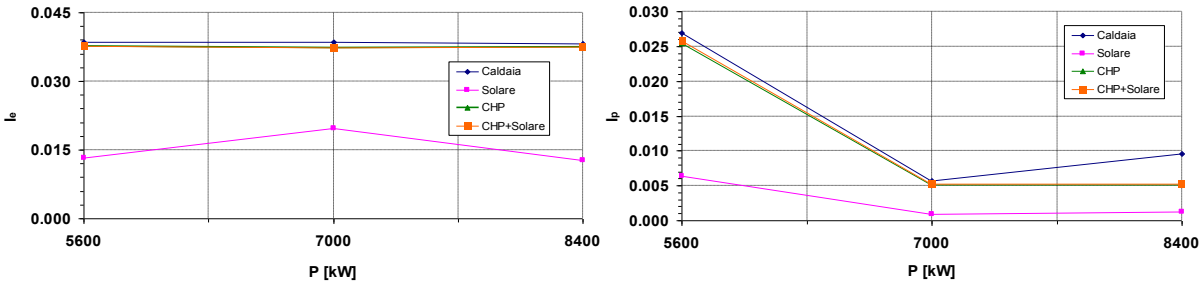


Figura 360. Confronti Indici di efficienza e di perdita globale per differenti configurazioni

Dal grafico dell'indice di efficienza globale si può evincere che la rete più efficiente è quella alimentata da caldaia. E' molto interessante osservare che le fonti tradizionali mostrano un andamento molto regolare; infatti l'andamento del caso CHP si mantiene abbastanza simile a quello della caldaia come anche il caso CHP+solare. Il caso con solo l'impianto solare ad alimentare la rete risulta essere il meno performante di tutti. Infatti l'instabilità della fonte solare non può che pesare negativamente sull'efficienza globale della rete. Di contro però, possiamo osservare come l'utilizzo di una fonte tradizionale accoppiata al solare, porti ad un aumento importante dell'efficienza, portando il valore dell'indice di efficienza globale a livello del caso con solo fonte tradizionale.

Il grafico dell'indice di perdita globale mette in evidenza sia le perdite della specifica configurazione utilizzata, sia l'inefficienza. Si può notare che il campo solare si mostra il sistema meno efficiente, ma anche quello con minori perdite; infatti la rete alimentata solo con solare è quella con le temperature mediamente più basse e, in alcuni periodi dell'anno, anche non sufficienti al corretto funzionamento della rete. Si può invece osservare come gli altri tre sistemi di alimentazione hanno un andamento molto simile tra loro. Raggiunta la potenza sufficiente al corretto funzionamento della rete, i sistemi di controllo implementati (anche nel caso di campo solare), non permettono l'aumento delle perdite, anche nel caso di un surplus di potenza (questo rende l'indice utile anche per valutare il corretto funzionamento di questi sistemi); nel caso della caldaia si osserva comunque un minimo aumento dell'indice di perdita all'aumentare della potenza dopo quella ottimale.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/018.

Seconda Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Seconda Università degli Studi di Napoli (SUN) riguardano lo sviluppo di metodologie di misura avanzate per reti di distribuzione asservite all'alimentazione di reti integrate di servizi per distretti energetici e la definizione delle specifiche dell'architettura di "concentratori dati intelligenti" che consentono l'interazione tra generazione e utilizzazione (prevedendo altresì accesso da remoto e la relativa pubblicazione dati).

La gestione delle misurazioni dei flussi di energia elettrica e dei parametri ad essi connessi risultano oggi di fondamentale importanza non più unicamente ai fini della tariffazione, ma anche per il coordinamento e la gestione integrata con l'obiettivo di ottenere una razionalizzazione dell'uso dell'energia ed una conseguente riduzione dei consumi, sia nelle attività industriali sia in quelle commerciali o domestiche.

L'attività si è estrinsecata attraverso:

- la progettazione di un prototipo di rete di misuratori per la gestione multi utility con funzionalità avanzate per la gestione dell'energia;
- la realizzazione e caratterizzazione del prototipo di rete di misuratori. L'attività è stata effettuata secondo diverse fasi che possono essere ricondotte a: studio ed individuazione di architetture e protocolli di comunicazione standard atti a consentire la intercambiabilità dei misuratori attraverso l'adozione di un front-end e di un meta-linguaggio di comunicazione; messa a punto di procedure di configurazione, calibrazione e diagnostica dei diversi misuratori;
- l'adozione di un uno strato software (layer) che fungesse da clearing-house per la generazione di un meta-dato, utilizzabile da un nodo di livello superiore;
- iindividuazione di "indici di prestazione" quali: accuratezza della misura, resilienza ad errori di comunicazione, tempo di latenza sulla comunicazione, sicurezza del dato, minimo intervallo di lettura, per la qualificazione di reti di misuratori;

- verifica delle prestazioni della rete sviluppata con caratterizzazione metrologica attraverso sperimentazione in laboratorio e sul campo.

L'attività svolta si inserisce a valle di una precedente fase di studio ed implementazione dei diversi dispositivi di misura. Più in particolare, in precedenza era stato sviluppato atopicamente un misuratore che non prevedeva la possibilità di integrare ed interagire con le diverse configurazioni topologiche necessarie (mancanza di una struttura gerarchica di controllo con diversi punti di sensing). Nel corso del presente contratto si è, invece, proceduto alla progettazione e realizzazione dell'intero sistema per il monitoraggio contemporaneo dei diversi *hot points* (che possono essere sia i carichi che i generatori) anche con l'individuazione e lo sviluppo di protocolli propri delle reti di calcolatori e la messa a disposizione di tali informazioni (attraverso un DB) agli utenti diversamente interessati a tali conteggi. Inoltre, un ulteriore azione ha riguardato la messa in sicurezza dell'intera catena di scambio di informazioni tra i diversi dispositivi presenti (studio ed implementazione di protocolli di scambio dati sicuri su ogni dispositivo e per ogni comunicazione). Infine, è stato effettuato un confronto prestazionale tra il dispositivo/sistema realizzato e alcuni dispositivi commerciali presenti ad oggi sul mercato. A riguardo sono stati monitorati i consumi energetici di tipo elettrico, oggetto di tariffazione di un complesso commerciale ubicato nel comune di Aversa (NA). Più precisamente è stato eseguito in maniera continuativa il monitoraggio dei suddetti consumi registrando ogni minuto gli assorbimenti medi in termini di potenza attiva e reattiva. Tutte le apparecchiature servite sono state impiegate nelle modalità e nei tempi consueti tipici della normale attività lavorativa. Allo scopo del confronto le misurazioni sono state effettuate in parallelo sia da un prototipo dello smart meter sviluppato ed implementato sia da un misuratore di tipo commerciale, ottenendo prestazioni soddisfacenti ed il linea con quelle attese.

Progettazione di un prototipo di rete di misuratori per la gestione multi-utility con funzionalità avanzate per la gestione dell'energia

Una rete di misuratori deve essere un sistema ampiamente scalabile di acquisizione dati, capace di analizzare diversi aspetti della rete elettrica (e non solo i consumi energetici), ma deve necessariamente elaborare i dati acquisiti in linea con la loro acquisizione (real time). Deve altresì prevedere una semplice ed intuitiva interfaccia utente per la visualizzazione dei dati e poter agire direttamente su di essi, se richiesto, così come implementare diverse periferiche di I/O che ne permettano la connettività per lo scambio di dati. La rete implementata ha una struttura ad albero gerarchico di tipo clusterizzata, prevedendo diversi livelli. In particolare per la rete realizzata ne sono stati previsti tre: i) il misuratore, ii) il concentratore di area ed iii) un concentratore generale. Tale struttura, (figura 361) risulta espandibile con l'inserimento di più dispositivi allo stesso livello, ovvero l'inserimento di più livelli con capacità elaborative man mano sempre più elevate salendo attraverso l'albero. La modularità e la scalabilità con la possibilità di interconnettere, a diversi livelli, i singoli nodi operativi consente, quindi, di essere applicata anche a reti molto estese.

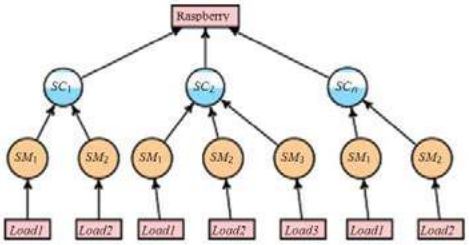


Figura 361. Smart Meters Network

Le funzionalità individuate sono quindi: misuratori di livello 0 (Smart Meter, SM) per effettuare le misure ed acquisire dati sulla rete elettrica, nodi aggregatore (Smart Concentrator, SC) di livello 1 in grado di recuperare le misure dei singoli Smart Meter afferenti alla propria sottorete e nodo Interfaccia di livello 2 (Micro Computer/Raspberry) in grado di fornire interfacciamento verso gli utenti finali. Considerando i diversi livelli operativi di ogni singolo dispositivo presente nella rete di misuratori (sistema gerarchico), è stato necessario individuare due tipi di protocolli che permettessero lo scambio di dati in modo efficiente ed efficace, ma che potessero allo stesso tempo rendere l'intero sistema aperto (interconnettere dispositivi di costruttori diversi). Obiettivo di questa fase è stato, dunque ,individuare i protocolli - necessariamente standard - che garantissero la trasmissione senza perdite (nello specifico con controllo di flusso e controllo di errore), ma che fossero in grado di non appesantire eccessivamente i dispositivi (che hanno come compito principale l'esecuzione delle misure). Dopo lo studio della letteratura di settore, sono stati scelti il protocollo CAN per le comunicazioni tra livello 0 e livello 1 ed il protocollo HTTP (basato su stack TCP/IP) tra livello 1 e livello 2. Il protocollo HTTP è stato, altresì, utilizzato anche per fornire l'accesso ai dati per l'utente finale (interfaccia web user friendly).

In fase di progettazione si è pensato ad implementare delle procedure che permettono una *Self-identificati*on e *Self-configuration* per i singoli dispositivi (*SM)* connessi alla rete attraverso gli *Smart Concentrators.* È, dunque, opportuno precisare che, a differenza dello standard CAN, il sistema sviluppato implementa due ulteriori distinte fasi di comunicazione tra i dispositivi: il *Devices Setting State (DSS)* e lo Measurement *Data Exchange State (MDES)*. Per mantenere l'intrinseca robustezza del protocollo ed essere allo stesso tempo in grado

di indirizzare correttamente tutti i dispositivi presenti nel sistema, il ruolo dello *SC* è, anche, quello di fornire indirizzi ai singoli *SM* che in fase di start-up ne fanno richiesta (*DSS*). L'indirizzamento è basato sul campo *identifier* (11 bit) presente nel protocollo CAN, cosicché è possibile connettere ad un singolo *SC* circa 2000 SM. Per quanto concerne il *MDES*, lo *SC* interroga ciclicamente (ad intervalli di 3 secondi) ogni smart meter attraverso un *Remote Frame Message* e aspetta la risposta prima di passare allo stato successivo (secondo una tabella di attivazione risultato del *DSS*).

Le procedure adottate, insieme alla necessaria modifica del layer fisico, consentono la interconnessione di dispositivi realizzati da costruttori diversi anche operanti con differenti protocolli.

Realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di rete di misuratori

Viene presentata brevemente una architettura hardware/software per la gestione dell'energia elettrica in tempo reale basata su sistemi a microcontrollori che forniscono funzionalità di *SM* per monitorare in maniera continua i carichi ad essi collegati e che comunicano ad una unità centrale - *Smart Concentrator* (*SC*) - i dati elaborati tramite CAN bus. Il compito principale di ogni *SC* è recuperare temporaneamente i dati di misura da ogni singolo *SM* e renderli disponibili attraverso protocolli ed infrastrutture dell'*Internet of Things*. Attraverso un web server ed un database MySQL, è poi possibile memorizzare tutte le informazioni prelevate dai singoli *SC* e fornire, ad esempio, agli utenti finali il loro consumo effettivo utilizzando un semplice Web browser. Per rendere l'intero sistema sicuro e, quindi, prevenire attacchi esterni, prima delle diverse memorizzazioni lungo tutta la catena dei dispositivi coinvolti nello Smart Metering è stato implementato un algoritmo di crittografia basato su AES-128. Per implementare il sistema di misura in tempo reale rispetto alla grandezze di interesse della rete elettrica e rendere disponibili all'utente finale tali informazioni, l'architettura della Smart Meters Network include:

a. n SMs collegati ai diversi carichi (attraverso appositi trasduttori) che acquisiscono continuamente tensione e corrente misurandone Potenza (Attiva e Reattiva), Energia e diversi indici di *PQ*;
b. *nodo aggregatore* con funzionalità di *Smart Concentrator* (*SC*) collegato attraverso CAN bus ai singoli *SM* in grado di memorizzare su memory flash interna tutti i dati ricevuti e di metterli a disposizione per richieste HTTP verso l'esterno;
c. *nodo interfaccia* - *Micro Computer (MC)* - con funzionalità di memorizzazione su Database MySQL e diffusione verso l'utente finale (Web Server+applicazione Web-based con profilazione utente).

Lo Smart Meter realizzato è stato programmato per effettuare:

- acquisizione sincrona di due segnali (le uscite del trasduttore di corrente e di tensione);
- calcolo di frequenza, valori efficaci, potenza attiva, energia attiva, potenza apparente, energia apparente, fattore di potenza, potenza ed energia reattiva secondo le principali definizioni accreditate in letteratura, misura di THDI e THDV;
- mostrare i risultati e prendere comandi tramite un'interfaccia locale utente (DISPLAY LED);
- memorizzazione dei risultati di misura in locale (Memoria Flash locale) per un determinato intervallo di tempo (gestione attraverso buffer circolare);
- trasferimento dei dati acquisiti attraverso interfaccia CAN verso il nodo concentratore a richiesta e in modalità programmata temporizzata.

Anche lo Smart Concentrator (*SC*) è costituito da un sistema microcontrollore *ARM Cortex M4 STM32F407* dotato di una memoria locale per l'immagazzinamento temporaneo dei dati ed una unità di comunicazione (sono state implementate in questo dispositivo due tipi di interfaccia: una rivolta agli Smart Meters con protocollo CAN ed una rivolta al *Nodo Interfaccia* di tipo Ethernet), per la interazione con i dispositivi di campo e la pubblicazione in rete (trasmissione dei dati a livello superiore) degli stessi.

Il consumatore come il gestore locale della rete elettrica ha, quindi, la possibilità di monitorare in locale (attraverso Display a LED) piuttosto che da remoto (attraverso un Server Web) i consumi relativi alle utenze di proprio interesse. Lo SC, una volta recuperati i dati dai singoli SM, ne verifica la correttezza (sintattica), l'immagazzina per renderli disponibili ad un'analisi di primo livello e li trasferisce al *nodo interfaccia* quando da questi ne viene fatta richiesta. L'attività dello SC si divide in *Device Setting State* durante la quale ogni singolo SM che si collega alla sua sottorete chiede un indirizzo attraverso il quale verrà poi interrogato ed in *Measurement Data Exchange State* attraverso cui viene effettuata (in base alla tabella di attivazione prodotta nello stato precedente) una interrogazione ciclica (arbitraggio del CAN BUS in Sequential Polling) su tutti gli SM attivi. Una volta recuperati i dati, lo SC li mette a disposizione rispondendo a richieste di tipo http, fungendo da Server Web in modo che le richieste possano essere effettuate sia da Web Browser sia dal nodo interfaccia attraverso un'applicazione ad hoc in linguaggio dinamico php-javascript in grado di scaricare le Memorie Flash dei singoli SC all'interno di un Database MySql dedicato.

Il microcomputer è l'ultimo tassello dell'aggregazione di informazioni ed è in grado di rendere accessibili, tramite interfaccia user-friendly, la totalità dei dati ricevuti dall'intera catena di misura *SMs + SCs*. Su di esso vengono avviati un *web-server Apache* ed un'applicazione web-based (php, javascript e html) per gestire le richieste HTTP dell'utente finale, nonché un *Database MySQL* per la memorizzazione di tutti i dati recuperati dai diversi *SCs*. Dopo la fase di autenticazione, il primo passo è dunque scaricare i dati dal singolo SC accessibile tramite il suo indirizzo IP (gestito secondo la rete locale nella quale è inserito il nodo) per trasferire le misure presenti nella memoria flash dei singoli dispositivi in un DB MySQL *crittografato*.

Le caratteristiche dell'architettura della rete di misuratori e dei protocolli scelti/implementati sui prototipi SM, SC e MC hanno confermato le buone prestazioni dell'intero sistema. Si può evidenziare che:

- l'incertezza di misura riscontrata, nelle diverse condizioni operative non è stata mai superiore allo 0.5%;
- resilienza ad errori di comunicazione: la gestione degli errori di comunicazione è affidata alla robustezza dei due protocolli (CAN ed Ethernet) che nei diversi livelli introdotti garantiscono elevate prestazioni in termini di ritrasmissione in caso di perdita dei dati;
- tempo di latenza sulla comunicazione: i ritardi presenti nel sistema di comunicazione sono relativamente bassi oltre che garantiti dai protocolli standard utilizzati. Con riferimento a possibili criticità che si possono manifestare (data la possibile ampia estensione della rete) il sistema di immagazzinamento locale su memoria flash interna dei singoli dispositivi supera il problema della latenza rendendo comunque l'intero sistema robusto;
- sicurezza del dato: lungo tutta la catena di misura, così come per il database MySql, è stata sfruttata un'efficiente procedura di crittografia, secondo algoritmo AES-128, che in questo momento garantisce la comprensibilità delle informazioni solo agli utenti autorizzati;
- minimo intervallo di lettura: gli SM effettuano misurazioni in linea/tempo reale grazie ad un sistema efficiente di gestione dei convertitori AD e mettono a disposizione dei relativi SC i dati ogni 3 secondi. Per disporre, invece, dei dati all'interno del DB su MC, sono state implementate due scelte alternative ovvero scaricare gli SC ad intervalli regolari (impostato ogni 5 minuti, ma può variare in funzione dei SM collegati ad ogni SC) piuttosto che interrogare puntualmente in qualsiasi momento lo SC di interesse.

L'attività svolta ha portato alla realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di rete con struttura ad albero e con funzionalità avanzate. Le prestazioni della rete si sono dimostrate molto interessanti sia per quanto riguarda le performance metrologiche, sia per quanto attiene gli aspetti di resilienza e sicurezza dei dati.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/022.

b. Gestione ottimale reti di edifici

Università Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria

Le attività di ricerca e sviluppo condotte nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, Sezione di Informatica e Automazione, dell'Università di Roma Tre riguardano l'implementazione di moduli software per la diagnostica, il controllo e l'ottimizzazione di reti di edifici nonché lo studio di modelli innovativi di diagnostica e controllo.

Implementazione di un modulo di diagnostica di basso livello

Il modulo di diagnostica a basso livello ha lo scopo di identificare le anomalie nelle misure a livello del singolo sensore. In questa ottica sono stati definiti tre livelli di soglia indicanti diverse tipologie di malfunzionamento:

- *Soglia operativa*. La soglia operativa indica dei limiti oltre i quali il sensore sta funzionando in maniera non ottimale, ma non pregiudica la fruibilità della misura in sé (es. fattore di potenza diverso da 1 ma non troppo basso)
- *Soglia funzionale*. La soglia funzionale indica dei limiti oltre i quali il sensore non sta funzionando (es. potenza elettrica misurata maggiore di quella installata)
- *Fondo scala*. Il fondo scala indica dei limiti oltre i quali la misura eccede il valore indicato dalla scheda tecnica del sensore.

Tali soglie devono essere impostate a valle di una supervisione di un esperto che identifica a seconda di ciascuna misura dei valori plausibili da associare a ciascuna soglia. L'identificazione delle soglie opportune deve essere effettuata da degli esperti a valle di un accurato audit energetico dell'edificio e dell'analisi dell'installazione della sensoristica.

Per l'identificazione di questo tipo di anomalie è stato sviluppato un software che periodicamente controlla

l'ultima misura rilevata e la confronta con le soglie impostate.

La campagna di identificazione è stata avviata a settembre 2014, la Figura 362 mostra il riepilogo del numero medio mensile di anomalie rilevate, suddivise per categoria. Durante il primo mese è stata portata a termine una campagna di tuning dei parametri, per cui sono state rilevate un cospicuo numero di anomalie a livello di fondo scala che sono rientrate a seguito di un'opportuna taratura. Il numero di anomalie si impenna a Gennaio 2015 in quanto sono state rilevate anomalie soprattutto a livello di fattori di potenza delle linee di quadro dell'edificio in esame (C.R. Casaccia Ed. F40). Tali problematiche sono state in parte risolte a seguito di un intervento dei manutentori a febbraio.

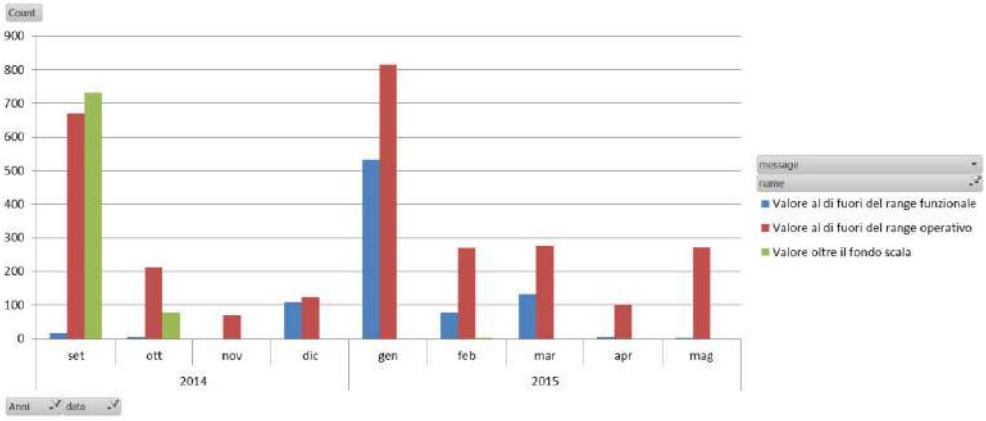


Figura 362. Riepilogo numero medio di anomalie di edificio

La Figura 363 e 364 mostrano il dettaglio delle anomalie suddivise per misura nel periodo considerato: come possiamo vedere sono tutte concentrate sul rilevamento del fattore di potenza. Il malfunzionamento del sensore è stato rilevato in particolare nella misura del fattore di potenza della fase 3 del piano terra dell'edificio.

Successivamente è stato effettuato uno studio delle anomalie suddiviso per piano: le anomalie sono uniformemente distribuite sul piano terra e primo piano, mentre in forma più lieve sul secondo piano.

Implementazione di un modulo di previsioni meteo

Il modulo di previsione dei dati meteorologici ha lo scopo di fornire le previsioni di temperatura ed umidità (successivamente esteso poi con la radiazione solare diretta e diffusa) sfruttando i dati forniti dal Sian ed adattandoli con le misure reali provenienti dalla centralina meteo installata nel C.R. Casaccia. In questo modo le previsioni sono adattate in tempo reale, ottenendo quindi una precisione maggiore. Tale modulo è implementato in Java per quanto riguarda la logica di gestione e con delle Stored Procedure in MySQL per la gestione dei dati e l'aggiornamento real time. I dati di temperatura ed umidità si suddividono quindi in misure, previsioni e previsioni adattate.

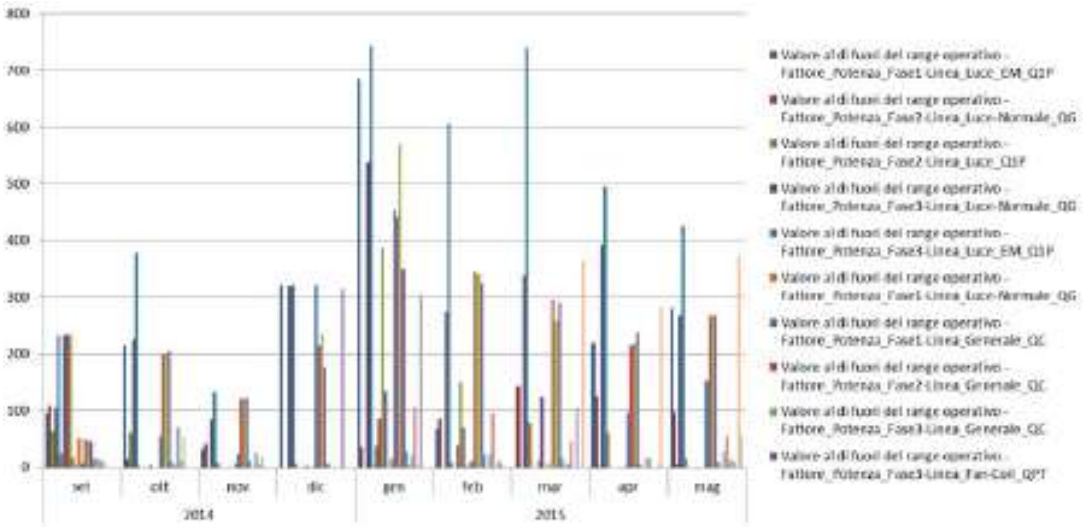


Figura 363. Anomalie totali sul range operativo

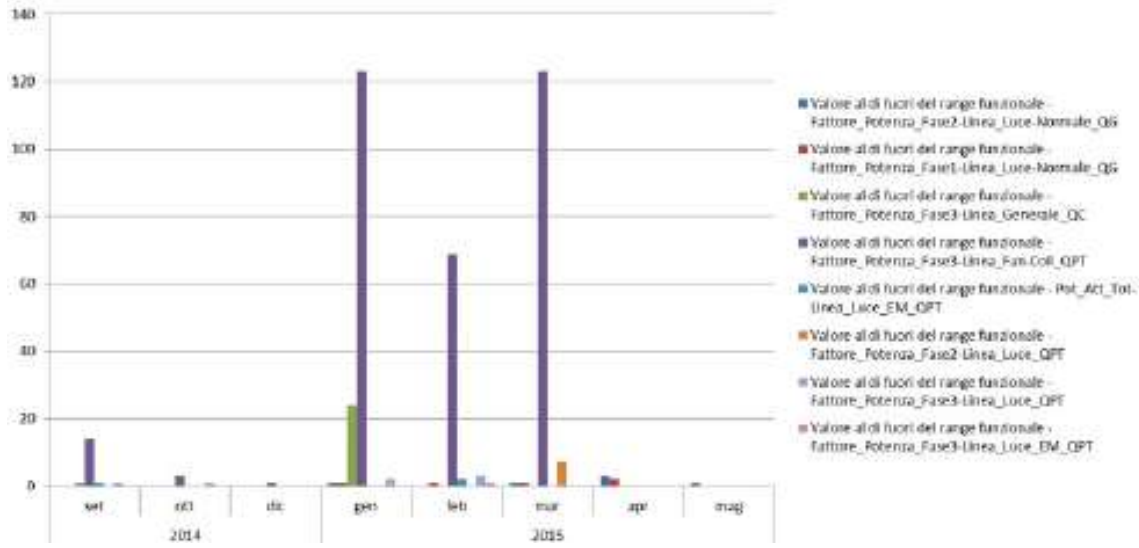


Figura 364. Anomalie totali sul range funzionale

Implementazione di un modulo di controllo delle utenze elettriche di una rete di edifici

Il modulo di controllo delle utenze elettriche prevede la gestione adattiva delle luci negli spazi comuni e dei fancoil delle stanze in funzione dell'effettivo bisogno del servizio da parte dell'utente. Il modulo di controllo sviluppato nelle annualità precedenti è stato esteso per l'interfacciamento con i BEMS della rete di edifici. E' stato sviluppato uno strato indipendente dalla metodologia di processamento delle attuazioni, tale procedura consente di impostare le attuazioni desiderate direttamente nella tabella SCADA del DB Smarttown, il modulo di interfacciamento avvia poi la procedura di chiamata di tipo REST o SOAP a seconda del BEMS associato all'edificio su cui si vuole inviare un comando di attuazione.

Implementazione di un modulo di ottimizzazione di un edificio

Nell'ottica del controllo ottimizzato di edificio è stato sviluppato un modulo che interfaccia il simulatore, sviluppato in MATLAB, con la logica di controllo ed attuazione della climatizzazione di edificio, sviluppata in Java. Per tale procedura sono state utilizzate delle librerie Java opensource che consentono la chiamata di processo a MATLAB embedded nel codice sorgente Java. Tale modulo è stato poi esportato sulla grid ENEA CRESCO per poter sfruttare il calcolo parallelo durante il processo di simulazione e rendere il servizio fruibile ai partners progettuali.

Strategie di controllo predittivo distribuito per la regolazione della temperatura interna di edifici multizona

L'obiettivo di questa attività è stato lo sviluppo di strategie adattive di Model Predictive Control (MPC) per la regolazione della temperatura interna di un edificio per uffici a tre zone, in cui ogni zona corrisponde ad una stanza occupata da un dipendente.

Le strategie MPC sviluppate vengono definite adattive poiché il calcolo dell'opportuna azione di controllo (con orizzonte di predizione di 10 minuti) tiene conto del livello di occupazione di ogni zona (in particolare quattro possibili livelli di occupazione compresi tra 0 e 1) al fine di ridurre il consumo energetico. In particolare sono state analizzate due diverse strategie MPC adattive: una con set-point di temperatura di zona dinamici, l'altra con coefficienti di peso dinamici della funzione obiettivo.

La sperimentazione è stata condotta considerando innanzitutto l'accoppiamento termico tra le zone dell'edificio ed implementando quindi un'architettura MPC distribuita. Successivamente è stata analizzata un'architettura MPC decentralizzata (che non tiene conto cioè dell'accoppiamento termico tra le zone dell'edificio). I risultati sono stati valutati in termini di energia consumata e livello di comfort definito dalle temperature operative interne. Sempre nell'ambito della sperimentazione è stata considerata un'intera giornata lavorativa con riferimento a quattro diverse fasce temporali, ognuna corrispondente ad un diverso livello di occupazione per ogni zona. Per la valutazione dei risultati sono stati adottati due indici di performance: per il comfort, quando il livello di occupazione è massimo, la distanza media giornaliera delle temperature interne reali da quelle di setpoint nell'intero edificio, MAE_{TOT}; per il consumo, il flusso d'aria totale emesso dai fancoil nell'intero edificio, M_{tot}.

Entrambe le strategie MPC adattive seguono bene i profili dei set-point di temperatura in ogni periodo della giornata, così come avviene per una strategia MPC classica (non adattiva, che non tiene conto cioè del livello di occupazione di ogni zona). Ciò è anche evidente dai risultati di MAE_{TOT} (tabella 105): ogni configurazione riporta errori bassi di temperatura ed il controllo MPC distribuito presenta errori più piccoli rispetto a quello decentralizzato. Osservando la tabella è evidente il grande vantaggio dell'utilizzo di una strategia MPC adattiva: i risultati relativi a M_{tot} dimostrano che lo sforzo di controllo, e quindi il consumo energetico, di una configurazione MPC adattiva è molto più piccolo di quello di una strategia non adattiva. In particolare il MPC distribuito con coefficienti di peso dinamici offre le performance migliori in termini di comfort e consumo, ma d'altra parte richiede una fase preliminare di tuning molto accurata e non immediata dei coefficienti.

Tabella 105. Confronto dei risultati di strategie MPC adattive e non adattive

Temperature di set-point dinamiche	MAE_{TOT} [°C]	M_{tot} [kg]
Distribuito	0,084	3029
Decentralizzato	0,130	2954
Coefficienti di peso dinamici	MAE_{TOT} [°C]	M_{tot} [kg]
Distribuito	0,035	2148
Decentralizzato	0,051	2187
MPC non adattive	MAE_{TOT} [°C]	M_{tot} [kg]
Distribuito	0,073	4223
Decentralizzato	0,105	4117

La Figura 365 illustra le evoluzioni delle azioni di controllo in ogni zona dell'edificio nel corso della giornata di sperimentazione risultanti dall'applicazione della strategia MPC con temperature di set-point dinamiche. Il fan-coil della zona i fornisce aria calda ad una temperatura e ad una velocità dipendente dal segnale di controllo uc,i veriabile tra 0 e 1. Ai fini di una simulazione più realistica, per i segnali di controllo sono definiti solo 5 possibili valori tra 0 e 1 con uno step di 0,25. In particolare si osserva che il segnale di controllo della seconda zona è sempre nullo poichè la zona è inoccupata per tutto il giorno.

In conclusione, la strategia MPC distribuita con coefficienti di peso dinamici della funzione obiettivo si è rivelata essere la migliore in termini di consumo energetico e livelli di comfort. Tuttavia la strategia con temperature di set-point dinamiche è risultata più semplice da applicare.

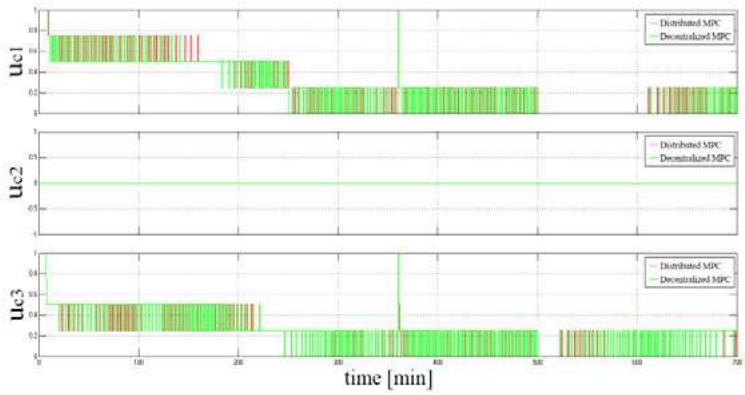


Figura 365. Andamento dei segnali di controllo di zona di MPC distribuito e MPC decentralizzato con temperature di set-point dinamiche

Modelli stocastici per la diagnostica termica

Il primo obiettivo di questa attività è stato quello di realizzare un'applicazione basata su modelli di Markov nascosti (Hidden Markov Models, HMM) per l'analisi dei consumi termici della rete di edifici del Centro ENEA Casaccia in relazione con la situazione climatica esterna. Dalla valutazione di consumo termico e temperatura esterna della stagione estiva 2014, sono state individuate 3 fasce (basso, medio e alto) per un totale di 9 stati (Figura 366).

Lo scopo è quello di mettere in luce le situazioni anomale identificate dagli stati 1 e 9. Gli stati normali sono il 3, il 5 e il 7, mentre gli altri stati sono intermedi. Per prima cosa l'applicazione compara consumo energetico e temperatura a dei riferimenti, in modo da inquadrarli in una fascia tra basso, medio e alto. Fatta questa operazione viene generato un simbolo elementare che andrà ad alimentare il modello di Markov che sposterà di volta in volta percentuale sui 9 stati in base proprio a consumo e temperatura. Potremo così osservare nel tempo l'evoluzione dei consumi rispetto alla temperatura esterna, ed evidenziare eventuali situazioni anomale. Il modello di Markov calcola lo stato attuale considerando gli ultimi dodici simboli che nel nostro caso, con un timestamp di 15 minuti, corrispondono alle ultime 3 ore di consumi.

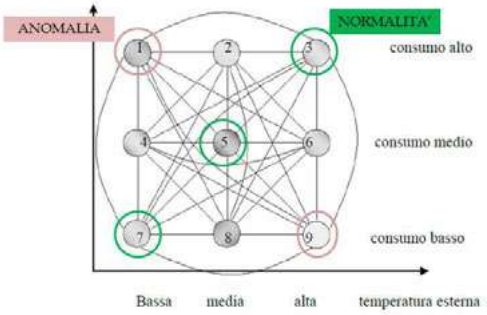


Figura 366. Stati del modello HMM

Parallelamente a questa analisi, un'altra analisi basata sulla teoria di Dempster-Shafer ci aiuta a identificare le cause di eventuali anomalie o a indicare il corretto funzionamento dell'impianto termico. In input utilizziamo diversi dati, in primis l'output del HMM che ci dà un'idea sui consumi, poi la portata dell'acqua nel circuito termico, il consumo elettrico dei fancoil e il delta di temperatura (la differenza tra temperatura di mandata e ritorno nel circuito termico). Questi dati vanno in pasto all'algoritmo basato sulla teoria di Dempster-Shafer che ci restituisce degli indici (BET): essi indicano se stiamo lavorando bene oppure ci aiutano a "scommettere" su una specifica causa di anomalia presente nell'impianto termico, es. malfunzionamento del sistema di controllo o guasto al sistema di pompaggio (Figura 367).

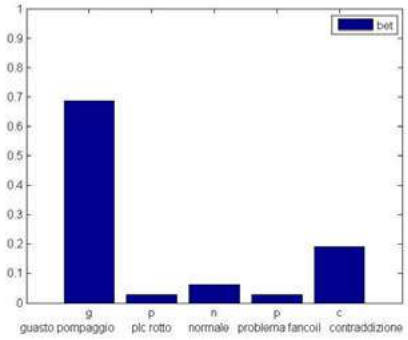


Figura 367. Esempio di indici BET

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/024.

Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Nella precedente annualità, è stato sviluppato un simulatore in Matlab/Simulink dei consumi termici/elettrici in grado di riprodurre gli effetti prestazionali di differenti strategie di controllo a livello di singolo edificio grazie all'impostazione automatica dei setpoint di temperatura (termostati di stanza e centrale termica) e dei valori di dimmerazione delle luci indoor. Tale simulatore ha la finalità di messa a punto di strategie day-ahead di controllo e gestione e differisce sostanzialmente dai simulatori sviluppati ai fini di progettazione degli edifici. Sulla base di un processo di calibrazione su un database di learning (apprendimento) il simulatore è stato in grado di raggiungere una notevole precisione su scala giornaliera e pertanto si è deciso di utilizzarlo anche come potenziale predittore nei moduli di ottimizzazione, in attesa di avere informazioni sufficienti da un robusto set di dati. Inoltre, nel PAR precedente è stata affrontata una calibrazione preliminare del simulatore della rete di edifici.

Nel PAR 2014, l'attività è proseguita secondo le seguenti linee:

- evoluzione del simulatore di edificio: dynamic pricing ed integrazione di sistemi di generazione distribuita e storage;
- calibrazione del simulatore di rete di edifici a partire dai dati sperimentali;
- integrazione del simulatore di rete di edifici con algoritmi di ottimizzazione e controllo;

Il simulatore di edificio è stato dotato di blocchi aggiuntivi volti alla simulazione di politiche attive della gestione della domanda di energia (demand side management) che possano anche modificarne il profilo (demand response). Infatti, affinché possa modificare la propria curva di domanda garantendo il proprio comfort, il consumatore deve avere a disposizione sistemi energetici che possano garantire la flessibilità della propria domanda. Più in dettaglio sono stati implementati: sistemi di (co-)generazione distribuita con microturbina a gas (che trasformano l'utente finale da "consumer" a "prosumer") e sistemi di accumulo, sia termici che elettrici. Inoltre è stata introdotta la funzionalità di dynamic pricing per simulare le condizioni al contorno del mercato dell'energia elettrica e del gas. Infine, il modello del cluster messo a puntolo scorso anno è stato "calibrato" sulla base dei dati sperimentali provenienti dalla rete di sensori dello "Smart village ENEA".

Per quanto riguarda la funzionalità di (co-)generazione distribuita, il modello della microturbina implementato risulta essere molto affidabile, grazie anche alla quantità di dati sperimentali in possesso dell'Università Politecnica

delle Marche che ha svolto attività di ricerca su questa macchina per diversi anni. La modellazione degli accumuli (termico ed elettrico) fornisce risultati verosimili ed in linea con la bibliografia internazionale. Un possibile sviluppo futuro in questo campo potrebbe essere legato all'opportunità di calibrare i modelli con dei risultati reali.

Per quanto riguarda il simulatore della rete di edifici, la fase di calibrazione ha dimostrato la bontà del simulatore nel ricostruire l'andamento della domanda di energia termica giornaliera degli edifici del distretto: i risultati mostrano un'ottima rispondenza tra i massimi ed i minimi (sia assoluti che relativi) nell'arco delle ventiquattro ore. Tuttavia, in futuro altro lavoro dovrà essere svolto per cercare di ridurre l'errore assoluto tra il valore simulato e quello reale.

Comunque, il simulatore di edifici sviluppato risponde ai requisiti per cui è stato pensato. Esso, infatti, nasce come simulatore e non come predittore. Il fatto che esso ricostruisca bene la "forma" della domanda di energia è l'aspetto che più interessa ai fini della definizione di strategie di energy demand side management; infatti la scelta tra differenti strategie ottimali della gestione della domanda di energia avviene confrontando la variazione di differenti scenari rispetto ad una determinata baseline. In futuro, il simulatore di reti di edifici potrà essere ulteriormente migliorato e/o sviluppato sotto differenti aspetti: in primo luogo, cercando di migliorare la sua capacità "predittiva" cercando di ridurre l'errore assoluto tra dato misurato e simulato; in secondo luogo, migliorando il modello della rete di teleriscaldamento; infine, potrebbe essere interessante utilizzare il modello anche per la progettazione di reti di edifici/distretti, cercando di utilizzarlo come strumento di design per la definizione del mix energetico ottimale per soddisfare le domande di servizio (elettricità, riscaldamento, raffrescamento…) degli utenti del distretto.

Una descrizione dettagliata dell'attività svolta è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/025.

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

L'attività di ricerca condotta dal gruppo del Politecnico di Torino si è declinata secondo diverse fasi e obiettivi finalizzati all'individuazione di metodologie per la diagnostica degli edifici.

Validazione ed analisi dei dati raccolti in fase operativa dai sistemi di monitoraggio installati sulla rete di edifici "smart village"

L'attività è consistita nella continuazione del processo di verifica e collaudo del sistema di monitoraggio energetico e ambientale indoor implementato sul distretto di edifici situato presso il centro ENEA della Casaccia. Gli edifici in questione, costituenti lo "Smart Village", sono in totale 8 con destinazione d'uso ufficio, più la centrale termica del distretto. Dal punto di vista geometrico, dimensionale, impiantistico e costruttivo, gli edifici presentano caratteristiche comuni e, dal 2011, sono oggetto di un progetto sperimentale di monitoraggio e diagnostica da remoto. Maggiori dettagli relativamente alla descrizione degli edifici e ai primi risultati ottenuti dalla sperimentazione sono riportati all'interno dei rapporti redatti nelle annualità precedenti.

L'attività di validazione e analisi dei dati di monitoraggio, iniziata nel 2013, si è concentrata sulla verifica della qualità dei dati di natura energetica, ambientale e gestionale provenienti dalla sensoristica installata. L'analisi dei dati svolta nel quadro del PAR 2014 è stata effettuata su un periodo di campionamento più ampio rispetto a quanto fatto in precedenza. Il periodo di misura considerato va infatti dal 1 aprile 2013 al 16 maggio 2015: si hanno così due interi anni di analisi che dimostrano l'ottimizzazione del sistema di acquisizione dati nel tempo, partendo da una prima fase di statup, fino ad ottenere un sistema robusto e affidabile.

L'analisi della qualità dei dati è un'operazione che deve essere ciclica e ripetitiva, in modo da poter verificare che, nel corso del tempo, tutto il processo avanzi con una progressiva ottimizzazione del sistema. In particolare per ogni sensore installato si sono verificate: l'accuratezza della grandezza misurata, il periodo di campionamento, la frequenza temporale di acquisizione, il numero totale di record registrati durante il periodo di monitoraggio, la quantità di dati mancanti e l'attendibilità dei dati acquisiti. I dati collezionati dalla piattaforma di acquisizione sono stati estratti ed elaborati fuori linea. Per ogni edificio si sono analizzati i dati di energia termica, di energia elettrica, di temperatura interna, di occupazione e i parametri ambientali esterni, allo scopo di realizzare un unico database di riferimento per lo sviluppo di tutte le altre attività elencate a programma.

Nello specifico il processo di analisi condotto si struttura secondo le seguenti fasi: verifica del corretto funzionamento dei sensori, individuazione degli errori, correzione degli errori. L'analisi di qualità dei dati condotta ha evidenziato che le problematiche riscontrate durante le analisi effettuate in precedenza sono state risolte. Il sistema di monitoraggio risulta ad oggi essere robusto e affidabile, e consente la costruzione di un database completo e indispensabile per le successive elaborazioni.

Elaborazione e caratterizzazione dei profili di consumo e benchmarking

L'attività di elaborazione ed analisi dati si è articolata in più fasi che possono essere sintetizzate come di seguito:

1. Verifica dei bilanci energetici
   Questa operazione è stata effettuata a completamento della verifica della qualità dei dati al fine di verificare la "robustezza" del sistema di monitoraggio. I dati misurati in ogni singolo edificio, sia termici che elettrici, sono stati in questa fase aggregati e messi a confronto con i dati di monitoraggio ottenuti al punto di erogazione dell'energia (es. contatore generale per l'energia elettrica e contabilizzatore di calore in Centrale Termica per l'energia termica). I risultati di tale operazione hanno verificato l'accettabilità dei valori misurati, evidenziando come gli errori emersi dal calcolo dei bilanci energetici si siano nel tempo ridotti e ad oggi ricadano nei range di accettabilità legati all'incertezza di misura. Anche questa analisi conferma come la qualità dei dati sia migliorata nel corso della sperimentazione.

2. Caratterizzazione e clusterizzazione dei profili di consumo energetico
   Sempre propedeutica al fine dell'applicazione e validazione di metodologie di benchmarking è la determinazione di profili di carico medio. Questa operazione si concretizza nella determinazione di profili tipici di consumo energetico per edifici per uffici con caratteristiche comuni a quelle del cluster. I profili tipici di potenza, sia elettrica che termica, sono determinati per i vari mesi dell'anno e riportano ranges di accettabilità che dovranno essere rispettati nel tempo. I profili sono costruiti sia per i giorni feriali che per i festivi, sia per i dati aggregati che, dove possibile, disaggregati. Tale analisi consente sia un confronto trasversale tra edifici, sia un'analisi degli andamenti di carico del singolo edificio durante la campagna di monitoraggio. I risultati, che durante il primo anno di analisi hanno evidenziato chiare anomalie nella gestione dell'energia, hanno consentito di mettere in pratica azioni di gestione e manutenzione che hanno portato alla diminuzione graduale degli errori. Il confronto dei profili appartenenti a diversi edifici ha infatti consentito, lo scorso anno, di identificare puntualmente e per ogni immobile le azioni di miglioramento da compiere. Il monitoraggio energetico in continuo ha dunque consentito di verificare l'effetto positivo degli interventi e di valutare i conseguenti risparmi energetici ed economici raggiunti. Lo stesso strumento ha inoltre permesso di quantificare i risparmi energetici ottenuti agendo sui sistemi di gestione impiantistica.

3. Definizione e valutazione di nuovi Key Performance Indicators (KPI*)*
   Questa fase ha previsto il confronto dei KPI termici ed elettrici definiti e applicati già nelle precedenti annualità, con gli stessi indicatori applicati questa volta ad un campione di dati più ampio. Lo scopo è quello di validare i KPI già introdotti, di indicarne di nuovi (ove necessario e sulla base delle nuove informazioni acquisite) e di verificare il comportamento dei consumi energetici negli ultimi due anni di sperimentazione. In tal modo è possibile confrontare tra loro tutti gli edifici appartenenti al cluster su energia termica, elettrica e totale (energia primaria).

4. Elaborazione di dati ambientali in relazione ai consumi energetici
   L'analisi ambientale condotta in una prima fase di elaborazione dati (PAR 2013) è stata proseguita ed implementata, allo scopo di verificare se, ottimizzando i sistemi energetici, anche le condizioni ambientali avessero subito un miglioramento. Le analisi svolte hanno confermato i risultati attesi, dimostrando anche sotto questo punto di vista l'efficienza del sistema implementato.

Il confronto tra i risultati ottenuti in termini sia energetici che ambientali non è risultato del tutto immediato. Malgrado gli interventi già effettuati, i consumi energetici per condizionamento spesso non trovano correlazione con i fattori climatici esterni e interni. Nei casi analizzati, i profili temporali dei dati energetici monitorati spesso non trovano ancora una correlazione diretta con i parametri ambientali (ad esempio le temperature esterne). Tale fattore evidenzia il fatto che la gestione del controllo degli impianti potrebbe essere ulteriormente ottimizzata.

Calibrazione ed implementazione dei modelli di preprocessing sulla rete di edifici "smart village"

Nella presente attività i modelli diagnostici dei consumi elettrici (luce e condizionamento) sviluppati nelle precedenti annualità (RdS/2013/119, RdS/PAR2013/060 e RdS/PAR2013/061) per l'edificio F40 sono stati estesi al cluster di edifici "Smart Village" attraverso un'attenta fase di implementazione e calibrazione dei modelli stessi, seguita da una fase di sperimentazione sul caso reale. Il primo step dell'attività è consistito nell'ampliare gli applicativi Java precedentemente sviluppati per l'edificio F40 in modo da elaborare i dati di consumo elettrico (illuminazione e fancoil) e di presenza dei tre piani dell'edificio F40 e delle otto palazzine del cluster (ad un solo piano) ai fini dell'analisi diagnostica. In una seconda fase, l'efficacia dei modelli diagnostici sviluppati nelle precedenti annualità è stata testata su periodi di tempo man mano più ampi. Opportune modifiche agli stessi modelli sono state apportate al fine di ridurre il numero di "falsi positivi" di anomalie rilevate, "luci accese in assenza di persone" e "fancoil accesi in assenza di persone". Successivamente, i parametri dei modelli diagnostici

sono stati calibrati, considerando le caratteristiche dei dati e del comportamento di ogni edificio.

Dopo averne verificato l'efficacia, si è passati alla fase di sperimentazione dei modelli diagnostici. Le figure seguenti illustrano i risultati ottenuti nel caso della distribuzione per fasce orarie delle anomalie "Fancoil accesi in assenza di persone" per il cluster di edifici (Figura 368) e "Luci accese in assenza di persone" per l'edificio F40 (Figura 369). E' possibile osservare che le anomalie relative alle luci accese in assenza di persone nell'edificio F40 sono praticamente assenti nelle ore notturne poiché in questo edificio è applicato un controllo adattivo delle luci basato sulle presenze; ciò non avviene negli edifici del cluster, in cui non è applicato alcun tipo di controllo, e la maggior parte delle anomalie relative ai fancoil accesi in assenza di persone si verifica in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita dei dipendenti dagli edifici.

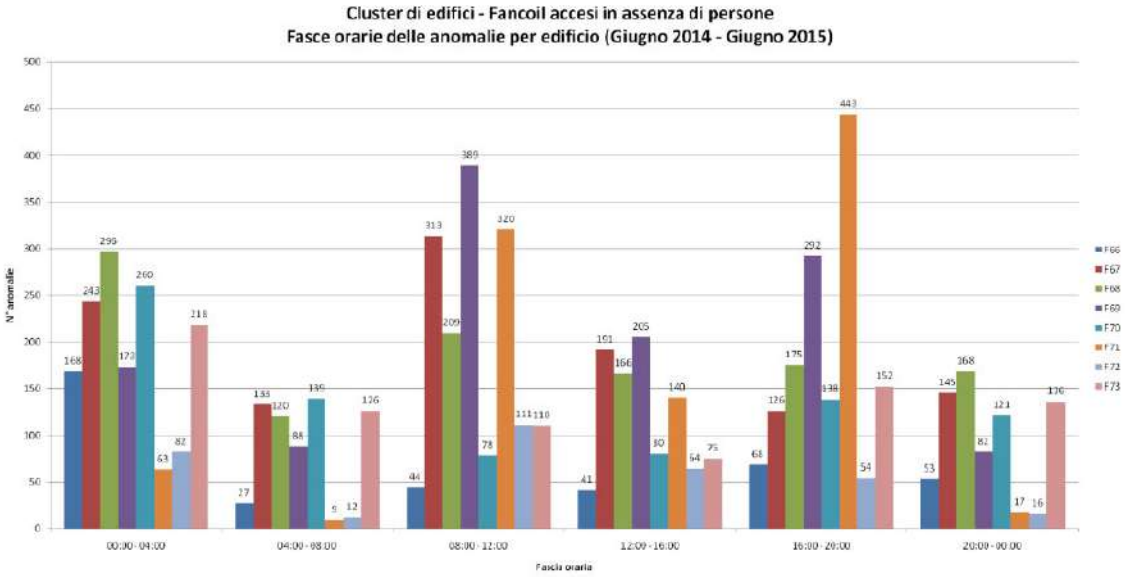


Figura 368. Cluster di edifici, fancoil accesi in assenza di persone: fasce orarie in cui si verificano le anomalie nell'anno Giugno 2014 – Giugno 2015

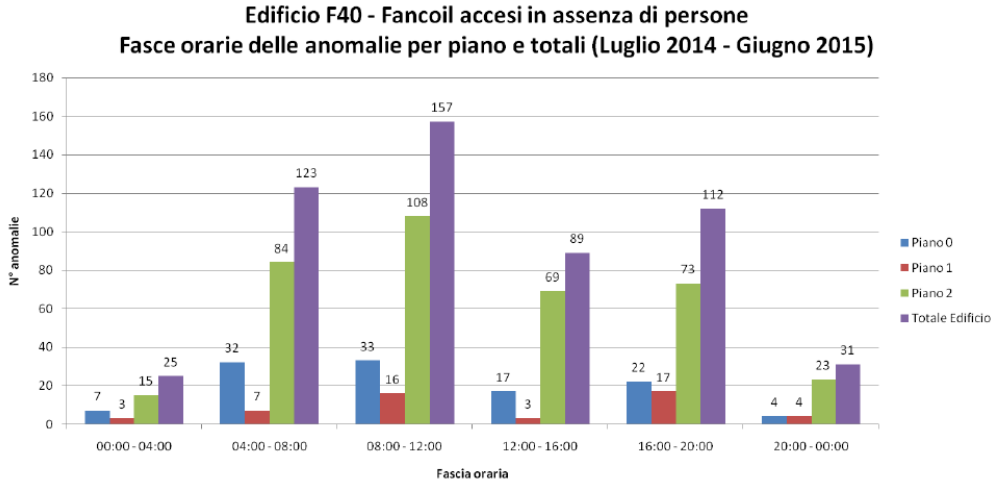


Figura 369. Edificio F40, luci accese in assenza di persone: fasce orarie in cui si verificano le anomalie nell'anno Giugno 2014 – Giugno 2015

Analisi sul comportamento dell'occupante

Le azioni comportamentali degli utenti (come ad esempio apertura/chiusura finestre, uso dell'illuminazione artificiale, o uso dell'impianto di riscaldamento) negli edifici residenziali hanno un impatto significativo nella prestazione energetica degli edifici. Questa attività di ricerca riguarda la definizione, misurazione, modellazione del comportamento degli utenti legato all'uso dell'energia negli edifici. L'applicazione a casi di studio reali risulta

una attività chiave in questo lavoro di ricerca: la qualità dei dati provenienti dalle misurazioni in campo sarà di importanza fondamentale per le attività di elaborazione ed analisi.

L'attività del Politecnico di TorinoE si è delineata attraverso diversi studi, focalizzati dapprima nella definizione del ruolo chiave dell'utenza all'interno degli edifici. Infatti, uno degli ostacoli maggiori per raggiungere migliori risultati in termini di efficienza energetica degli edifici è la mancanza di una reale conoscenza dei fattori determinanti gli usi di energia, ma diversi studi di letteratura dimostrano che la divergenza tra il consumo reale e quello previsto dipendono, sia dalla realizzazione della costruzione degli impianti tecnici, che dal reale uso dei sistemi di controllo da parte dell'occupante. Sono stati quindi indagati quali sono i fattori che influenzano gli utenti ad interagire con l'ambiente interno per migliorare le condizioni di benessere. In particolare, sono stati analizzati 3 tipi di controllo: l'uso delle finestre (apertura e chiusura) in relazione alla ventilazione naturale, la regolazione del termostato in relazione all'energia termica per riscaldamento invernale; l'uso delle schermature solari in relazione alla luce naturale.

I fattori influenzanti gli utenti, in particolare, vengono analizzati dividendo i parametri principali in 5 categorie di driver: fisico-ambientale, contestuale, psicologici, fisiologici e sociali. Secondo l'analisi dei driver emersi dagli studi svolti, è possibile definire quali driver hanno la maggiore influenza che porta l'occupante a compiere un'azione. Questi drivers preminenti intercettano le cinque categorie, evidenziando così la complessità della ricerca sul comportamento dell'occupante.

Vengono quindi definiti dei programmi di engagement degli utenti per educare e responsabilizzare gli utenti ad un uso maggiormente consapevole dell'energia nelle abitazioni. Gli strumenti e i metodi di engagement a cui si fa riferimento in questo report forniscono un inquadramento per sviluppare strategie e programmi di sostenibilità ambientale che contribuiscono a produrre benefici a livello ambientale ma anche organizzativo e a incoraggiare la cultura dell'innovazione e dell'engagement stesso. Vengono quindi identificati i principali metodi di engagement e delle azioni che gli impiegati possono essere incentivati ad eseguire e vengono quindi discussi gli strumenti tramite cui queste azioni impegnano gli utenti coinvolti alla sostenibilità ambientale.

È stata quindi predisposta una proposta di campagna di sensibilizzazione per gli utenti degli 8 edifici ("cluster") di ENEA Casaccia. Per redigere la proposta è stato definito lo stato di partenza dell'uso dell'energia nei diversi edifici sperimentatori. Sono stati quindi definiti la quantità di energia elettrica utilizzata per persona e per superficie di ogni singolo edificio: tali dati serviranno come base di riferimento per poi considerare l'efficacia della campagna di sensibilizzazione. Il programma di engagement si basa essenzialmente su una competizione tra pari: gli utenti degli edifici pilota saranno messi a confronto in una gara di sostenibilità. Si propone di articolare la gara in tre diverse competizioni, ognuna delle quali si focalizza su aspetti della sostenibilità diversi, ma comunque circoscritti all'uso dell'energia all'interno degli edifici per uffici.

La prima gara prende come riferimento il valore di kWh/m^2 di energia elettrica medio dei diversi edifici relativo alla fase di riferimento (valore precedente all'inizio della sperimentazione, in modo tale da poter considerarlo considerare come benchmark) e sulla base di questo valore calcolare i kWh risparmiati, come differenza tra il valore consumato nel mese di riferimento e il valore di benchmark.

La seconda competizione invece si basa condizioni climatiche dell'ambiente interno che determinano il benessere degli impiegati in ufficio e la loro produttività. L'obiettivo è quello di mostrare come chi ottiene le migliori condizioni interne oltre a lavorare meglio è in grado anche di risparmiare energia.

Nella terza sfida invece, l'andamento settimanale del loro uso di energia verrà comparato e verrà definito un profilo di occupazione relativo al loro edificio, definendo gli utenti come "virtuoso" (uso cosciente dell'energia), "medio"(uso nella media) ed "energivoro" (uso intensivo dell'energia).

Sviluppo ed implementazione algoritmi di trend detection

In questa annualità, la ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di una metodologia e di algoritmi per l'individuazione di trend anomali di energia termica per il cluster di edifici nel Centro ENEA della Casaccia. L'obiettivo è stato quindi individuare un procedura di analisi che consentisse di analizzare e riconoscere in modo automatico la forma (o l'aspetto) del profilo giornaliero di energia termica di un edificio al fine di individuare anomalie nelle proprietà di sviluppo nel tempo della richiesta energetica ossia del "trend".

La prima fase del processo sviluppato ha avuto l'obiettivo di individuare profili di consumo giornalieri caratteristici o tipici e cioè privi di anomalie (fault free) e tali da rappresentare trend di "riferimento" o di "benchmark" rispetto ai quali individuare la condizione di anormalità del trend di profilo temporale di consumo energetico. A tal fine sono state condotte dapprima opportune analisi di "data preparation " su data set caratterizzati da valori con frequenza oraria di potenza termica media, e di variabili al contorno. Sono state effettuate analisi di statistica

descrittiva al fine di individuare correlazioni tra le variabili, range di variazione, frequenze di accadimento e analisi di visualizzazione.

Per poter individuare i profili di riferimento è stata condotta un'analisi di clustering con un algoritmo del tipo k-means con il fine di individuare gruppi di giorni simili rispetto al profilo orario giornaliero di potenza termica media per il riscaldamento ambientale. Al fine di individuare le variabili rispetto alle quali condurre il processo di classificazione non supervisionata sono stati individuati 5 diversi fattori adimensionali capaci di rappresentare in maniera sintetica la forma di un profilo giornaliero di potenza media oraria. Tali fattori hanno un valore variabile tra 0 e 1 e sono caratterizzati dal rapporto tra potenze o energie medie su base giornaliera. L'algoritmo k-means si è dimostrato particolarmente efficace nell'individuare attraverso i 5 fattori sopra descritti i cluster di profili tipici di consumo per i giorni feriali e per i giorni festivi. In Figura 370 sono rappresentati i profili di potenza simili raggruppati in un cluster.

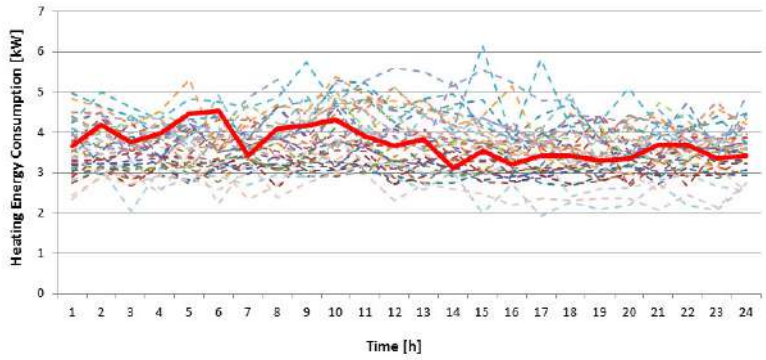


Figura 370. Individuazione dei profili di potenza media oraria su base giornaliera all'interno di un cluster con evidenza del profilo di benchmark

Per ogni cluster di profili è stato poi individuato un profilo medio di riferimento o di benchmark privo di anomalie (corrispondente a un giorno reale del data set). La fase successiva è consistita nello sviluppo di un classificatore del tipo CART (classificazione and regression tree) che permettesse di individuare uno dei cluster di profili a cui associare il profilo di testing sulla base di variabili rappresentative (predittori) stimando la variabile categorica legata al cluster (*cluster n°*).

Una volta individuato il profilo di benchmark con la sua incertezza relativa, l'analisi di trend detection si basa sulla valutazione di due diversi indicatori attraverso i quali è possibile definire e quantificare la potenziale anomalia di trend. Il primo indicatore prevede il calcolo della norma dei residui e fornisce indicazioni circa lo scostamento dei valori assoluti di potenza termica assunti del profilo di testing. Il secondo indicatore invece si basa sulla valutazione dell'angolo di incidenza per ogni ora tra il profilo di testing e il profilo di riferimento. L'opportunità che per ogni ora possano verificarsi o andamenti opposti tra il profilo di benchmark e il profilo di testing (per esempio uno decrescente e l'altro crescente) o andamenti divergenti (stesso segno dei coefficienti angolari dei profili ma valori diversi) si manifesta attraverso questo secondo indicatore.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/026.

c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Scienze Chimiche

Nell'ambito della ricerca sui diodi organici ad emissione di luce (OLED) l'attenzione si sta via via focalizzando sul design di nuove molecole organiche da utilizzare come strato attivo elettroluminescente in grado di dare dispositivi con caratteristiche sempre migliori in termini di efficienza e intensità della radiazione emessa. Recentemente particolare attenzione è stata rivolta ai complessi ionici di metalli di transizione in quanto esibiscono elettroluminescenza per fosforescenza con resa quantica teorica del 100%, e possono essere impiegati in dispositivi di tipo LEEC (celle elettrochimiche ad emissione di luce) che prevedono tempi e costi di realizzazione minori rispetto agli OLED a parità di efficienza.

Pertanto, il lavoro sperimentale svolta dal Dipartimento di Scienze Chimiche è stato basato su:

- design, sintesi e caratterizzazione spettroscopica di leganti diidroisochinolinici ispirati alle melanine
- design, sintesi e caratterizzazione spettroscopica di complessi ionici dell'iridio(III) ottenuti con i leganti

sintetizzati;

- studio delle proprietà foto-fisiche dei complessi ottenuti;
- fabbricazione e caratterizzazione di dispositivi LEEC ottenuti con i complessi sintetizzati.

In particolare, è stato sintetizzato il legante diidroisochinolinico DHQ a partire da un derivato della dopammina, precursore monomerico del polimero melanico polidopammina. Il legante è stato completamente caratterizzato spettroscopicamente mediante analisi NMR e LDI-MS.

Successivamente il legante DHQ è stato impiegato per la sintesi del complesso dell'Iridio(III) come descritto in Figura 371. Anche in questo caso il complesso è stato completamente caratterizzato spettroscopicamente mediante analisi NMR e LDI-MS.

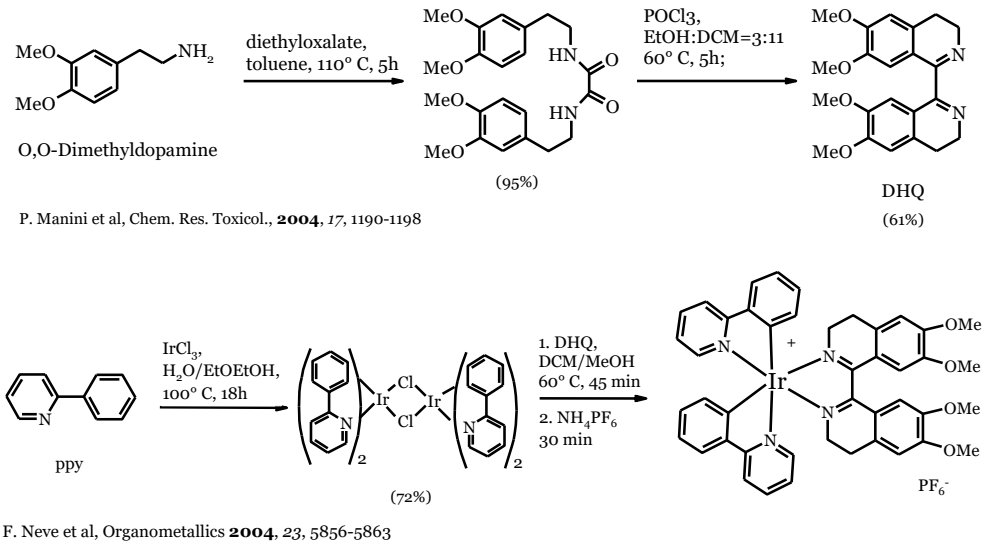


Figura 371. Sintesi del complesso dell'Iridio(III)

Dall'analisi degli spettri UV-vis e di fluorescenza (Figure 372 e 373) è stato possibile osservare che: a) il complesso esibisce sia in soluzione sia come film sottile due massimi di assorbimento a 370 e 450 nm con coefficienti di estinzione molari elevati; b) lo spettro di emissione in soluzione dipende in maniera significativa dalla presenza dell'ossigeno; c) il complesso deposto come film sottile emette nel rosso a 650 nm. Presso i laboratori del C.R. ENEA di Portici, il complesso sintetizzato è stato quindi testato come materiale elettroluminescente in dispositivi di tipo LEEC

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/028.

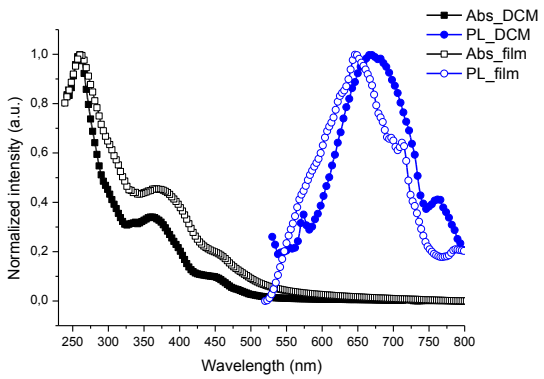


Figura 372. Spettri di assorbimento e emissione del complesso dell'iridio(III) sintetizzato in soluzione deareata e in film sottile

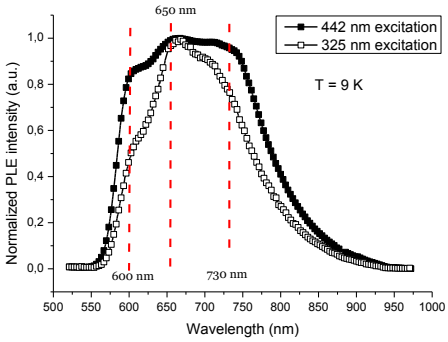


Figura 373. Spettri di emissione del complesso dell'iridio(III) sintetizzato a bassa temperatura (9 K).

Politecnico di Milano, Dipartimento Design

Le attività si sono concentrate su due tematiche principali: le implicazioni dell'illuminazione al fine di garantire sicurezza, benessere e in generale cercare di migliorare la qualità della vita degli anziani nel proprio ambito familiare e domestico (considerando il fenomeni dell' "aging in place" e dell' "active aging") e individuare potenziali temi di ricerca e di sviluppo; identificazione e definizione di una serie di scenari e atmosfere di luce volte al benessere e al comfort nell'ambito lavorativo con lo scopo di sviluppare dei prototipi di studio che siano poi utilizzabili per test sperimentali effettuati sul campo.

Entrambe le attività sono state sviluppate mediante un'approfondita analisi e revisione della letteratura scientifica esistente e selezionando i risultati e le conclusioni più significative tramite l'elaborazione di una serie di linee-guida e di una serie di concept, ipotesi e scenari progettuali.

Relativamente alla prima tematica, la ricerca si ispira al metodo della progettazione basata au prove di efficacia (EBD, evidence-based design) e consiste nella definizione di ipotesi e scenari progettuali a partire da un approfondito processo di ricerca di fonti scientifiche credibili tramite la valutazione e l'uso sistematico dei risultati di tali studi. L'approccio enfatizza dunque la possibilità di utilizzare i risultati di studi scientifici precedenti, identificati, analizzati e incrociati, al fine di influenzare il processo di design. La ricerca si articolata in quattro fasi;

- approfondita analisi e revisione della letteratura scientifica esistente;
- selezione dei risultati e delle conclusioni più significative tramite elaborazione di una serie di linee-guida;
- definizione di una serie di concept, ipotesi e scenari progettuali;
- monitoraggio preliminare dell'impatto dei concept mediante un'indagine.

La fase di monitoraggio ha previsto una preliminare selezione di un numero di partecipanti in grado di dare un giudizio sia sullo stato dell'arte dell'illuminazione esistente nel loro ambiente domestico, sia ad un'investigazione qualitativa in forma di questionario e di intervista sulle preferenze relative ai concept precedentemente elaborati. Questa fase ha permesso monitorare il modo in cui nuovi scenari, prodotti, sistemi e servizi di illuminazione siano percepiti in termini di opportunità nell'ambito domestico dal target di riferimento.

Questa fase non ha lo scopo di essere esaustiva o di avere una valenza statistica ma piuttosto di rivelare i bisogni, le motivazioni e le barriere in materia di illuminazione domestica per una corretta transizione nella terza età. I valori e i disvalori percepiti dagli utenti, coinvolti nelle fasi preliminari di sviluppo della ricerca e della progettazione, diventano essenziali sia per poter sviluppare una prima discussione sul tema sia per poter avere dei feedback interessanti per eventuali fasi successive di sviluppo che esulano la presente ricerca. Questo approccio è proprio di un design partecipativo, iterativo e user-centered.

Un'altra fase dell'attività ha riguardato l'elaborazione di una serie di scenari di illuminazione di uffici, le cui caratteristiche specifiche sono state selezionate e approfondite nella progettazione di due sistemi di illuminazione con prestazioni e caratteristiche molto diverse tra di loro. In particolare sono stati individuati tre scenari:

- Scenario 1: Bio-inspired office lighting atmosphere
  Il focus di questo scenario è la salute psicologica degli individui: si prevede che la luce sia dinamica, ovvero mutevole e in grado di generare atmosfere luminose differenti che si adattino a differenti situazioni lavorative come attività solitarie creative di concentrazione o di relax e decompressione, come pure ad attività di lavoro collettivo di riunione, presentazione, brainstorming, ecc. L'illuminazione dovrebbe essere dunque in grado di supportare i diversi momenti lavorativi durante la giornata al fine di adattarsi al contesto

e all'umore del soggetto.

- Scenario 2: Luminous officescape
  Il focus di questo scenario è definire nuovi sistemi di illuminazione integrati negli arredi e in nuovi oggetti luminosi volti a definire un sistema di illuminazione che modifichi l'atmosfera luminosa ma anche lo spazio fisico dell'ufficio. Si pensi dunque ad una luce che modifica il vissuto architettonico contribuendo alla definizione di spazi personali e collettivi (ad esempio separatori, paratie e divisori) e contribuendo al benessere dell'individuo mediante l'illuminazione.
- Scenario 3: Sensing at work
  Il focus di questo scenario è l'illuminazione digitale e le nuove modalità di controllo e gestione. Si ipotizza un ambiente ufficio costellato di sensori, sia personali e indossabili (ad esempio Smartphone e Smartwatch), sia collocati nello spazio ufficio al fine di monitorare le attività, le situazioni, le condizioni climatiche (intese come temperatura e qualità dell'aria) e l'atmosfera luminosa (quantità di luce, qualità della luce, distribuzione spettrale, ecc.), in real-time, per poi poter utilizzare queste informazioni per migliorare la qualità della vita nel contesto ufficio, per diminuire i consumi e per personalizzare l'ambiente (soprattutto luminoso) in base alle specifiche esigenze dell'individuo.

Riprogettazione del sistema di illuminazione COOELO

Tenendo ben presente tutti gli aspetti precedentemente definiti si è quindi giunti alla progettazione di due differenti sistemi di illuminazione. Il primo, COOELO, pone il focus su un aspetto tecnologico (fosforo remoto) e sulle tecniche di prototipazione rapida, quali validi strumenti per la costruzione di prototipi funzionali di dispositivi che potrebbero essere preliminari nei processi di produzione seriale e industriale. Oltre a ciò è un esempio di illuminazione bio-inspirata, sia nelle possibilità di cambiamento dinamico dell'illuminazione, sia nella definizione di pattern di luce e ombre, sia nelle caratteristiche geometriche e formali.

Si tratta di un prodotto che assolve ai requisiti della norma per la progettazione degli interni, ma allo stesso tempo tiene in considerazione anche aspetti di comfort e di benessere (ad esempio non realizza solo una illuminazione diretta finalizzata alla riduzione dei consumi elettrici, ma offre anche un'illuminazione indiretta molto apprezzata dagli utenti). Il progetto nasce da una rivisitazione di una precedente ricerca svolta per ENEA (con applicazioni diverse dal presente target) con lo scopo di arrivare ad un prototipo in tempi rapidi e dal costo contenuto. Per quanto riguarda gli aspetti di variabilità e flessibilità, il sistema progettato offre un'emissione luminosa diretta e indiretta con possibilità per l'utente di regolarne l'intensità e la tonalità della luce in un intervallo di temperatura correlata di colore tra 3000K e 5000K.

Progettazione del sistema di illuminazione Asterism

Il secondo progetto, Asterim, pone l'accento sugli aspetti legati all'impatto che le nuove tecnologie e l'organizzazione dei lavoro hanno sugli spazi, sugli individui e, come conseguenza, sui sistemi di illuminazione. Anche per questo sistema il progetto ha fatto ampio ricorso a tecniche di prototipazione rapida e a componenti disponibili sul mercato, in modo da contenere i costi in attrezzature di produzione.

Gli scenari di illuminazione immaginati e prototipabili tramite Asterism sono i seguenti:

- Scenario 1 – Workshop: illuminazione estesa diretta e indiretta per il lavoro in team;
- Scenario 2 - Focus: illuminazione focalizzata diretta e indiretta per il lavoro individuale;
- Scenario 3 - Haven: illuminazione diretta per la concentrazione e privacy;
- Scenario 4 - Relax: illuminazione indiretta per il relax (con eventuale modulo ART).

L'apparecchio è stato progettato pensando ad un sistema destrutturato e capace di evolversi in diverse forme e configurazioni. A differenza di un sistema di illuminazione monoblocco si è progettato un sistema costituito da diversi moduli funzionali che garantiscano la massima flessibilità di installazione, composizione e utilizzo. Asterism è stato concepito in modo da includere diverse possibilità di controllo e di variazione luminosa in un unico sistema di illuminazione da ufficio. Il concetto di modularità garantisce la possibilità di ottenere configurazioni diverse adattabili alle diverse possibili configurazioni delle postazioni e dei luoghi di lavoro.

Il sistema è articolato con una struttura portante, a cui sono connessi i sistemi di illuminazione diretta e indiretta come una costellazione di elementi luminosi, le cui caratteristiche sono gestibili separatamente e dunque in grado di soddisfare diversi scenari di illuminazione. Il sistema offre dunque un'illuminazione diretta/indiretta che può essere personalizzata non solo in termini di intensità e temperatura correlata di colore (3000K÷6500K), ma anche dal punto di vista della distribuzione spaziale del flusso luminoso sul compito visivo e sul soffitto.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/030.

Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria industriale

Le attività svolte nell'ambito della presenta annualità sono volte a valutare gli effetti della luce sugli esseri umani, e ha come oggetto la valutazione degli stimoli circadiani e della qualità della luce incidente agli occhi in uffici con diversi orientamenti, in cui è presente la luce naturale.

L'approccio proposto sposta l'attenzione dei progettisti dalle zone corrispondenti ai compiti visivi in cui, in accordo con gli standard normativi, occorre garantire assegnati valori di illuminamento, verso grandezze da valutare in corrispondenza degli occhi degli osservatori.

Per calcolare la "luce circadiana" e gli effetti che questa può produrre sugli individui, è stato quindi necessario misurare le irradianze spettrali a livello degli occhi. Le sperimentazioni sono state condotte a Napoli in diverse stagioni (estate, autunno, inverno e primavera) in tre uffici esposti a Sud, Est ed Ovest, con l'obiettivo finale di effettuare un confronto sulla qualità della luce in uffici con differenti orientamenti ed al variare delle stagioni, e valutandone le conseguenti stimolazioni circadiane. Un ulteriore obiettivo è stato quello di indicare un protocollo sperimentale per un confronto tra località a diverse latitudini (prima di tutte la sede ENEA di Ispra) con differenti climi luminosi, per individuare possibili analogie e diversità che in futuro potranno risultare utili nella pratica progettuale.

Gli uffici oggetto delle misurazioni sono situati al settimo piano di una delle sedi del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. La strumentazione utilizzata consiste di uno spettroradiometro modello CS 2000, un luxmetro modello T-10 e uno spettrofotometro modello CM-2600d prodotti dalla Konica Minolta.

Durante ciascuna stagione le misurazioni sono state effettuate in diversi giorni ogni ora dalle 10:00 alle 18:00. Tra i dati raccolti per ciascun giorno di misurazione vi sono:

- illuminamenti globali all'esterno (misurati sul tetto dell'edificio) e sulla scrivania
- temperature di colore del cielo
- distribuzioni spettrali del cielo.

Per le misure a livello degli occhi, lo spettroradiometro è stato posizionato alla altezza della testa di una persona seduta alla scrivania (1.20 m) e le misure sono state effettuate ogni ora con diversi angoli di inclinazione dello strumento: 0°, 15° e 45° sul piano verticale e 45° a destra e a sinistra sul piano orizzontale, allo scopo di simulare i movimenti della testa di una persona.

I dati raccolti a livello degli occhi includono: illuminamenti, temperature di colore e irradianze spettrali. Queste ultime sono state poi mediate per ottenere delle irradianze medie a livello degli occhi, che sono state poi utilizzate per calcolare la corrispondente soppressione di melatonina tramite il modello di fototrasduzione circadiana proposto da Rea [rapporto RdS/PAR2014/031].

I risultati delle misure effettuate hanno consentito di trarre le considerazioni riportate nel seguito:

- Le variazioni stagionali riscontrate nei tre uffici sono differenti in quanto dipendono dall'orientamento delle finestre e spesso non seguono l'andamento degli illuminamenti su piano orizzontale misurati all'esterno. Ad esempio per l'orientamento verso Sud, i massimi valori, conseguiti a metà della giornata, si ottengono nella stagione invernale, in quanto il disco solare è più basso e gli illuminamenti all'interno sono più elevati.
- Le variazioni giornaliere sono fortemente legate all'orientamento. Per l'ufficio esposto ad Est si riscontrano stimoli circadiani più elevati nelle ore del mattino, per quello esposto ad Ovest ciò si verifica nel pomeriggio; pertanto tale orientamento potrebbe non favorire i naturali ritmi circadiani.
- In condizioni di cielo sereno i valori di CS (stimolo circadiano) sono sempre molto elevati, tranne che nelle ore corrispondenti al tramonto del sole. Ciò significa che gli occupanti degli ambienti, in tali condizioni, possono fare a meno di integrazioni di illuminazione artificiale per sincronizzare i ritmi circadiani, indipendentemente dai valori di illuminamento sul compito visivo.
- In tutti gli uffici gli illuminamenti rilevati in corrispondenza degli occhi e quelli misurati sulla scrivania sono confrontabili e presentano lo stesso andamento.
- La distribuzione spettrale della radianza della porzione di cielo vista dalla finestra cambia al variare dell'ora del giorno e della stagione, nonché dall'orientamento. I valori sono compresi in un intervallo molto ampio: da poco più di 5000 K fino ad oltre 18000 K.
- La distribuzione spettrale dell'irradianza in corrispondenza degli occhi presenta anch'essa delle variazioni al variare dell'ora del giorno, della stagione e dell'orientamento, ma le variazioni, espresse sinteticamente in termini di temperatura di colore, sono molto più contenute e nella quasi totalità dei casi comprese tra i 4000 K ed i 6000 K.

- Sia l'ambiente esterno che quello interno possono modificare la distribuzione spettrale della radiazione proveniente dalla volta celeste. In altre parole la geometria, le dimensioni ed il colore delle ostruzioni esterne e le caratteristiche delle finiture dell'ambiente interno possono modificare lo spettro della radiazione che incide agli occhi.
- Nella sperimentazione presentata il vetro ha un comportamento neutro, ma sarebbe interessante indagare sull'influenza di vetri e più in generale di sistemi schermanti selettivi.
- I risultati ottenuti non sono generalizzabili e pertanto sono necessarie delle campagne di acquisizione dati, considerando anche altri climi luminosi e diverse condizioni meteo "tipiche" di diverse località.
- Se si confermasse una scarsa variabilità nella temperatura di colore agli occhi degli occupanti, si potrebbero proporre delle procedure semplificate per la stima della "luce circadiana" basate sull'utilizzo dei software attualmente disponibili.
- Il modello proposto da Rea non è l'unico e non è detto che in seguito ad ulteriori ricerche possa essere modificato: tuttavia è confermato che per affrontare questa tematica è necessaria la valutazione dell'irradianza spettrale agli occhi. La procedura di misura e le considerazioni sui parametri sintetici e sulle grandezze fotometriche rimangono quindi valide indipendentemente dalle future scoperte scientifiche.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/031.

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Il presente lavoro prosegue gli studi svolti gli anni precedenti approfondendo l'indagine su come la composizione spettrale della radiazione luminosa influenzi le capacità cognitive umane, focalizzando l'attenzione sulla vigilanza; lo studio è stato inoltre esteso all'effetto dell'illuminazione sul sonno, indagando se l'esposizione alle sorgenti LED influenzi la sonnolenza ed il sonno notturno.

Il lavoro si compone di due indagini sperimentali in cui, utilizzando lo stesso protocollo, le stesse funzioni, con differenti scenari luminosi, in un primo esperimento (E1) vengono confrontati gli effetti prodotti da un'illuminazione LED neutra con quelli prodotti da lampade alogene, mentre in un secondo esperimento (E2) la stessa analisi viene ripetuta confrontando due illuminazioni LED, una con temperatura correlata di colore (CCT) fredda e l'altra calda.

Lo studio sulla vigilanza è stato svolto utilizzando un test cross-modale, nel quale i partecipanti hanno eseguito contemporaneamente un compito di vigilanza visiva ed un compito di vigilanza acustica. Gli stimoli visivi consistevano in un quadrato rosso (RGB: 255,0,0) ed un quadrato verde (RGB 0,192,0), entrambi di lato 3 cm, presentati a monitor in sequenza alternata, mentre gli stimoli acustici consistevano in due suoni differenti, uno basso a 1000 Hz ed uno acuto ad 2000 Hz, della stessa intensità (60 Db) emessi da due casse poste ai lati del monitor, con una sequenza alternata. Il compito del soggetto era rispondere, cliccando il tasto sinistro del mouse il più velocemente possibile, quando gli veniva presentato lo stimolo bersaglio che consisteva nella ripetizione di un quadrato con lo stesso colore (rosso-rosso ovvero verde-verde) o di un suono con lo stesso tono (1000 Hz-1000 Hz ovvero 2000 Hz-2000Hz).

Lo studio sul sonno è stato svolto utilizzando 3 questionari validati a livello internazionale. Il Diario del Sonno consisteva in una serie di domande che servono a valutare la quantità e la qualità del sonno del soggetto nella notte precedente l'esperimento; il questionario denominato Karolinska Sleepiness Scale (KKS) è stato utilizzato per valutare il livello di sonnolenza dei soggetti in specifici momenti della giornata; il questionario denominato Global Vigor Affettive Scale (GVAS) è stato utilizzato per valutare il livello generale di attivazione.

Entrambi gli esperimenti sono stati svolti all'interno del Laboratorio di Illuminotecnica del Dipartimento DIAEE dell'Università Sapienza, dove è stata allestita una cabina sperimentale per lo studio delle sorgenti luminose artificiali. La cabina, di dimensioni 3,6 x 2,4 m e altezza 3 m, non è dotata di finestre per escludere l'ingresso di luce naturale ed ha i muri interni rivestiti di cartoncino nero opaco per limitare l'effetto della riflessione luminosa. Le due condizioni luminose dell'esperimento E1 consistevano in un'illuminazione sperimentale fornita da un apparecchio LED avente una CCT di 4000 K, ed un'illuminazione di controllo realizzata con 6 lampade alogene poste in corrispondenza del perimetro del LED, aventi una temperatura di colore di 2800 K. Nell'esperimento E2 sono stati confrontati due scenari luminosi prodotti ciascuno con un apparecchio LED, con temperatura di colore 6800 K nel caso della condizione sperimentale e 3000K nel caso della condizione di controllo. Le curve di emissione delle due sorgenti utilizzate nell'esperimento E1 e nell'esperimento E2 sono riportate nei grafici di Figura 374.

L'illuminamento (E) sul piano di lavoro e l'informazione luminosa ricevuta dall'occhio dei partecipanti nei due scenari luminosi di ciascun esperimento sono riportati nelle Tabelle 106 e 107.

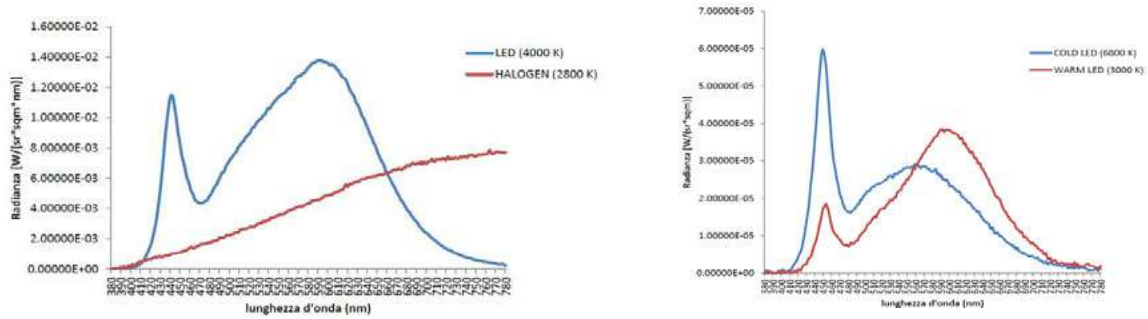


Figura 374. Emissione spettrale delle sorgenti utilizzate nell'esperimento E1 e nell'esperimento E

Tabella 106. Illuminamento sul piano di lavoro

	ESPERIMENTO 1		ESPERIMENTO 2	
Sorgenti	LED 4000 K	ALOGENE 2800 K	LED 6800 K	LED 3000 K
E min (lux)	119	102	413	408
E med (lux)	139	144	441	446
E max (lux)	156	174	505	528

Tabella 107. Illuminamento e luminanza all'occhio

	ESPERIMENTO 1		ESPERIMENTO 2	
Sorgenti	LED 4000 K	ALOGENE 2800 K	LED 6800 K	LED 3000 K
E (lux)	90	100	289	288
L (cd/m2)	2,5	3,4	1,8	1,9

I due esperimenti sono stati svolti seguendo la stessa procedura, con l'unica differenza negli scenari luminosi utilizzati. Quaranta volontari, in egual numero maschi e femmine, con età media compresa tra i 18 ed i 35 anni hanno preso parte a ciascun esperimento, per un totale di 80 partecipanti.

Prima dell'inizio dell'esperimento ciascun soggetto è stato assegnato in modo casuale al gruppo sperimentale (GS) o al gruppo di controllo (GC), che differivanounicamente per le condizioni luminose con cui veniva eseguito il test. Il gruppo di controllo ha eseguito tutte le fasi della sperimentazione con luce calda (E1: alogena; E2: LED 3000 K), mentre il gruppo sperimentale ha svolto solamente la sessione base con luce calda: dall'inizio della pausa e per tutta la sessione test il GS ha svolto i compiti rispettivamente, con la luce neutra nell'E1 (LED 4000 K), e con luce fredda nell'E2 (LED 6800 K).

I soggetti hanno compiuto una sessione base (SB) nella quale hanno eseguito il compito di vigilanza cross-modale al computer della durata di circa 15 minuti, seguita da una pausa di 20 minuti durante la quale hanno compilato i questionari cartacei KSS e GVAS, e da una sessione cognitiva (SC) sempre di 15 minuti nella quale i soggetti hanno ripetuto il compito di vigilanza cross-modale al computer; al termine della SC sono stati nuovamente compilati i questionari cartacei KSS e GVAS. Ai soggetti è stato inoltre chiesto di compilare nuovamente i due questionari cartacei altre tre volte ad orari fissi durante la giornata del test (alle 15:00, alle 18:00 e alle 21:00).

Tabella 108. Protocollo sperimentale

		SESSIONE BASE	**PAUSA**	**SESSIONE COGNITIVA**	**FINE**
Compiti		**Vigilanza cross-modale**	**KSS, GVAS**	**Vigilanza cross-modale**	**KSS, GVAS**
E1	GS	alogene	LED 4000K	LED 4000K	LED 4000K
	GC	alogene	alogene	alogene	alogene
E2	GS	LED 3000 K	LED 6800K	LED 6800K	LED 6800K
	GC	LED 3000 K	LED 3000 K	LED 3000 K	LED 3000 K

La vigilanza

I risultati dei test cognitivi sono stati ottenuti dal calcolo dei tempi di reazione medi nelle prove di vigilanza,

considerando separatamente le risposte agli stimoli visivi da quelle relative agli stimoli acustici; i risultati ottenuti nei primi 6 minuti sono stati confrontati con quelli degli ultimi 6 minuti in un'analisi ANCOVA Gruppo (GC vs. GS) x Tempo (6 minuti iniziali vs. 6 minuti finali), utilizzando i tempi di risposta della SB come covariata.

Esperimento E1. Nel caso degli stimoli visivi, i valori medi dei tempi di reazione della sessione cognitiva sono risultati aumentati negli ultimi 6 minuti rispetto ai 6 minuti iniziali per il gruppo di controllo, mentre sono diminuiti per il gruppo sperimentale (Tabella 109) i risultati dell'analisi statistica hanno mostrato l'esistenza di un effetto significativo di Gruppo ($F_{1,33}$=3,69; p=0,06), confermando l'esistenza di una differenza tra il GS ed il GC nella sessione cognitiva; tuttavia non è stato trovato nessun effetto di Tempo ($F_{1,33}$=1,49; p=0,23), o di interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,33}$=1,67; p=0,21).

Tabella 109. E1: tempi medi di reazione agli stimoli visivi (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	489,13 ms (8,73)	597,13 ms (8,72)
Gruppo Sperimentale	476,23 ms (8,73)	465,54 ms (8,72)

Anche nel caso degli stimoli acustici, il confronto dei tempi medi di reazione dei primi minuti rispetto agli ultimi minuti nella sessione cognitiva ha mostrato una maggiore velocità del GS e una minore velocità del GC col passare del tempo (Tabella 110); in questo caso la differenza tra i tempi medi di reazione nei due gruppi non è risultata significativa, in quanto l'analisi statistica non ha mostrato alcun effetto di Gruppo ($F_{1,33}$=2,92; p=0,10), né di Tempo ($F_{1,33}$<1), né un'interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,33}$=1,50; p=0,23).

Tabella 110. E1: tempi medi di reazione agli stimoli acustici (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	437,50 ms (7,79)	448,65 ms (7,70)
Gruppo Sperimentale	409,85 ms (7,79)	403,71 ms (7,70)

Esperimento E2. I risultati della vigilanza visiva hanno mostrato che i partecipanti del gruppo di controllo hanno eseguito la prova nella sessione cognitiva più lentamente negli ultimi 6 minuti rispetto ai 6 minuti iniziali, a differenza del gruppo sperimentale in cui la velocità nei tempi di reazione è rimasta pressoché costante (Tabella 111). L'analisi statistica non ha evidenziato l'esistenza di effetti significativi di Gruppo ($F_{1,36}$<1) o di Tempo ($F_{1,36}$<1); è risultato invece significativo l'effetto di interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,36}$=5,38; p=0,03). I risultati del test Newman-Keuls hanno mostrato come la differenza tra i tempi di reazione del GS nella sessione cognitiva sia significativa rispetto ai tempi di reazione del GC nella stessa sessione e rispetto ai tempi di reazione avuti dallo stesso GS nella sessione base.

Tabella 111. E2: tempi medi di reazione agli stimoli visivi (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	470,20 ms (7,85)	494,76 ms (8,98)
Gruppo Sperimentale	491,14 ms (7,85)	491,44 ms (8,98)

I risultati riferiti agli stimoli acustici hanno mostrato che i partecipanti di entrambi i gruppi nella sessione sperimentale hanno risposto agli stimoli con tempi di reazione più lunghi nei minuti finali rispetto ai minuti iniziali della prova, come mostrato in Tabella 112; l'analisi ANCOVA indica che non risulta significativo alcun effetto principale, di Gruppo o Tempo, né di interazione Gruppo per Tempo ($F_{1,36}$<1 in tutti i casi).

Tabella 112. E2: tempi medi di reazione agli stimoli acustici (errori standard tra parentesi)

	6 min. iniziali	6 min. finali
Gruppo di Controllo	426,22 ms (6,95)	438,87 ms (8,99)
Gruppo Sperimentale	437,08 ms (6,95)	451,92 ms (8,99)

Il sonno

L'analisi dei risultati sul sonno è stata effettuata calcolando, per ciascuna prova, i valori medi delle scale di autovalutazione della sonnolenza (KSS), di vigore fisico (VIGOR) e di umore positivo (AFFECT), separatamente per il GC e per il GS; successivamente tali valori sono stati sottoposti ad Analisi della Varianza (ANOVA) Gruppo (GC vs. GS) x Prova (pre, post1, post2, post3, post4).

Esperimento E1. Nessun effetto significativo è emerso tra i due gruppi nella scala di sonnolenza KSS (Figura 375a), nella scala di vigore (Figura 375b), né nella scala di umore (Figura 375c), in funzione dell'orario di compilazione. Il livello di sonnolenza dei due gruppi risulta essere uguale, sia prima che dopo la prova cognitiva, subendo un incremento di pari livello: ciò sembra indicare che le due tipologie di sorgenti utilizzate nella Sessione Cognitiva per il GS e per il GC, non esercitino un effetto sulla sonnolenza.

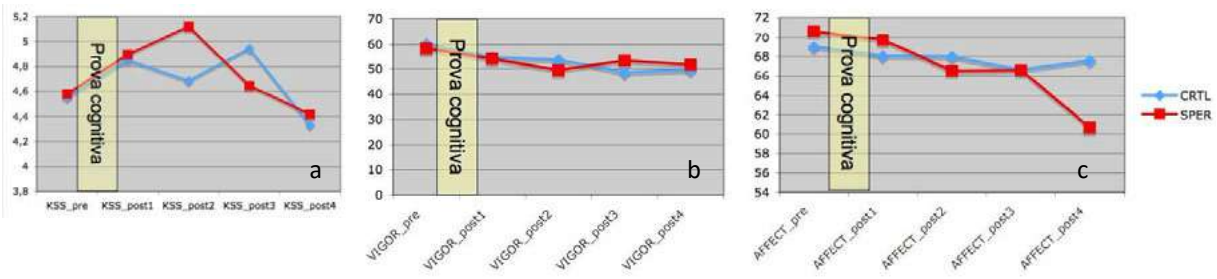


Figura 375. E1: livelli medi di sonnolenza (a), vigore fisico (b), umore (c)

Esperimento E2. I risultati indicano un effetto positivo dell'illuminazione LED fredda, rispetto all'illuminazione LED calda, sul livello di sonnolenza, ma non sul vigore o sull'umore.

L'analisi statistica ha mostrato una tendenza alla significatività per quanto riguarda la scala KSS (Figura 376a) relativamente all'interazione Gruppo x Prova (F=3,62; p= 0,06), che sembra indicare una riduzione della sonnolenza nel GS rispetto al GC immediatamente dopo la prova cognitiva; i confronti post-hoc, effettuati con il test di Scheffè indicano che tale tendenza alla significatività è limitata alla prova post1, mentre nelle ore successive questa tendenza scompare del tutto; se ne deduce un effetto positivo della sorgente fredda di breve durata.

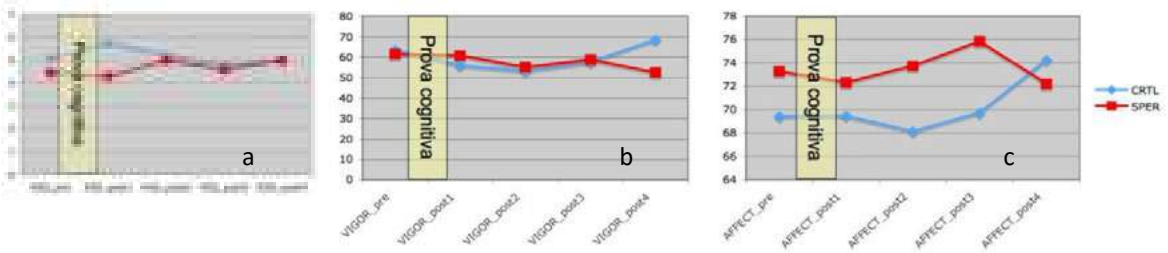


Figura 376. E2: livelli medi di sonnolenza (a), vigore fisico (b), umore (c)

Nessun effetto significativo è emerso invece dall'analisi statistica tra i due gruppi, in funzione dell'orario di compilazione, per ciò che concerne la scala di vigore e la scala di umore (Figure 376b e 376c).

Analisi dei risultati

I risultati ottenuti indicano che l'illuminazione LED esercita un'influenza sulla vigilanza visiva. Il miglioramento delle prestazioni sembra legato alla CCT del LED: come riportato da molti studi internazionali, l'effetto positivo sulle prestazioni si verifica con le sorgenti fredde e non con le sorgenti calde. Concordemente con ciò, nell'E2 è stato osservato un naturale decremento della vigilanza visiva nei soggetti del gruppo di controllo, che invece non è stato riscontrato nei soggetti che hanno svolto il test con illuminazione LED fredda. Sebbene nell'E1 l'effetto non sia risultato significativo, la riduzione dei tempi di reazione nella parte finale del compito nella sessione cognitiva per il GS, costituisce un segnale da tenere in considerazione.

Nessun effetto dell'illuminazione è invece emerso in riferimento alla vigilanza acustica. Nell'E1 è stato osservato una riduzione dei tempi di reazione nella parte finale della prova da parte dei soggetti del GS, ma tale effetto è stato dimostrato non significativo; mentre nell'E2 si è verificato un incremento dei tempi di reazione con

entrambe le condizioni luminose sperimentate.

Dai risultati ottenuti dai test di valutazione soggettiva della sonnolenza, l'illuminazione LED sembrerebbe avere un effetto limitato su tale funzione, senza avere la capacità di influenzare il sonno notturno. L'assenza di un'influenza dell'illuminazione sul sonno è confermata dai risultati del test GVAS, sia per quanto attiene il livello di vigore fisico, che per quanto riguarda l'umore: in entrambi i casi non è stata riscontrata alcuna differenza significativa tra i valori medi indicati dal gruppo sperimentale rispetto a quelli del gruppo di controllo. Solamente nell'esperimento E2 è stato osservato un effetto dell'illuminazione LED fredda sulla sonnolenza, ma limitatamente al tempo di esposizione luminosa, o per il breve periodo seguente; bisogna sottolineare, però, che tale effetto risulta essere di breve periodo, in quanto nessuna differenza significativa è stata osservata tra i due gruppi nelle prove successive post2, post3 e post4 svolte nel pomeriggio e la sera.

La ricerca del 2013 ha dimostrato la capacità dell'illuminazione LED di influenzare positivamente le funzioni esecutive: i risultati dei test svolti hanno indicato che con l'illuminazione LED neutra il cervello è in grado di tenere attive contemporaneamente più di una rappresentazione mentale e di eseguire più processi simultaneamente senza costi temporali. Le tre sperimentazioni condotte sulla vigilanza hanno dimostrato l'esistenza di un effetto positivo dell'illuminazione LED neutra e fredda sulla vigilanza visiva; è stato infatti osservato che, nelle due condizioni luminose sperimentali (LED 4000 K e LED 6800 K), i soggetti non hanno subito il decremento di vigilanza che normalmente si verifica con il passare del tempo durante lo svolgimento del compito, ma hanno registrato tempi di risposta costanti (E2) o addirittura inferiori (studio del 2014 ed E1 anche se statisticamente non significativo).

La motivazione dei risultati ottenuti è presumibilmente legata allo spettro di emissione luminosa delle sorgenti utilizzate nella sperimentazione: l'effetto dell'illuminazione sulle funzioni cognitive sembrerebbe essere dovuto alla percentuale di radiazione blu contenuta nella luce emessa e all'intensità con cui vengono emesse tali lunghezze d'onda.

Negli studi condotti nella presente annualità, l'influenza dell'illuminazione LED sulla sonnolenza risulta prodotta esclusivamente con TCC fredde, essendo stata riscontrata come effetto del LED a 6800 K, ma non con il LED neutro a 4000 K; dai risultati ottenuti l'effetto sembrerebbe inoltre limitato alla durata dell'esposizione e non perdurare nel lungo periodo.

Alla luce dei risultati ottenuti nei tre anni di studi è importante sottolineare la necessità di una corretta gestione dell'illuminazione, sia nell'uso della sorgente luminosa, sia relativamente agli orari di utilizzo, al fine di considerare accanto al comfort visivo e all'efficienza energetica, anche gli effetti prodotti sulla salute.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/033.

Università degli studi di Milano, Dipartimento di Informatica

Le attività sono state volte a verificare se il contesto scenico può modificare la percezione della resa visiva di una sorgente di luce. Lo scopo del lavoro è valutare se questo parametro è rilevante ai fine della valutazione della resa cromatica, poiché, in caso di risposta affermativa, gli indici che verranno sviluppati nel futuro, dovranno tenerne conto. A tale scopo è stato pianificato un esperimento ad hoc ed è stata realizzata una campagna di test.

L'obiettivo è stato stabilire in che misura i cambiamenti del contesto della scena possano alterare la stabilità della resa cromatica sotto un determinato illuminante. Durante il test è stato chiesto agli osservatori di confrontare alcune patch target osservate nel contesto con un insieme di patch di riferimento, e cercare quella maggiormente somigliante. Sono state utilizzate tre variazioni di una famosa configurazione visiva: il contrasto simultaneo di Albers che produce ampie variazioni nell'apparenza di due patch identiche. In questo modo si vuole indagare se, e in quale misura, l'intensità dell'effetto visivo di Albers cambia al variare della sorgente di luce. Sotto una certa sorgente di luce, la configurazione dell'illusione di Albers produce uno spostamento misurabile (shift) dell'apparenza tra le due patch identiche. Ciò significa che due patch identiche appariranno diverse a seconda dello sfondo sopra il quale sono osservate. Il nostro interesse è valutare la direzione e l'intensità di dello spostamento di apparenza.

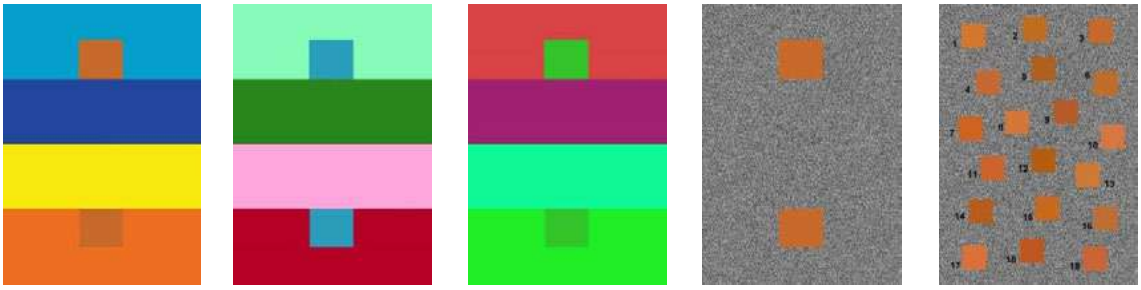
Nell'esperimento, la scena è uniformemente illuminata da sei sorgenti in prova. Scambiare le sorgenti di luce produce un cambiamento globale uniforme della distribuzione della luce della scena. Allo stesso modo, una misura standard dell'indice di resa cromatica descrive le variazioni di resa dei colori che sono considerati a livello globale nella scena. Da questa considerazione nasce l'idea base dell'esperimento.

Se il cambio di apparenza dipendesse esclusivamente dalla composizione spettrale della sorgente di luce che cambia, ci si dovrebbe aspettare una analoga stabile variazione nell'apparenza delle patch di test, a prescindere

dal contesto in cui sono inserite, vale a dire, una variazione molto simile per entrambe le patch della configurazione di Albers, al variare degli illuminanti testati. Al contrario, se variando la sorgente di luce, l'apparenza cromatica delle patch dovesse variare in direzione e intensità diverse a seconda della loro posizione nella configurazione visiva, significherebbe che, non solo lo spettro dell'illuminante ma anche il contesto visivo gioca un ruolo nel modificare l'apparenza finale. Ne segue che anche la configurazione della scena, oltre allo spettro dell'illuminante, dovrebbe essere presa in considerazione nelle prossime generazioni di indici di resa cromatica.

Per lo svolgimento del test sono state utilizzate tre cabine di luce di dimensione 1 m x 1m x 0,8 m, posizionate in modo che effettuando il test in una non sia possibile vedere l'apertura della cabina a fianco.

Sono dunque state create tre versioni a colori diversi dell'illusione di Albers (Figura 377a-c). Inoltre, è stato creato un foglio di controllo, con le due patch nelle stesse posizioni delle configurazioni illusorie, ma su sfondo neutro (Figura 377d, per le patch arancioni), e un foglio contenente i riferimenti (19 patch) con cui confrontare le patch target (Figura 377e, per le patch arancioni). Particolare attenzione è stata posta nella scelta e nel numero delle patch di riferimento. Il rischio di avere poche patch è quello che tutti i risultati, anche se lievemente differenti, ricadano in una stessa classe. Tuttavia, la finalità del test, è quella di valutare le differenze fini. Al contrario, averne troppe rischia invece di confondere il partecipante, allungando inoltre i tempi per lo svolgimento del test.



(a) (b) (c) (d) (e)

Figura 377. Riproduzione delle tre configurazioni illusorie usate nell'esperimento (a-c), foglio con il test di controllo e foglio dei riferimenti per le patch di colore arancione (d, e)

Durante l'esperimento all'interno di ciascun box sono disposti due fogli:

- a sinistra: nella prima parte dell'esperimento vi era il foglio della configurazione illusoria (Albers, Figura 377 a-c) con i campioni target, oggetto del test. Nella seconda parte il foglio con la configurazione illusoria è stato sostituito con il foglio di controllo (Figura 377d per le patch arancioni);
- a destra: foglio con i campioni di riferimento, con cui confrontare i target (Figura 377e).

Agli utenti è stato chiesto di osservare i target del foglio a sinistra, e confrontarli con i riferimenti posti a destra cercando quello che si avvicinava maggiormente come apparenza, sia per le configurazioni illusorie che per i target di controllo.

Sono state testate sei sorgenti luminose disposte a coppie in ciascun box, e solo una alla volta accesa. In Tabella 113 sono mostrate le caratteristiche delle sorgenti.

Tabella 113. Caratteristiche delle sorgenti di luce (light source: LS) usate

	LS 1	LS 2	LS 3	LS 4	LS 5	LS 6
Potenza (W)	11	12	8	23	42	11
Flusso Lum. (Lumen)	650	650	345	1380	630	650
CCT Dichiarato (K)	6400	2700	2700	6400	2700	2700
CCT Effettivo (K)	6336	2667	3156	6790	2695	2739
Tipo	Fluo.	LED	LED	Fluo.	Alogena	Fluo.
CRI Dichiarato	>= 80	N/A	N/A	N/A	N/A	>= 80
CRI Effettivo	84	82	84	81	97	82
x	0,3145	0,4623	0,4236	0,3062	0,4574	0,4624
y	0,3409	0,4106	0,3942	0,3368	0,4056	0,4204

La durata del test per valutare una singola configurazione illusoria, per le sei sorgenti di luce, era di circa 15-20

minuti. Per questo motivo, i partecipanti venivano suddivisi in tre gruppi: alcuni eseguivano il test solo su una configurazione di colori, altri su due, e l'ultimo gruppo su tutte e tre. L'assegnamento ad un gruppo o ad un altro dipendeva dalla disponibilità dichiarata dal partecipante.

In totale hanno partecipato al test 38 persone, con una età compresa tra i 19 a 69 anni, e una media pari a 23,6 anni. Ognuno dei tre colori è stato testato da 19 persone. In particolare, 8 persone hanno svolto il test su tutti e tre i colori, 2 persone su due colori e le restanti 28 hanno fatto l'esperimento su un solo colore. Per ogni patch sotto esame è stata calcolata la media di tutte le patch scelte dai vari osservatori, nello spazio CIELAB. Tale valore rappresenta l'apparenza media della singola patch per un determinato illuminante.

Si è proceduto ad analizzare i dati, per ogni sorgente di luce è stato calcolato lo shift (spostamento nello spazio CIELAB dell'apparenza media rispetto al colore originale) delle quattro patch target (le due nella configurazione illusoria e le due su sfondo neutro). Sono state calcolate le deviazioni standard di un singolo asse (L*, a*, b*) tra gli spostamenti osservati sotto le sei sorgenti di luce. Sono poi state calcolate e riportate le medie delle deviazioni standard sul piano cromatico a*,b*. Infine sono state calcolate e riportate le medie delle deviazioni standard sui tre canali L*, a* e b*.

Le deviazioni standard indicano quanto si disperdono le misure, ovvero permettono di stimarne la variabilità. Una deviazione standard piccola significa che i dati sono più raccolti, una deviazione standard alta significa che i dati sono più dispersi. Calcolare la deviazione standard quindi significa calcolare la dispersione dello shift dell'apparenza quando il target è osservato nel contesto o fuori dal contesto.

In Figura 378 è rappresentato, sugli assi a* e b*, lo shift di tutte e 4 le patch target arancioni, verdi e blu osservate sotto le sei sorgenti luminose. I grafici ci permettono di apprezzare lo shift dell'apparenza dovuto al contrasto di simultaneità cromatico nelle varie configurazioni illusorie. Tale risultato ovvia mente non ci sorprende ma è interessante notare che nel calcolo del CRI standard non si considerano modifiche all'apparenza dovute alla configurazione spaziale, anche se queste, in contesti naturali, sono situazioni quotidiane.

Ciò che più interessa è invece capire se e in che misura si disperde lo shift, cambiando la sorgente di luce. La Tabella 114 riporta le medie delle deviazioni standard su a* e b* e su L*, a*, b*, in modo da poter confrontare in maniera semplice i risultati complessivi dei tre esperimenti (target di colore arancione, verde e blu). In questo modo è più facile valutare eventuali trend comuni.

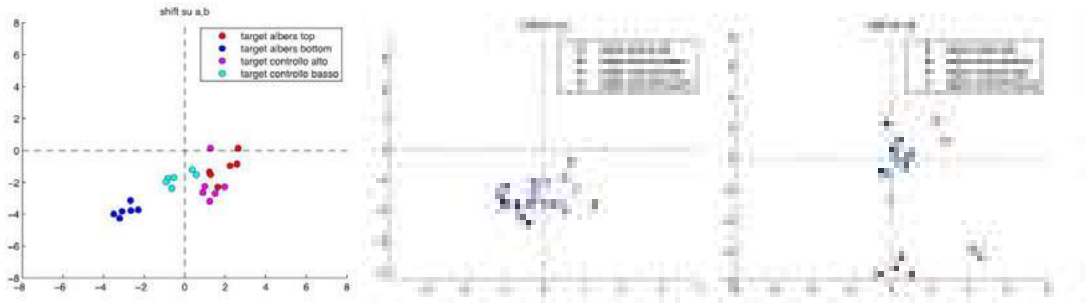


Figura 378. Shift della cromaticità delle patch target arancioni (a sinistra), verdi (al centro) e blu (a destra), sul diagramma a* e b*, rispetto le 6 sorgenti di luce

Tabella 114. Medie delle deviazioni standard calcolate sugli assi a* e b* e sui 3 assi L*, a*, b*, per le tre configurazioni cromatiche

	Patch target arancioni		Patch target verdi		Patch target blu	
	μ(σ(a*), σ (b*))	μ(σ(L*), σ(a*), σ (b*))	μ(σ(a*), σ (b*))	μ(σ(L*), σ(a*), σ (b*))	μ(σ(a*), σ (b*))	μ(σ(L*), σ(a*), σ (b*))
Albers top	0,72	0,79	0,77	0,81	1,44	1,12
Albers bottom	0,40	0,49	0,34	0,30	0,80	0,76
Controllo alto (top)	0,38	0,35	0,38	0,36	1	0,93
Controllo basso (bottom)	0,52	0,43	0,42	0,39	0,78	0,74

È possibile osservare un effetto sistematico della patch Albers top, che è in tutte e tre le configurazioni la patch a maggior contrasto, per la quale si misura la deviazione standard più alta. Questa considerazione riportata nelle osservazioni visive di tutti i giorni potrebbe suggerire che l'effetto di variazione cromatica sui colori percepiti dovuto al cambio dell'illuminante, risulterebbe più imprevedibile per configurazioni visive ad altro contrasto.

Osserviamo inoltre come la deviazione standard, nel caso delle patch target blu, sia sensibilmente più alta (qualche volta anche il doppio), che nei casi con le patch di colore arancioni o verdi. In generale si ha una deviazione standard maggiore nel caso delle patch su configurazione illusoria, rispetto ai casi di controllo. Questo è in linea con le ipotesi iniziali.

I risultati ottenuti dimostrano che l'apparenza del colore percepito dal nostro sistema visivo dipende dal contesto in cui viene osservato e che risulta importante il concetto di località. Il sistema visivo umano non registra in maniera globale e oggettiva la realtà, ma la percepisce in maniera diversa a seconda delle condizioni di illuminazione e della configurazione spaziale della scena osservata.

Poiché gli indici di resa cromatica (CRI) sviluppati finora si basano sul solo spettro dell'illuminante non permettono distinzioni rispetto alla scena illuminata, in secondo luogo, nella maggior parte dei test dei vari CRI proposti in letteratura si considerano configurazioni a basso contrasto con luce uniformemente diffusa.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/032.

Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio - CRIET

Nel corso dell'annualità 2014/2015, l'impegno di CRIET si è sostanziato nella progettazione e nella realizzazione di due iniziative:

1. Creazione di un tool per la validazione dell'audit energetico secondo il modello Lumière
2. Ideazione e realizzazione di 2 giornate formative Lumière.

Il software progettato da CRIET nel corso del 2015 prevede lo sviluppo di un tool informatico grazie al quale si intende favorire il controllo delle prestazioni degli impianti di pubblica illuminazione e, al contempo, fornire uno strumento che consenta di validare l'audit energetico degli impianti di pubblica illuminazione.

Il software, il cui utilizzo è destinato alle amministrazioni comunali, richiede il caricamento (in formato Excel) dei dati di funzionamento del sistema di pubblica illuminazione. Dopo aver valutato la correttezza formale di tali dati, il software acquisisce anche le informazioni relative agli interventi di riqualificazione contenute nell'audit energetico comunale e, dopo aver archiviato i dati in un database dedicato, procede all'elaborazione di alcuni KPI (*Key Performance Indicator*). In questo modo, si mette a disposizione dei responsabili comunali un tool che consente di monitorare le prestazioni degli impianti presenti sul loro territorio e, al contempo, di verificare la bontà degli interventi di efficientamento previsti nell'audit del loro sistema di pubblica illuminazione.

Il secondo task affidato a CRIET prevedeva la progettazione e l'organizzazione di due Giornate Formative Lumière. Sono così stati realizzati due incontri il 16 e 18 giugno rispettivamente a Milano e Pietra Ligure (SV), nel corso dei quali sono stati presentati i progressi e le soluzioni individuate da Lumière al fine di favorire l'efficientamento energetico degli impianti di pubblica illuminazione.

Sviluppo di un tool di validazione dell'audit secondo il Modello Lumière

Sin dalle prime fasi del progetto Lumière, uno dei principali obiettivi individuati dal gruppo di lavoro prevede la progettazione e lo sviluppo di strumenti da mettere a disposizione delle pubbliche amministrazioni allo scopo di monitorare il funzionamento ed i costi connessi con il servizio di pubblica illuminazione.

Nel corso del 2015, CRIET ed ENEA hanno sviluppato un nuovo strumento informatico che offra ai comuni italiani l'opportunità di confrontare le possibili alternative tecnologiche a disposizione per eseguire un efficientamento degli impianti di illuminazione pubblica e, al contempo, di analizzare le prestazioni della rete al termine dei lavori di riqualificazione della stessa. In altri termini, il software progettato nel 2015 vuole consentire ai responsabili comunali di verificare la bontà del progetto di audit, valutandone i possibili vantaggi prospettati e giudicandone complessivamente la qualità.

Il nuovo tool, che si aggiunge alla famiglia City Profiler, bundle di software sviluppati da CRIET ed ENEA allo scopo di fornire un supporto concreto sul tema di illuminazione pubblica alle amministrazioni locali italiane, si prefigge come obiettivo principale l'elaborazione di alcuni KPI (*Key Performance Indicator*) che consentano di ottenere dei giudizi relativi all'audit energetico degli impianti comunali nonché al funzionamento della rete di pubblica illuminazione prima e dopo gli interventi di efficientamento. A tale scopo, il programma acquisisce dei file di input (in formato Excel) contenenti sia le informazioni relative al censimento dei punti luce presenti sul territorio

comunale sia i dati riguardanti gli interventi individuati nel corso dell'audit del sistema di pubblica illuminazione. Verificata la correttezza formale dei dati richiesti, il software procede ad archiviare le informazioni fornite dall'amministrazione comunale ed elabora un cruscotto di indicatori che consenta all'utente di disporre dei risultati ai quali è pervenuto il programma grazie alle informazioni fornite.

Per consentire un utilizzo agevole del tool e consentire di giungere ai risultati attesi, il Team di sviluppo del software ha ritenuto opportuno strutturare lo stesso nei seguenti moduli (Figura 379).

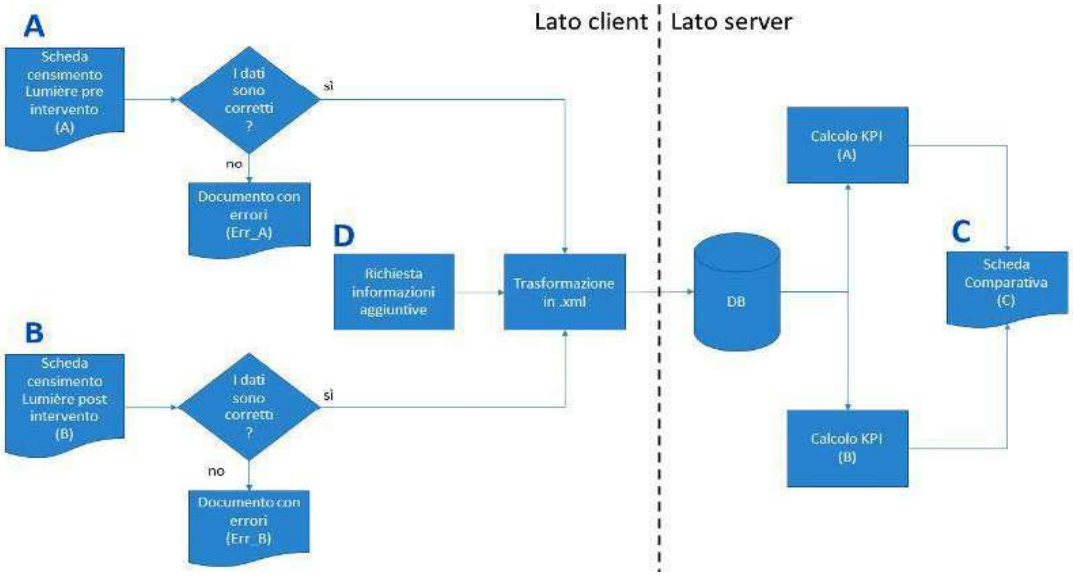


Figura 379. Moduli che compongono la struttura del software 2015

1. Modulo di input relativo all'acquisizione di informazioni ottenute tramite un censimento e una valutazione dello stato dell'arte degli impianti (Modulo A)
2. Modulo relativo all'acquisizione delle informazioni elaborate grazie all'audit energetico degli impianti comunali, all'interno del quale sono fornite informazioni in merito agli interventi di ammodernamento e riqualificazione degli impianti che concorrono a formare il sistema di pubblica illuminazione comunale (Modulo B) Il presente modulo presenta una struttura del tutto identica a quella del modulo precedente. Ovviamente contiene dati diversi, in quanto relativi all'audit energetico del sistema di pubblica illuminazione;
3. Modulo per l'elaborazione di dati di sintesi che consentano da un lato di conseguire valutazioni in merito al funzionamento attuale della rete di pubblica illuminazione e, dall'altro, una stima comparativa in delle prestazioni e dei risparmi conseguibili a seguito della realizzazione degli interventi individuati in sede di audit (Modulo C);
4. Modulo per l'inserimento di Informazioni aggiuntive necessarie per pervenire al calcolo di alcuni indici prestazionali che potranno essere inseriti nella scheda comparativa fornita dal software all'utente al termine dell'elaborazione dei dati (Modulo D).

Con particolare riferimento al Modulo C, il gruppo di lavoro ha ritenuto che i KPI da restituire all'utente affinché possa avere una visione complessiva in merito alla validazione del progetto di audit siano i seguenti:

1. *Power Density Indicator* (PDI) – Il PDI indica la potenza necessaria all'impianto di illuminazione, nel rispetto dei principali requisiti d'illuminazione specificati nella normativa EN 13201-2 "*Performance requirements*".
2. *Annual Energy Consumption Indicator* (AECI) – AECI indica il consumo annuale di energia in un anno specifico in proporzione all'area totale da illuminare.
   Gli indicatori PDI e AECI consentono di confrontare le prestazioni energetiche di differenti soluzioni (impianti di illuminazione stradale) per il progetto di una stessa zona stradale. Per calcolare il potenziale risparmio energetico ottenibile con il miglioramento delle prestazioni energetiche, riducendo così anche l'impatto ambientale, è necessario calcolare entrambi gli indicatori PDI e AECI.
3. *KPI tecnologico* – Esprime la qualità dell'efficienza luminosa [lm/W] della sorgente adottata rispetto al valore minimo previsto per la medesima tecnologia. Consente di constatare la performance luminosa di una determinata sorgente rispetto a quella più efficiente presente sul mercato.

4. *KPI di dimensionamento* – Rivela se la potenza installata per m^2 è all'interno dell'intervallo ammesso per la classe illuminotecnica di riferimento per la zona omogenea considerata. Una zona omogenea è un'area che necessita di uguali prestazioni illuminotecniche per quanto riguarda l'illuminazione artificiale al fine di garantire la sicurezza della circolazione veicolare o pedonale in primis o per altre esigenze. E' di pertinenza del committente l'individuazione delle zone omogenee.
5. *KPI confronto BAT* – Restituisce, sulla base del calcolo illuminotecnico relativo ad una zona omogenea, un'indicazione circa il vantaggio in termini energetici se si utilizzasse una *Best Available Technology* in sostituzione della sorgente installata. La BAT costituisce la migliore tecnologia sul mercato, affiancata anche dall'utilizzo di sistemi di riduzione del flusso in modalità adattiva.
6. *KPI confronto BAU* – Restituisce, sulla base del calcolo illuminotecnico relativo ad una zona omogenea, un'indicazione circa il vantaggio in termini energetici derivanti dall'utilizzo della sorgente installata rispetto all'utilizzo della *Business as Usual*. La BAU costituisce la tecnologia usualmente adottata, affiancata anche dall'utilizzo di sistemi di riduzione del flusso in modalità adattiva.

L'output che il software restituisce all'utente al termine dell'elaborazione delle informazioni acquisite è costituito da una scheda di sintesi, salvabile in locale e stampabile, all'interno della quale sono contenuti i KPI presentati in precedenza. In tal modo, l'amministrazione locale ha la possibilità di verificare sia l'efficienza attuale del proprio sistema di pubblica illuminazione, sia di controllare e validare gli interventi previsti in sede di audit energetico.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/034.

d. Tecnologie per l'industria del freddo

Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Elettronica

L'attività s'inserisce nell'ambito dell'obiettivo d.1 con oggetto lo sviluppo di prototipo di sensore a basso costo per la riduzione dei consumi energetici delle celle frigorifere, che si basa sulla misura della qualità dei prodotti contenuti.

Il controllo delle reazioni biochimiche che intervengono dopo la raccolta è un aspetto fondamentale nei processi industriali di distribuzione della frutta che vanno dalla raccolta, alla conservazione e alla vendita. In particolare, è importante la cosiddetta shelf-life cioè il tempo nel quale il prodotto può essere esposto e venduto senza perdita in termini di qualità e sicurezza.

Indubbiamente i processi che avvengono dopo la raccolta e durante la conservazione comportano una variazione della quantità e del tipo di molecole volatili emessi dai frutti. La maturazione comporta un forte aumento dei composti volatili che diventano caratteristici del frutto stesso. L'etile-2-metilbutirrato ad esempio è un composto odoroso caratteristico delle mele, mentre l'etile-trans-2 cis-4decadienoato fornisce il caratteristico odore delle pere. Anche l'insorgere di difetti spesso comporta una variazione dei composti volatili. L'analisi dei composti volatili consente quindi di determinare sia lo stato di maturazione sia la presenza di difetti. Queste proprietà sono importanti per stabilire il valore commerciale del prodotto, la sua accettabilità da parte del consumatore e la shelf-life.

I sensori di gas sono dispositivi che convertono la interazione con specie volatili in segnali elettronici che possono essere quindi facilmente misurati, analizzati, memorizzati e trasmessi.

Il Gruppo Sensori del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università di Roma Tor Vergata studia da anni sensori basati su metalloporfirine. Le metalloporfirine sono molecole che possono essere sintetizzate allo scopo di esaltare le sensibilità verso differenti famiglie di molecole. Ad esempio, l'inclusione nella molecola di ioni metallici come cobalto o zinco rafforza il legame di coordinazione verso specie donori di elettroni come le ammine, mentre il manganese incrementa l'affinità nei confronti di accettori come gli alcoli.

Il naso elettronico sviluppato può alloggiare fino a dodici sensori del tipo microbilancia al quarzo. I cristalli di quarzo con contatti in oro sono di provenienza commerciale, la loro conversione in sensori chimici avviene dopo la funzionalizzazione con uno strato di materiale assorbente. I sensori sviluppati sono prevalentemente funzionalizzati con un film molecolare di macrocicli pirrolici, in particolare porfirine e corroli.

Le porfirine sono molecole organometalliche formate da un anello aromatico esteso formato da quattro pirroli connessi con ponti metinici. Gli atomi di azoto dei quattro pirroli formano una tasca nella quale possono essere complessati quasi tutti i metalli della tavola periodica formando un complesso chiamato metalloporfirina. La molecola può essere poi ulteriormente modificata da gruppi funzionali nelle posizione periferiche della molecola.

Le proprietà delle porfirine si estendono ai macrocicli nei quali lo scheletro molecolare della porfirina viene alterato o cambiando il numero dei pirroli oppure modificando i ponti che legano i pirroli nell'anello aromatico. Tra i derivati porfirinici i corroli rivestono particolare importanza. I corroli sono caratterizzati dallo stesso scheletro molecolare delle corrine, che costituiscono il nucleo centrale della vitamina B12, con due pirroli direttamente connessi. I corroli posseggono lo stesso carattere aromatico delle porfirine ma il legame diretto tra pirroli risulta in un arricchimento del sistema aromatico. In conseguenza di ciò i corroli hanno caratteristiche proprie rispetto alle porfirine soprattutto in termini di reattività chimica e proprietà fotochimiche.

In Figura 380 sono mostrate la strutture molecolari del della TPP e del trifenilcorrolo (TPC).

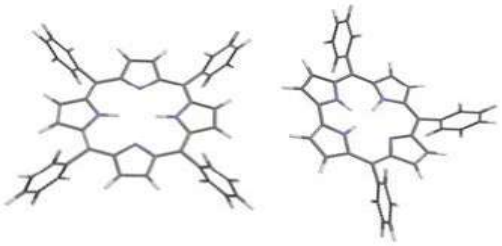


Figura 380. Strutture della tetrafenilporfirina e del triifenilcorrolo

I sensori utilizzati sono cristalli di quarzo di taglio cristallografico AT e con un frequenza nominale fondamentale di risonanza di 20 MHz e un diametro di circa 7 mm prodotti da KVG Quartz Crystal Technology Gmbh (Neckarbischofsheim, Germania).

La relazione tra frequenza fondamentale e incremento della massa meccanicamente connessa sulla superficie del quarzo è descritta dalla equazione di Sauerbrey:

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{A\sqrt{\mu\rho}}\Delta m$$

dove μ e ρ sono il modulo di shear e la densità del cristallo di quarzo. La relazione precedente applicata al QMB da 20 MHz qui utilizzati predice una sensibilità alla massa dell'ordine di -0.58 Hz/ng.

Allo scopo di testare le funzionalità dello strumento sviluppato (Figura 381) è stata misura la risposta di sei sensori QMB verso cinque diversi composti volatili. I QMB sono stati funzionalizzati con una serie di TTP e TTC. In particolare, in fase di test del naso elettronico sono stati investigati le basi libere (H_2TPP e H_2TTC) e i complessi di manganese e ferro (MnTPP, Mn TTC, FeTTP, e FeTTC).

I sensori sono alloggiati in una camera di misura realizzata in teflon. Il teflon è sufficientemente inerte da non contaminarsi con i composti volatili che vengono di volta in volta misurati. Questo accorgimento è necessario per evitare problemi di isteresi nelle risposte dei sensori.

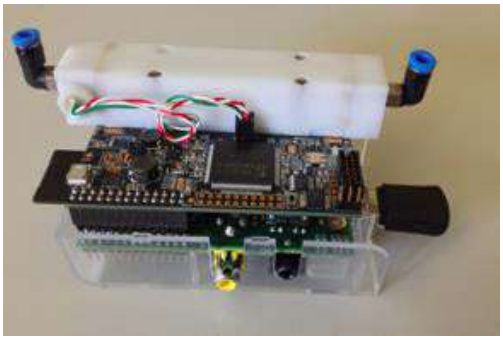


Figura 381. Vista di insieme del naso elettronico. In figura è visibile la camera di misura in teflon con i connettori per l'ingresso e l'uscita del campione gassoso e la scheda realizzata ad ad-hoc con la elettronica di condizionamento, misura e comunicazione con un computer host. La scatola bianca in alto contiene l'alloggiamento dei sensori. Sono visibili i connettori Festo che assicurano una connessione senza fuga di gas con il sistema di campionamento

La sensibilità dei sensori è stata testata nei confronti di sei specie volatili rappresentative di diverse famiglie molecolari di interesse. I composti di test sono: etanolo, trimetilammina, solfuro di idrogeno, acetone e ammoniaca. Con concentrazioni nell'intervallo 100-500 ppm per i composti volatili (etanolo, trietilammina.

In Figura 382 sono riportate le curve di risposta dei 6 sensori testati verso i cinque composti volatili analizzati. Tutti i sensori mostrano un andamento lineare nei confronti della concentrazione dei composti misurati. E' interessante notare che ciascun sensore è sensibile ma non selettivo. In pratica ciascun sensore rivela la presenza del gas ma dal segnale di un solo sensore non è possibile identificare il composto volatile.

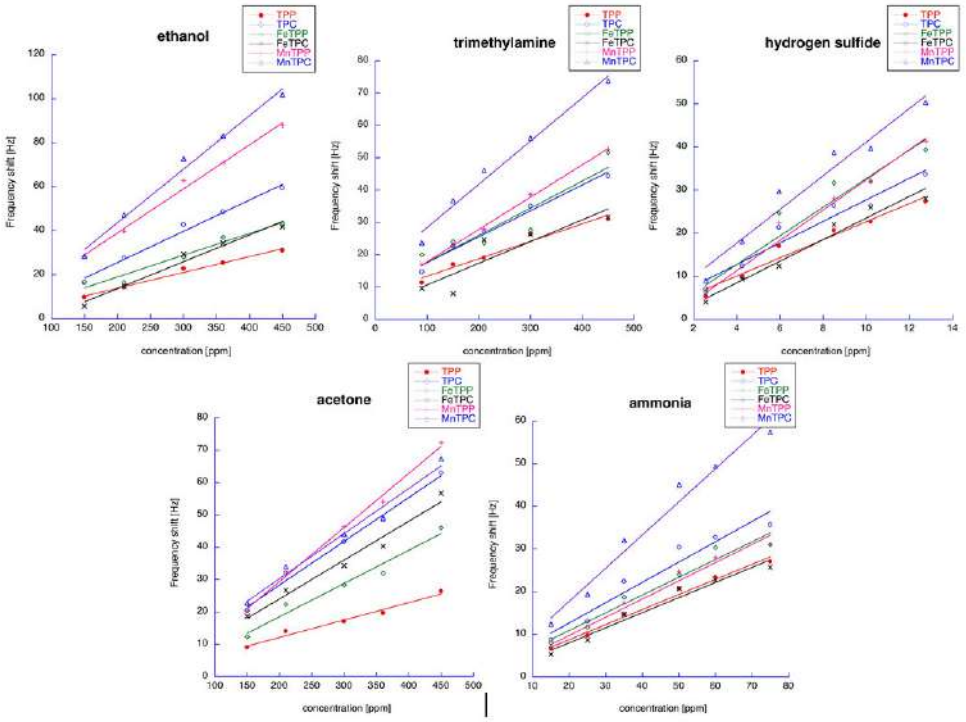


Figura 382. Curve di risposte dei sensori testati nei confronti dei gas investigati

I test decisivo per un naso elettronico consiste nella analisi multicomponente dei segnali dell'array di sensori. La analisi delle componenti principali (PCA) consente di scomporre i dati multivariati in componenti principali tra loro scorrelate. In Figura 383 è mostrato il risultato della PCA (scores e loadings) relativo alle proiezioni PC1-PC2 e PC2-PC3.

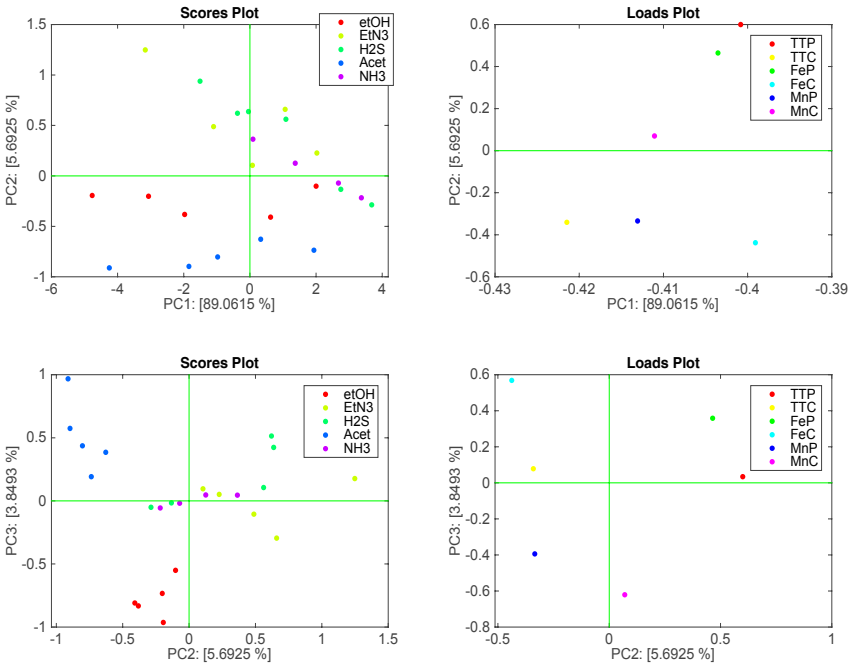


Figura 383. Proiezione degli scores e dei loadings nei piani PC1-PC2 e PC2-PC3. Si osservi che la prima proiezione considera circa il 94% della varianza totale dei dati, mentre nella seconda proiezione la varianza rappresentata è di poco superiore al 9%

Nel piano PC1-PC2 gli scores separano acetone ed etanolo mentre gli altri 3 composti cadono sovrapposti nel grafico. In PC2-PC3 si osserva invece una separazione chiara tra i composti con una parziale sovrapposizione

dell'ammoniaca e dell H_2S. Per quanto riguarda i loadings, invece si osserva in PC1-PC2 una separazione tra i tre corroli e le tre porfirine. Nel piano PC2-PC3, dove i composti sono meglio separati, i loadings sono disposti radialmente ad indicare che ogni sensore, in questa rappresentazione, contribuisce con una informazione scorrelata rispetto agli altri sensori.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/037.

Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Il bilancio energetico di una cella frigorifera è determinato da una serie di "carichi termici" legati ai componenti della cella stessa ed alle sostanze che vengono in essa introdotte. In particolare si possono individuare le seguenti entrate di calore:

- carico dovuto alla trasmissione di calore dall'esterno verso l'interno attraverso le pareti, il pavimento ed il soffitto;
- carico legato all'introduzione della merce che se in equilibrio con l'ambiente esterno ha una temperatura simile a quella dell'aria esterna (e cosi il contenitore della merce);
- carico dovuto all'apertura e chiusura delle porte;
- carico dovuto alle fonti energetiche presenti all'interno del vano cella come luci, motori per la ventilazione ecc.;
- carichi dovuti alle variazioni di maturazione delle merci fresche.

Il confronto del comportamento energetico della cella implementata con materiale a cambiamento di fase nella stratificazione delle pareti costituenti l'involucro con quello della cella tradizionale di riferimento è stato l'argomento di ricerca dei primi due anni di programma. I terzo anno di attività invece si articolato su due filoni principali:

- l'analisi di comportamento di una cella nella quale il materiale in passaggio di fase è stato applicato all'interno per la collaborazione con il gruppo di refrigerazione;
- la produzione di un tool di calcolo destinato agli operatori del settore della catena del freddo.

Il primo obiettivo delle attività è stato quello di verificare i benefici energetici legati alla presenza di PCM nel vano interno della cella, installato in un'intercapedine ventilata in corrispondenza dell'evaporatore della macchina frigorifera. Ovviamente i PCM utilizzati in questa fase della ricerca non corrispondono a quelli utilizzati per l'involucro, poiché i livelli di temperatura che caratterizzano l'aria nel vano refrigerato sono nettamente inferiori a quelli che si possono riscontrare sulla superficie esterna della cella, sottoposta anche all'assorbimento della radiazione solare incidente. In conseguenza di ciò, le temperature di fusione del PCM scelti devono essere compatibili con i livelli di temperatura di lavoro della zona della cella. Pertanto, se nelle campagne di misura degli anni precedenti si è usato PCM RT35HC, con una " temperature melting area " di 34 -36°C, nella presente attività si è passati al PCM RT5HC con temperatura di 5-6°C . Quest'ultimo materiale ha il compito di assorbire i carichi termici che si sviluppano all'interno del vano refrigerato, sommati a quelli che provengono dall'esterno, termostatando la temperatura interna dell'aria a quella di set point pari a 5 °C.

L'uso del PCM in corrispondenza dell'evaporatore del gruppo frigo permette lo sfasamento dell'intervento del compressore della macchina frigorifera verso periodi del giorno nei quali si riscontrano i più bassi valori di temperatura *esterna* dell'aria, facendo così produrre l'effetto refrigerante con efficienza maggiore (più bassi consumi elettrici) e più bassi costi di energia elettrica (considerando le fasce di costo), come ad esempio nei periodi notturni. La sperimentazione ha richiesto lavori di realizzazione dello scambiatore per il contenimento del PCM, la sua installazione in corrispondenza dell'evaporatore del gruppo frigo e la installazione di un completo e complesso sistema di monitoraggio. Lo scambiatore di calore è costituito da 6 corpi cavi rettangolari in alluminio dotati di alettatura esterna, che sono stati assemblati nel vano cella come mostrato in Figura 384.

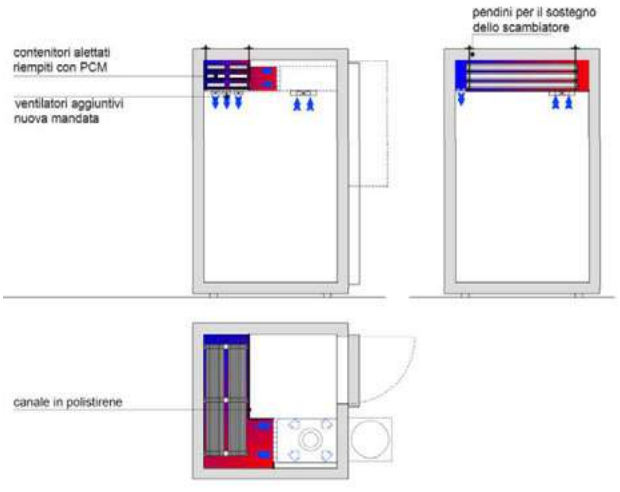


Figura 384. Pianta e sezioni della cella frigorifera di prova modificata per alloggiare lo scambiatore contenente PCM

I risultati ottenuti hanno confermato che l'introduzione di PCM all'interno del volume delle celle frigorifere può stabilizzare la temperatura interna, diminuendo le variazioni repentine dovute sia ai cicli di accensione e spegnimento, offrendo così vantaggi nel caso in cui la merce trasportata richieda questa prestazione.

Sintetizzando, si è potuto dimostrare come, con l'uso del PCM, si possano conseguire i seguenti benefici nella refrigerazione:

- innalzamento del valore di efficienza frigorifera e abbattimento dei costi energetici;
- stabilizzazione della temperatura di uscita dall'evaporatore del flusso d'aria che, se troppo bassa o troppo alta, può determinare il deterioramento o congelamento della merce direttamente esposta;
- incremento e il controllo dello scambio termico convettivo del PCM con l'ambiente refrigerato passando da naturale a forzato, con la possibilità di controllo al fine di stabilizzare la temperatura;
- uniformare le temperature dell'aria nel vano per evitare fenomeni di stratificazione termica che determinerebbe diversi gradi di maturazione delle sostanze organiche nella direzione verticale.

Le prove effettuate sulla cella frigorifera sia nella configurazione tradizionale che con l'introduzione di PCM, sono state eseguite sottoponendo la cella frigorifera alle diverse azioni che determinano singolarmente un carico frigorifero: trasmissione attraverso l'involucro, apertura e chiusura dalle porta e introduzione di carico esterno a temperatura più alta. E' stato altresì analizzato il comportamento della cella frigorifera che da regime stazionario passa alla assenza di alimentazione elettrica, al fine di verificarne il comportamento in caso di black-out elettrico.

Per quanto riguarda il carico termico dovuto alla respirazione non sono state fatte analisi particolari dato che il carico dovuto a questa azione determina un'azione energetica limitata.

Tutte le prove sono state effettuate all'interno di un locale termostatato nel quale la stessa cella è stata utilizzata sia per le prove nella configurazione tradizionale che in quelle con l'implementazione del PCM.

Durante la sperimentazione è stata acquisita e registrata una grande quantità di dati [rapporto RdS/PAR2014/039]. A titolo di esempio in Figura 385 viene presentato il confronto di consumo elettrico tra la cella con PCM e quella di riferimento.

Il test viene effettuato confrontando il consumo di energia elettrica delle due celle sottoposte alla medesima condizione di prova. In particolare, in regime stazionario, il carico frigorifero è dato dalla trasmissione di calore per differenza di temperatura dell'aria tra ambiente esterno e quello interno e in minima parte da infiltrazione d'aria tra ambiente esterno ed interno, attraverso le giunzioni dell'involucro. I risultati ottenuti mostrano che la cella con PCM ha un consumo ridotto, rispetto a quella di riferimento, di circa il 6%. Un risultato questo che potrebbe essere considerato piccolo, ma che tenendo conto della efficienza ormai raggiunta dalle celle tradizionale e tenendo conto del contributo che potrà essere raggiunto dall'uso del PCM anche nelle pareti, non può essere valutato di esigua entità.

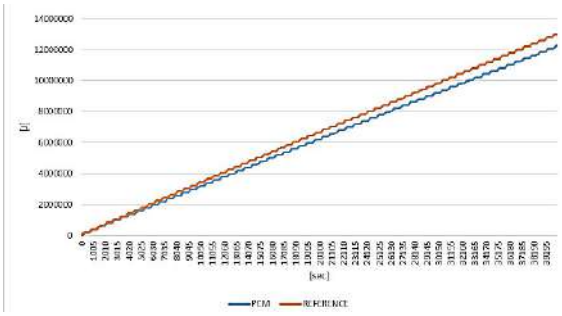


Figura 385. Cella con merce a regime di carico dato dalla sola trasmissione attraverso l'involucro, T ambiente esterno 30-32 °C

Un secondo confronto viene effettuato attraverso la valutazione delle condizioni termiche interne. Infatti la presenza dello scambiatore di calore con PCM dopo l'evaporatore consente di stabilizzare la temperatura di uscita dell'aria dall'evaporatore.

Per la cella di riferimento si può osservare come la temperatura di uscita dell'aria, in questo caso misurata dopo la griglia di uscita dell'aria dall'evaporatore, abbia una oscillazione di più di 7°C (Figura 386), andando da un valore massimo di 5 °C a un valore minimo di -2 °C. Con la presenza del PCM l'aria prima di uscire passa attraverso il condotto nel quale sono inseriti gli scambiatori e quindi cede o acquisisce calore prima di uscire, in funzione della temperatura. Il risultato è che la temperatura di uscita ha un'oscillazione ridotta di poco più di 3°C con valori minimi sempre superiori a 0°C. Tale vantaggio consente di ridurre notevolmente il rischio di merce avariata per congelamento e inoltre consente di avere un controllo della temperatura più efficace.

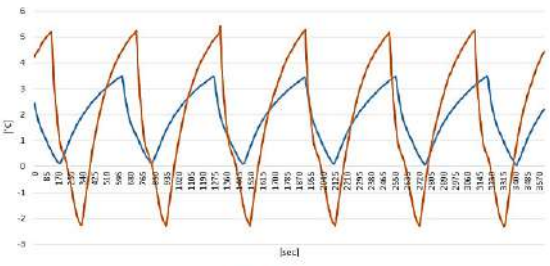


Figura 386. Confronto temperature di mandata dell'aria

I risultati dell'intero ciclo di prove hanno dato risposta a quanto preventivato, confermando come l'inserimento del PCM all'interno del vano refrigerato, in corrispondenza dell'evaporatore, porti effettivamente ad un aumento dell'efficienza energetica del sistema, ma indica anche come si possano avere benefici nella gestione della macchina stessa.

Tool di dimensionamento del PCM

Al fine di fornire uno strumento agli operatori per poter facilmente utilizzare PCM nelle proprie applicazioni, è stato realizzato un tool di calcolo per il dimensionamento del PCM da inserire nella cella frigorifera.

Il tool che è stato sviluppato consiste in un foglio di calcolo (Excel) destinato ai gestori delle celle avente lo scopo di indicare come dotare la cella frigorifera, prima di un trasporto, di un elemento contenente il PCM. Questo permetterà di implementare la cella con un sistema inerziale con lo specifico tipo di PCM, con lo spessore ottimizzato per aumentare il rendimento della macchina frigorifera, in funzione del tipo di merci da trasportare, del contesto climatico e del viaggio.

L'utente dovrà unicamente richiamare i dati climatici della zona di transito e fissare il tipo di merci da inserire nella cella.

I dati di input che l'operatore deve inserire per poter prevedere e dimensionare la quantità di PCMi nteressano sia le caratteristiche della cella che quelle dell'utilizzo, in particolare:

- geometria della cella (dimensioni esterne , spessore delle pareti, e dimensioni della porta)
- caratteristiche dell'involucro (trasmittanza termica ed emissività della superficie esterna)
- caratteristiche della macchina frigorifera (potenza e rendimento EER)
- contesto climatico
- mese, ora, durata del viaggio
- durata della fase di carico
- temperatura di set-up interno
- tipo, quantità e temperatura della merce trasportata.

Una volta inseriti questi parametri è possibile calcolare i carichi termici, i consumi termici ed elettrici previsti e le emissioni di CO_2 previste.

Dai dati dei carichi termici e a partire dalla temperatura di set-up interno è possibile effettuare la scelta e il dimensionamento del PCM. Una volta fatta questa scelta è possibile avere le ore di autonomia prevista e l'energia termica che il PCM può assorbire.

I risultati vengono forniti in forma tabellare e grafica, e la finestra è pronta per essere stampata. A lato si riporta la schermata riassuntiva del tool di valutazione (Figura 387).

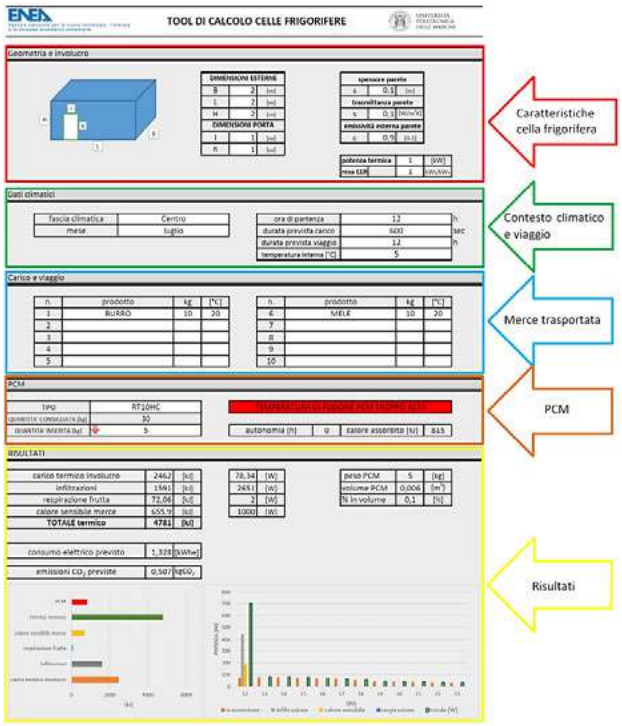


Figura 387. Schermata tool di calcolo

Una descrizione dettagliata dei risultati delle attività svolte è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/039.

e. Recupero di elementi pregiati presenti nei RAEE

Università "La Sapienza" Roma, Dipartimento di Chimica

L'attività svolta ha previsto lo sviluppo, la validazione e la successiva applicazione ai campioni forniti da ENEA di metodi analitici per la caratterizzazione elementare delle soluzioni prodotte dai trattamenti effettuati sul refluo del processo idro-metallurgico per il recupero di elementi pregiati dalle schede elettroniche. L'attività di sviluppo e validazione è stata focalizzata sull'analisi di Al, As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, Sn, Zn e Hg tenendo conto dei valori limite di emissione previsti dall'allegato 3 del D.Lgs 152/06 ed ha avuto come obiettivo il raggiungimento delle prestazioni analitiche richieste. Tale attività ha richiesto un intenso lavoro di ottimizzazione dei metodi analitici, indispensabile per raggiungere un'adeguata qualità dei risultati. Nel suo insieme il lavoro di

ottimizzazione, validazione e controllo delle prestazioni dei metodi e della successiva applicazione ai campioni di refluo ha infatti richiesto oltre 10000 determinazioni analitiche.

Nel lavoro sono state prese in considerazione le principali tecniche analitiche utilizzabili per l'analisi elementare in matrice acquosa; in particolare, lo studio ha previsto l'impiego della spettrometria di massa a plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS), della spettrometria di emissione atomica a plasma accoppiato induttivamente (ICP-OES), della spettrometria di fluorescenza atomica con generazione d'idruri (HG-AFS) e di una strumentazione automatica dedicata all'analisi di Hg (Automatic Mercury Analyzer; AMA), basata sul principio dell'assorbimento atomico con arricchimento del campione su amalgama d'oro. Ciascuna di queste tecniche presenta vantaggi, svantaggi e limitazioni operative; la scelta della tecnica analitica più idonea è stata quindi effettuata per ogni singolo elemento, tenendo in considerazione l'adeguatezza dei limiti di rilevabilità e di quantificazione, la qualità analitica del dato ottenuto, i tempi e i costi.

Lo studio ha evidenziato come, a causa dell'estrema complessità della matrice da analizzare, che contiene concentrazioni saline molto consistenti e livelli di concentrazione elementare tra loro particolarmente variabili (dal μg/L alle decine o centinaia di mg/L), nessuna delle tecniche analitiche considerate, presa singolarmente, è in grado di fornire risultati affidabili per tutti i parametri da analizzare; è stato quindi necessario affiancare tre differenti tecniche analitiche (ICP-MS per Al, B, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, Sn, Zn, HG--AFS per As, Cd e Se e AMA per Hg). L'analisi di ciascuno degli elementi ha richiesto l'adozione di diverse condizioni operative; nonostante l'impiego di una tecnica multi-elementare come ICP-MS, per effettuare l'analisi completa di ciascun campione sono necessarie ben otto diverse corse analitiche. L'ottimizzazione e la validazione di ciascun metodo è stata effettuata con sistemi non convenzionali a causa della mancanza di idonei materiali certificati. Nella fase di ottimizzazione e validazione sono stati impiegati il refluo tal quale, eventualmente fortificato negli elementi contenuti a livello di traccia, e soluzioni sintetiche appositamente preparate ed in grado di mimare il comportamento analitico dei reflui ottenuti dai trattamenti. Per ciascun elemento sono state individuate le condizioni operative (strumentali e di pretrattamento) in grado di massimizzare il segnale strumentale mantenendo a livelli accettabili l'incertezza del dato ed è stata posta particolare attenzione alla valutazione ed alla minimizzazione degli effetti matrice. L'effetto matrice è stato valutato, per ciascun elemento, studiando la variazione dei fattori di risposta strumentali in funzione del contenuto salino della matrice ed applicando il metodo delle aggiunte al refluo tal quale. La risposta strumentale di diversi elementi (B, Cd, Cr, Fe, Se e Zn) varia in modo significativo in funzione della concentrazione salina, probabilmente a causa dello spostamento degli equilibri di ionizzazione in torcia. Nel caso di Cd, Cr, Fe, Se e Zn, i fattori di risposta in matrice salina sintetica ($NaNO_3$) sono paragonabili a quelli ottenuti mediante applicazione del metodo delle aggiunte in matrice reale. Per questi elementi la taratura può quindi essere effettuata esternamente in matrice sintetica. Nel caso del B, invece, la matrice sintetica non è in grado di simulare in modo affidabile il comportamento della matrice reale. L'analisi del B necessita quindi dell'applicazione del metodo delle aggiunte.

Una volta individuate le strumentazioni più idonee ed i corretti sistemi di taratura strumentale, per ogni elemento sono stati valutati gli intervalli ottimali di taratura, i limiti di rilevabilità (LOD) e di quantificazione (LOQ), le percentuali di recupero da soluzioni a concentrazione nota, l'intervallo di linearità e l'incertezza di ripetibilità del metodo. I protocolli analitici utilizzati e le prestazioni dei metodi ottimizzati per la caratterizzazione delle soluzioni prodotte dai trattamenti effettuati sul refluo dal gruppo ENEA sono riassunti nella tabella 1.

Un ulteriore protocollo analitico, basato sull'impiego dell'ICP-OES, è stato ottimizzato ed utilizzato per verificare mediante controllo inter-tecnica l'accuratezza dei risultati di Cu, Mn, Ni, Pb e Zn, elementi presenti nel refluo tal quale in concentrazioni particolarmente elevate e quindi particolarmente critici per la valutazione della compatibilità ambientale dei reflui. I risultati del confronto inter-tecnica hanno dimostrato una buona accuratezza dei valori forniti.

La presenza di specie poco solubili nelle soluzioni dei reflui, ha reso indispensabile uno studio della stabilità nel tempo delle concentrazioni in soluzione e l'ottimizzazione di un'idonea procedura di conservazione e pretrattamento fisico dei campioni, in modo da assicurare una buona robustezza dei metodi di analisi.

Per la verifica del mantenimento delle prestazioni analitiche nel tempo, che possono variare a causa di derive strumentali ed errori operativi, è stata preparata una soluzione di controllo (costituita dal refluo tal quale, fortificato con standard) ed è stato predisposto un idoneo sistema di controllo della qualità analitica del dato, basato sull'uso di carte di controllo. L'utilizzo delle carte di controllo ha permesso l'identificazione di diverse anomalie nel corso delle analisi, dovute al progressivo intasamento delle linee di introduzione del campione negli analizzatori, ad errori nella preparazione degli standard di taratura, a variazioni dell'efficienza di nebulizzazione etc.. Una volta compresa la causa delle anomalie segnalate, è stato possibile risolvere il problema ed eliminare la relativa fonte di incertezza del dato.

Grazie all'intenso lavoro analitico svolto è stato possibile fornire, anche su una matrice complessa come quella oggetto di questo lavoro, risultati di qualità analitica compatibile con le normative vigenti per tutti gli elementi analizzati, con valori di incertezza relativa inferiori al 10%. Le procedure sviluppate potranno essere facilmente trasferite ed adattate a futuri lavori di caratterizzazione dei reflui prodotti.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto, RdS/PAR2014/041.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica

L'attività è stata strutturata su due principali obiettivi. L'obiettivo A è relativo alla ricognizione della produzione e del riciclo di prodotti elettronici e studio della filiera delle operazioni unitarie del processo idrometallurgico per il recupero di elementi pregiati da schede elettroniche brevettato da ENEA. L'obiettivo B si è incentrato sulla valutazione della scalabilità a livello industriale del processo idrometallurgico per il recupero di elementi pregiati da schede elettroniche brevettato da ENEA.

Attività dell'obiettivo A

L'attenzione è stata rivolta verso quattro argomenti principali:

- la ricognizione sulla produzione industriale dei prodotti elettronici e dei materiali impiegati;
- la ricognizione sulle tecnologie per il recupero dei materiali dai prodotti elettronici da smaltire;
- la filiera delle operazioni unitarie sviluppata da prove di laboratorio per il recupero di metalli nobili;
- l'analisi in scala industriale per la filiera sopra descritta.

I primi due punti sono stati sviluppati in modo da aggiornare lo stato delle conoscenze dalla brevettazione della filiera delle operazioni unitarie da parte di ENEA ad oggi.

Analisi Normativa e della produzione di RAEE

In particolare, nella ricognizione della produzione industriale di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) si è posta l'attenzione sulla normativa italiana (D.Lvo 14 marzo 2014, n.49) in merito al raggruppamento di interesse contente PCB (Printed Circuit Board) (3. Apparecchiature Informatiche e per Telecomunicazioni) nonché alle disposizioni per l'organizzazione della raccolta dei rifiuti da AEE (RAEE) in modo da comprendere l'evoluzione del mercato con l'interesse e la finalità del recupero dei metalli. Inoltre, sono stati esaminati i dati di diversi studi internazionali incentrandosi, in particolare, sullo scenario italiano circa la produzione e la quantità raccolta di RAEE che risulta, ad oggi, ancora estremamente limitata rispetto ai target della direttiva europea.

Per quanto attiene la produzione, oltre ad un'attenta analisi dei circuiti stampati per definirne le componenti in fase di fabbricazione ed i punti di localizzazione dei metalli che saranno oggetto di recupero, si sono analizzate le tipologie di PCB prodotti con particolare riguardo a quelli per PC e per telefoni cellulari e la composizione del substrato di supporto. Un punto di notevole interesse che si è analizzato è stato il contenuto di PCB nei RAEE. Infatti, sebbene siano note le produzioni globali mondiali dei PCB, quelle suddivise per continente, le loro diverse tipologie e i campi di applicazione, non risultano però desumibili con affidabilità il contenuto di PCB nei RAEE. Questo è sostanzialmente dovuto al fatto che le quantità prodotte di RAEE sono stimate con diverse metodologie tra cui l'analisi dell'LCA (Life Cycle Analysis), ma le quantità raccolte sono minime. Dal quadro che si è ricostruito e considerato quanto esposto, quindi, sussiste e permane un'estrema incertezza nella definizione della quantità di PCB nei RAEE. In conclusione, si identificano, invece, conferme circa una produzione costantemente in crescita di PCB da cui è desumibile una raccolta di PCB da smaltire sempre più cospicua anche in ragione dei target normativi da raggiungere al 2009 tramite l'adeguata organizzazione dei venditori delle AEE.

Stato dell'arte sui processi idrometallurgici

La ricognizione sulle tecnologie ed il recupero dei metalli dai PCB si è concentrata sull'analisi dei sistemi idrometallurgici e sui pretrattamenti necessari. Dall'analisi di tali processi è possibile definire come ancora scarsamente attuabili quelli di lisciviazione con cianuro, tiourea, tiosolfato e la biolisciviazione in quanto i primi non risultano competitivi mentre le biometallurgiche, sebbene giudicate come promettenti, sono ulteriormente da sviluppare per essere sostenibili in una loro applicazione industriale. Nel periodo 2012-2015 sono stati pubblicati numerosi lavori scientifici o libri che effettuano analisi generali di review delle diverse tecnologie senza presentare, però, sviluppi applicativi innovativi. Si sono individuati alcuni punti di interesse legati all'analisi dei contenuti di metalli nelle diverse frazioni granulometriche finalizzabile al miglioramento delle fasi di estrazione e alla separazione balistica dei metalli dalle plastiche.

Processo di recupero di metalli nobili - Analisi in scala industriale

L'analisi segue uno sviluppo logico che parte dalla definizione della dimensione di un centro di raccolta, poiché le informazioni di base, ovvero la quantità a livello nazionale di PCB trattabili, soffre di alcune indeterminazioni, per operare a garanzia di sicurezza si è scelta una dimensione inter regionale con un impianto industriale da sviluppare ovviamente in linee parallele. Basandosi su queste ipotesi sono stati eseguiti: i bilanci di massa in reagenti, prodotti e rifiuti; i bilanci entalpici e termici. Da questi sono determinate le dimensioni necessarie per i reattori, la certezza di poter accedere ad un mercato internazionale per l'acquisto dei reagenti, la definizione di una notevole incidenza dei costi per la mole di rifiuti generati. Quest'ultimo aspetto è fortemente correlato con l'utilizzo di una condizione operativa di elevato eccesso di acido con conseguente successiva alta quantità di soluzioni basiche da impiegare in precipitazione e, quindi, notevoli volumi di rifiuti da smaltire. In tal senso è stata sviluppata un'ottimizzazione dei reagenti da impiegare con la proposta di due metodologie possibile con cui procedere. Inoltre, la valutazione sul mercato internazionale della convenienza economica dell'acquisto di reagenti ad elevata concentrazione, ha portato alla scelta di una condizione di compromesso tra un adeguato livello di sicurezza con cui operare in impianto e relativi costi sostenibili. Per tale motivo, tutti i calcoli sono stati effettuati definendo l'acquisto di reagenti alla massima concentrazione possibile con la successiva preparazione in situ di quelli necessari tramite apposite lavorazioni e stoccaggi. Le fasi successive hanno riguardato la logistica ed il risparmio energetico, le tipologie di reattori e la salvaguardia degli operatori. In questo scenario si è concepito il centro di trattamento come un impianto industriale che usa le massime sicurezze per la funzionalità ed il controllo dell'impianto, degli addetti e dell'ambiente. Infine, è stata effettuata un'analisi dell'aspetto finanziario che risulta, però, penalizzato da più fattori che necessariamente debbono essere affrontati e minimizzati nei costi. In tal senso, sono stati individuati i punti di ottimizzazione che debbono essere introdotti nella filiera di processo al fine di ridurre significativamente i costi e gli investimenti. Alcuni di questi punti necessitano di verifiche analitiche e di fattibilità tecnica che debbono essere condotte nel pilota in allestimento presso ENEA Casaccia. Si vuole puntualizzare che la stima di massima dei costi di investimento per la realizzazione del centro di trattamento richiede, per una maggiore precisione degli importi dei lavori, lo sviluppo delle successive fasi progettuali più avanzate e la verifica dei costi di fornitura di apparecchiature speciali, quali i reattori.

Attività dell'obiettivo B

La tematica principale del lavoro svolto è stata quella di progettare un impianto industriale che realizzi la filiera messa a punto nell'obiettivo A e il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

- la progettazione si è basata su bilanci di massa e di energia completi, individuando tutti i sistemi necessari al controllo dei processi, i sistemi di trattamento delle emissioni gassose e quelli di recupero dei reagenti. E' stato effettuato il dimensionamento dei reattori, dei serbatoi e degli impianti necessari per le lavorazioni e a corredo delle stesse.
- è stata realizzata l'analisi finanziaria dell'impianto industriale definendo i costi di investimento, di gestione e le criticità per la sostenibilità delle produzioni.
- sono state definite le prove di laboratorio da eseguire nello sviluppo delle attività per individuare i processi alternativi a quelli ipotizzati, ma di minor costo o maggiori rese nel recupero di metalli.

La progettazione si è basata, prioritariamente, sulla definizione delle filiere delle operazioni unitarie con la successiva realizzazione dei bilanci di massa e di energia. Quindi, si è provveduto alla progettazione degli impianti e delle opere delle filiere strutturate. Lo stabilimento è stato dimensionato per trattare 1200 t/anno di schede elettroniche con provenienza da PC o da telefoni cellulari.

L'analisi finanziaria è stata effettuata utilizzando il calcolo del VAN (Valore Attuale Netto). L'analisi è stata condotta considerando quali dati di input la valutazione preliminare dei costi di impianto, gli oneri economici di esercizio, i recuperi economici dalla vendita degli intermedi e dei prodotti ottenuti. Tutti gli scenari di calcolo sono determinati considerando di dover finanziare tutte le opere in proprio. L'affinamento degli importi non può prescindere da un ambito progettuale di livello definitivo od esecutivo.

Il quadro economico che definisce, al netto dell'IVA, l'investimento iniziale per la progettazione e costruzione dell'impianto a meno del valore dell'area, viene redatto nel rispetto della normativa attuale per le opere pubbliche, secondo tale metodologia l'importo dell'investimento ammonta a 6,4M€.

In termini di criticità dei costi operativi e dei ricavi si definisce quanto segue. L'acquisto dei PCB incide per il 75% sui costi di gestione dello stabilimento, questo tasso di incidenza è particolarmente preoccupante in quanto se il costo specifico dei PCB cambia repentinamente può annullare la convenienza economica dello stabilimento. Il valore reale e la rimunerativitá dei PCB è strettamente legata alla composizione in metalli pregiati oltre allo Stagno e al Rame. I reagenti hanno costi specifici variabili strettamente dipendenti dal rapporto di cambio dollaro USA ed

euro; comunque la ridotta incidenza (6,7%) sui costi totali limita gli effetti di tali variazioni. Tutti i metalli nobili hanno quotazioni che seguono il mercato delle materie prime (Cu e Sn) ed il mercato finanziario (Au); l'incidenza dell'oro sul totale dei ricavi (82%) preoccupa particolarmente anche in virtù delle forti oscillazioni che ha subito nell'ultimo quinquennio. Ma per effettuare una analisi finanziaria rigorosa sono stati usati per i metalli pregiati i valori di mercato del luglio 2015 che risultano i più bassi degli ultimi 5 anni. In base a quanto osservato è indispensabile disporre di un laboratorio di analisi interno allo stabilimento in grado di analizzare il materiale in arrivo, i PCB e i reattivi e di essere di supporto allo staff tecnico per i controlli interni. Infine, risulta basilare adottare metodi anche non standard di campionamento dei PCB al fine di comprendere l'esatta composizione in metalli pregiati e nobili e subordinare a questi il prezzo di acquisto per salvaguardare la convenienza finanziaria del trattamento.

Infine sono state definite le prove di laboratorio per individuare processi alternativi a quelli ipotizzati, ma di minor costo o maggiori rese. I test di laboratorio e sul pilota in allestimento sono molteplici, tutti rivolti a chiarire alcuni assunti fatti nella progettazione per i quali non ci sono riscontri sperimentali. Tali prove sono state individuate nel corso della progettazione e riguardano: 1. la capacità di poter rimuovere per gravità nel dissolutore, grazie al ricircolo del lisciviato, i componenti EE e il destino delle lamine d'oro; 2.verificare l'ottimale forma ed aumentare la funzionalità del reattore di dissoluzione (con fondo conico con e senza coclea senza asse intubata); 3. verificare la quantità di lisciviato che si recupera operando in condizioni diverse da quelle di laboratorio; 4. stabilire le effettive prestazioni della nuova sub filiera 2 nella sua configurazione di dimensionamento industriale; 5. testare la raffinazione elettrolita del rame; 6. testare la velocità di risalita più idonea alla separazione massiva delle plastiche fini nella raffinazione dell'ossido di stagno; 7. caratterizzare a livello chimico-fisico nel pilota dimostrativo le acque di processo e definire le in modo operativo le quantità di acqua demi e servizi necessarie; 8. valutare, nel pilota dimostrativo, l'effetto dell'uso nel lavaggio delle emissioni dell'utilizzo di acido nitrico al 10% e acqua ossigenata caratterizzando il gas effluente; 9. verificare nel pilota dimostrativo la quantità e la caratterizzazione chimico fisica del lisciviato residuo dopo la precipitazione del rame.

Una descrizione dettagliata delle attività svolte è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/042.

f. Realizzazione di una facility per la sperimentazione e verifica di motori elettrici ad alta efficienza

Università dell'Aquila, Dipartimento Ingegneria industriale e dell'informazione e di economia

Obiettivo dell'attività di ricerca svolta è inerente lo sviluppo di un protocollo, contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15 kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009.

La prima fase dell'attività è stata mirata ad identificare tutte le specifiche necessarie per la progettazione del laboratorio di verifica definendo tutti gli elementi che caratterizzeranno la facility sia in termini di strumentazione che di gestione. La seconda fase è stata focalizzata a realizzare un protocollo contenente le procedure per le verifiche sui motori elettrici previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 per una facility fino a 15 kW.

Onde inquadrare correttamente le tematiche sviluppate nel quadro dell'attività, non si può prescindere dall'analisi del quadro legislativo e normativo vigenti, visti i risvolti di natura metrologica legale, oltre che tecnica, che concernono la determinazione sperimentale delle prestazioni dei motori elettrici, in accordo con quanto disposto dal Regolamento CE 640/2009 che, nell'Allegato III recita: "*Al fine di verificare la conformità al presente regolamento gli Stati membri applicano la procedura descritta nell'allegato II e metodi di misura affidabili, accurati e riproducibili, che tengano conto dello stato dell'arte generalmente riconosciuto, compresi i metodi definiti nelle norme i cui numeri di riferimento sono stati pubblicati a tal fine nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.*"

I motori elettrici ad alta efficienza possono portare ad una significativa riduzione del consumo energetico con conseguente beneficio per l'ambiente. Un'importante ragione per la loro più ampia diffusione sul mercato è l'armonizzazione delle norme relativamente alle prove di funzionamento, alle definizione delle classi di rendimento e evidenza dei dati di targa.

Ad oggi, come risultato di un decennale e significativo sforzo di far progredire in modo globale l'armonizzazione delle norme, si può contare su un insieme operante di norme internazionali IEC (International Electrotechnical Commission) per caratterizzare in modo univoco il funzionamento dei motori elettrici industriali. Sono state analizzate quindi norme e standard internazionali inerenti l'oggetto dell'attività.

Per lo svolgimento di verifiche su motori elettrici asincroni fino a 15 kW, in accordo con il Regolamento 640/2009 della Commissione, l'identificazione delle grandezze da misurare, della strumentazione più idonea e delle tecniche di misura richiedono la valutazione dell'ordine di grandezza dei parametri dei motori oggetto di verifica.

Per determinare le taglie di motori da verificare e le rispettive grandezze elettriche e meccaniche, si è partiti dalle tabelle di rendimento minime prescritte nella norma IEC 60034-30-1, e recepite dal Regolamento CE 640/2009 che considera come classe di rendimento più bassa la E2, limitandoci a taglie fino a 15 kW. Si sono stati identificati i valori di riferimento che dovranno essere misurati durante lo svolgimento delle diverse tipologie di prove, ed organizzati in tabelle dettagliate.

E' stato investigato lo stato dell'arte inerente le misurazioni delle grandezze necessarie alle prove sperimentali, ed individuata la strumentazione commerciale più idonea. In dettaglio, si sono considerate le misurazioni di tensione, corrente, frequenza, potenza, resistenza, temperatura, velocità angolare, coppia.

Sono stati analizzati inoltre i possibili sistemi di alimentazione dei motori in prova ed i sistemi per la realizzazione del carico meccanico.

La seconda fase delle attività è stata orientata a realizzare un protocollo con le procedure per le verifiche sui motori elettrici previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 per una facility fino a 15 kW.

Lo svolgimento delle verifiche delle prestazioni dei motori asincroni si configura come una procedura di collaudo, che può essere intesa come un controllo di efficienza operativa dei motori stessi, per accertarne l'idoneità all'uso o la conformità ai requisiti fissati da norme o contratti; nel presente documento si fa riferimento al Regolamento della Commissione 640/2009 [1], ed alle norme IEC in materia di prove sulle macchine elettriche rotanti.

Sono state introdotte osservazioni e richiami sulle prove sulle macchine asincrone, in accordo con le metodologie consolidate nel settore dei collaudi delle macchine elettriche, in accordo con la normativa vigente. In dettaglio si è considerata ed approfondita la verifica di conformità secondo la norma IEC 60034-2-1, che è inerente le macchine elettriche rotanti, ed è incentrata sui metodi normalizzati per la determinazione, mediante prove, delle perdite e del rendimento (escluse le macchine per veicoli di trazione). Le prove sui motori asincroni ne costituiscono quindi una sezione. Sono quindi state riportate le tipologie di prova e la gestione ed elaborazione dei risultati delle misurazioni ottenute.

Sono state svolte osservazioni sulla determinazione delle incertezze di misura, poiché nella determinazione del rendimento del motore asincrono polifase, il risultato ottenuto non può essere considerato a prescindere dall'incertezza ad esso associata, che risulta essere necessaria per collocare il motore testato nella classificazione di livelli di efficienza energetica definiti dalla normativa IEC 60034-30-1. L'incertezza della misura del rendimento è il dato che consente di confrontare i valori di rendimento misurati sullo stesso motore in laboratori differenti, o su diversi motori di stessa taglia nello stesso laboratorio; in questi casi senza l'espressione corretta dell'incertezza di misura del rendimento, non è possibile applicare il concetto basilare di equivalenza tra misura, in accordo con quanto prescritto da ISO ENV 13005:2000 (GUM).

Per procedere operativamente con lo svolgimento della verifica dell'efficienza di un motore asincrono, è stata proposta la seguente procedura, corredata di tabelle a titolo di esempio, da impiegare per la raccolta dei valori di misura.

1. Acquisizione della documentazione del motore da verificare; qualora si svolgano verifiche in modalità anonima, l'ente responsabile del campionamento dei motori da verificare dovrà comunicare al personale del laboratorio i dati di targa del motore, e quanto altro utile desumibile dalla documentazione del motore, senza che detto personale possa risalire al costruttore del motore stesso.
2. Elaborazione dei valori nominali del motore da verificare, quali modalità di concatenamento degli avvolgimenti di statore, tensione, corrente, frequenza, fattore di potenza, potenza, classe di isolamento, numero di giri, coppia.
3. Scelta della strumentazione più opportuna per lo svolgimento delle diverse prove, considerando le tipologie di prova e gli intervalli di variazione delle grandezze di misura, secondo quanto illustrato in dettaglio nel capitolo 2 del presente documento.
4. Misurazione delle temperature del motore in equilibrio termico con l'ambiente, e della temperatura del fluido di raffreddamento.
5. Misurazione della resistenza degli avvolgimenti del motore in equilibrio termico con l'ambiente.
6. Determinazione della modalità di svolgimento della prova a vuoto a tensione variabile, mediante definizione del numero di punti di tensione in corrispondenza dei quali effettuare le misurazioni.
7. Alimentazione del motore a tensione nominale, in modo che possa raggiungere una temperatura costante (gradiente 2 K/h) a seguito delle sole perdite a vuoto.
8. Monitoraggio continuo, durante la prova a vuoto, della simmetria della terna di tensione e della distorsione armonica, per verificare che non vi siano contributi significativi di coppie controrotanti che possano portare a sovrastima delle perdite.

9. A motore in condizione termiche stazionarie, esecuzione delle misurazioni nei diversi punti di tensione, scelti in modo che la rappresentazione delle perdite in funzione della tensione al quadrato sia con passo uniforme sulle ascisse (il pedice m indica il valore misurato)

Tensione [% di V_n]	**22%**	**32%**	**45%**	**55%**	**63%**	**71%**	**77%**	**84%**	**89%**	**100%**	**105%**	**109,5%**	**114%**
$V_{m,0}$ [V]													
$I_{m,0}$ [A]													
$P_{m,0}$ [W]													
$n_{m,0}$ [rpm]													
$R_{m,0}$ [Ω]													

Il valore $R_{m,0}$ si misura dopo le letture al valore minimo di tensione.

10. Determinazione del valore delle perdite P_k constanti sottraendo dalla potenza $P_{m,0}$ il contributo delle perdite nell'avvolgimento di statore per ogni valore di corrente misurato.
11. Determinazione delle perdite per attrito e ventilazione utilizzando i valori di perdite P_k , tracciando una retta in funzione della tensione al quadrato fino a tensione 0; l'intersezione con l'asse di tensione zero rappresenta il valore delle perdite per attrito e ventilazione.
12. Determinazione della modalità di svolgimento della prova a carico variabile, mediante definizione del numero di punti di carico in corrispondenza dei quali effettuare le misurazioni.
13. Alimentazione del motore a tensione, frequenza e carico nominali, in modo che possa raggiungere una temperatura costante (gradiente 2 K/h) a seguito delle sole perdite a carico
14. Monitoraggio contino durante la prova a vuoto della simmetria della terna di tensione e della distorsione armonica, per verificare che non vi siano contributi significativi di coppie controrotanti che possano portare a sovrastima delle perdite, nonché maggiorazioni delle perdite negli avvolgimenti.
15. Al termine della prova a carico nominale, misurazione dei valori di P_n, I_n, U_n, s, f, ϑ_c, ϑ_n pari alla temperatura dell'avvolgimento a carico nominale, ed R_n pari alla resistenza di prova al carico nominale.
16. Esecuzione della prova a carico variabile quando la temperatura degli avvolgimenti è entro 5 K rispetto alla temperatura ϑ_n sopra indicata.
17. Applicazione del carico variabile alla macchina in modo da ottenere sei differenti punti di funzionamento. Quattro punti di carico dovrebbero essere scelti in modo da essere egualmente distribuiti tra non meno del 25 % e fino al 100 % incluso del carico nominale. Gli ultimi due punti di carico, approssimativamente distribuiti equamente, dovrebbero essere scelti al di sopra del 100 % e non oltre il 150 % del carico nominale. Con la macchina a carico, iniziare le prove dal valore di carico più elevato e procedere in senso discendente verso il più basso. Queste prove devono essere effettuate il più velocemente possibile per ridurre al minimo le variazioni di temperatura nella macchina durante le prove. Nelle macchine a c.a., la variazione della frequenza tra tutti i punti deve essere inferiore allo 0,1 %.
18. Misurazione di R prima dei rilievi al carico massimo e dopo i rilievi al carico minimo. Il valore della resistenza R al carico 100 % e ai carichi superiori deve essere quello determinato prima della lettura al carico massimo. La resistenza R da considerare per i carichi inferiori al 100 % deve essere determinata supponendo una relazione di linearità di R in funzione del valore del carico, e utilizzando come estremi della relazione lineare i valori delle letture eseguite prima della prova al carico massimo e dopo la prova al carico minimo del 25 %.
19. Misurazione dei seguenti valori:

Carico [% P_n]	**25%**	**50%**	**75%**	**100%**	**125%**	**150%**
$V_{m,c}$ [V]						
$I_{m,c}$ [A]						
$P_{1,m,c}$ [W]						
$C_{m,c}$ [Nm]						
$n_{m,c}$[rpm]						
$f_{m,c}$ [Hz]						
$R_{m,c}$ [Ω]						

20. Determinare per ogni punti di carico il valore delle perdite nel ferro, utilizzando i valori misurati nella prova a carico variabile per determinare il valore di tensione U_r nella relazione che tiene conto della caduta di

tensione dell'avvolgimento di statore, entrando con tale valore sulla retta delle perdite nel ferro in funzione della tensione al quadrato.

21. Verificare se sia necessario introdurre la correzione alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento a 25 °C; in caso affermativo, per ogni scostamento di temperatura del fluido di raffreddamento rilevato durante le prove, determinare il coefficiente di correzione k_ϑ.
22. Determinare per ogni punto di carico le perdite nell'avvolgimento di statore.
23. Determinare per ogni punto di carico le perdite nell'avvolgimento di rotore.
24. Determinare le perdite addizionali a carico per ogni punto di carico, ed effettuarne il trattamento mediante tecnica di regressione lineare
25. Esecuzione della somma di tutte le perdite ottenute, per ogni punto di carico.
26. Determinare per ciascun punto di carico il rendimento
27. In corrispondenza del valore di carico nominale, confronto tra il valore di rendimento ottenuto, ed i valori precisati nel documento.
28. In accordo con quanto prescritto dal Regolamento 640/2009 *"Il modello è considerato conforme al presente regolamento se nell'efficienza nominale del motore (η) le perdite (1-η) non si discostano dai valori fissati nell'allegato I di oltre il 15 % dell'intervallo di potenza 0,75-150 kW e di oltre il 10 % nell'intervallo > 150-375 kW."*

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel RdS/PAR2014/045.

g. Analisi di soluzioni tecniche per l'efficientamento dei processi produttivi nelle PMI

Università di Udine, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Gestionale e Meccanica

La promozione di strumenti di informazione e di analisi dei consumi all'interno delle PMI rappresenta per l'Unione Europea un obiettivo preliminare prioritario al fine di facilitare e rendere maggiormente efficace l'effettiva implementazione di audit energetici e la successiva attuazione delle raccomandazioni risultanti al fine di aumentare l'efficienza energetica nel comparto industriale.

Nell'ambito del presente lavoro si è andati a sviluppare il software di pre-audit *3EMT-S*, evoluzione in un'ottica di sistema finalizzata anche alla pianificazione energetica locale, del tool 3EMT. Il *3EMT-S*, a fronte della compilazione di un questionario dettagliato, consente l'elaborazione automatica di un report finale, completo di una strategia personalizzata di miglioramento della performance energetica ed ambientale dell'impresa. Il tool informatico 3EMT è un considerevole passo avanti nell'accuratezza di un pre-audit (Figura 388) rispetto ad un approccio non strutturato e generico. A beneficio delle autorità che regolamentano le politiche industriali ai vari livelli, a partir da 3EMT è stata sviluppata una complessa integrazione metodologica del tutto generale che è basata su un approccio di tipo "sistemico" in termini di approccio multidisciplinare e di struttura di analisi, in grado di migliorare ulteriormente l'accuratezza dell'analisi, come evidenziato nella Figura 388.

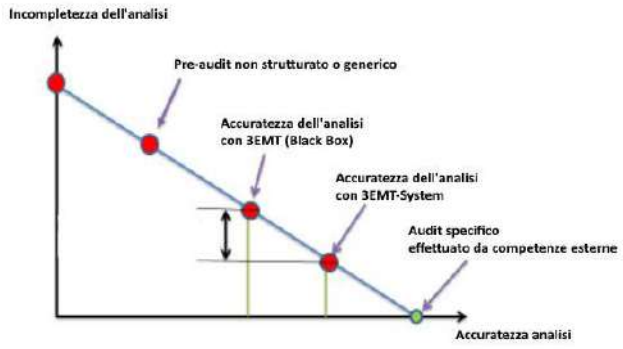


Figura 388. Qualità dell'analisi ai fini dell'efficientamento energetico

Mentre il tool 3EMT è caratterizzato da un approccio "black box" (B.B.), il metodo 3EMT-S integra l'analisi con una procedura "guidata informaticamente" alla struttura impiantistica e alle opportunità tecnologiche di efficientamento, definita "inside box" (I.B.), ai fini di una quantificazione degli efficientamenti possibili.

Il metodo è definito "sistemico" poiché individua una serie di liste di controllo (attività/codice Ateco, impianti, macchine, opportunità tecnologiche di efficientamento energetico), univocamente definite, costituite da elementi coerenti e da matrici di correlazione che definiscono qualitativamente e quantitativamente le connessioni tra gli elementi delle liste stesse. Come raffigurato nella Figura 389 le matrici di correlazione sono tra loro collegate funzionalmente a formare insiemi di matrici coassiali.

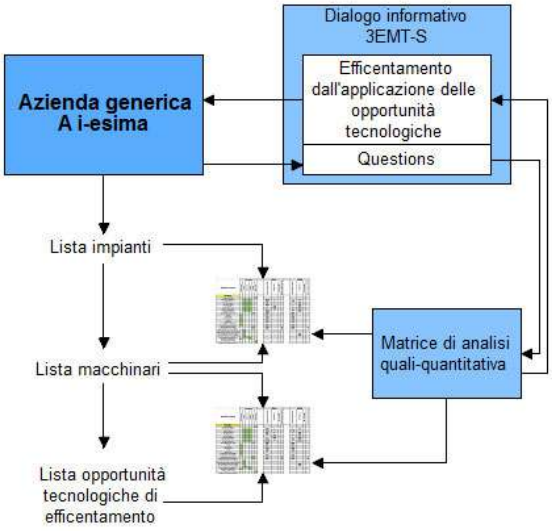


Figura 389. Configurazione funzionale del metodo di indagine 3EMT-S (System)

Nello specifico, con riferimento alla Figura 390, le quattro liste base di controllo realizzate sono:

- le Attività individuate dai codici Ateco e successive aggregazioni;
- gli Impianti di interesse energetico;
- le Macchine energivore;
- le Opportunità Tecnologiche di risparmio energetico.

Le tre matrici base di correlazione sviluppate sono invece le seguenti:

- Attività-Impianti;
- Impianti-Macchine;
- Macchine-Opportunità Tecnologica.

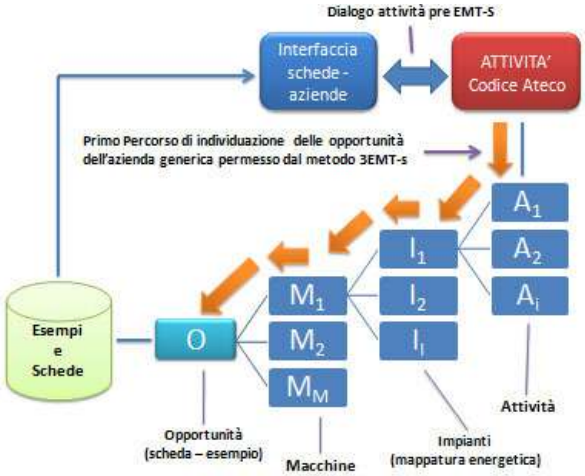


Figura 390.Schema di base del nucleo centrale metodo

L'aspetto più rilevante della metodologia 3EMT-S è quello di mettere in connessione organica e ordinata le banche dati collegate ai codici di attività e la banca dati afferenti alle opportunità tecnologiche di efficientamento con le relative schede di valutazione, già in parte predisposte da ENEA nell'ambito del meccanismo dei Certificati Bianchi; le informazioni contenute nelle schede ENEA dovranno essere adattate per essere interoperabili con il linguaggio di programmazione del tool.

Per fornire un *case study* esemplificativo, il metodo 3EMT-S è stato applicato al Distretto del prosciutto di San Daniele del Friuli sia in termini di singola azienda sia in termini di sistema, realizzando un pre-audit dettagliato.

In Tabella 115 si riporta la matrice impianti-macchine utilizzata per il caso specifico esaminato.

Tabella 115. Matrice impianti/macchine di un prosciuttificio tipo

	MACCHINE					
MATRICE TOTALE	Motori elettrici	Caldaie	Compressori	Ventilatori	Lampade	Coibentazione
IMPIANTI						
Involucro edilizio						■
Cella di raffreddamento		■	■	■		
Cella di salatura		■	■	■		
Cella di pressatura		■	■	■		
Cella di preriposo		■	■	■		
Cella di riposo		■	■	■		
Cella di asciugamento		■	■	■		
Cella di prestagionatura		■	■	■		
Cella di stagionatura		■	■	■		
Imp. Di illuminazione celle					■	
Salatrici	■					
Pressatrici	■					
Massaggiatrici	■					
Lavatrici	■					
Spazzolatrici	■					
Trasporti interni con muletto	■					
Trasporti interni con guidovie	■					
Impianto di illuminazione uffici					■	
Impianto Illuminazione zona produttiva					■	
Impianto trattamento acque servizi ig. San.		■				
Impianto. trattamento acque servizi ciclo tecn.		■				
Impianto riscaldamento invernale uffici		■				
Impianto riscald. Invernale zona produttiva		■				
Impianto di condizionamento uffici		■	■	■		
Impianto produzione aria compressa	■			■		
Involucro edilizio uffici						■
Involucro edilizio zona produttiva						■

La matrice in Tabella 116 vuole mettere in relazione le opportunità tecnologiche con gli impianti e le macchine presenti nei prosciuttifici, in modo da individuare facilmente, all'interno del ciclo produttivo, dove tali opportunità tecnologiche possono essere efficacemente introdotte per i ridurre i consumi di energia.

Successivamente alla individuazione qualitativa ed alla breve descrizione delle opportunità tecnologiche di efficientamento energetico più rilevanti, sono stati analizzati i consumi energetici per tipologia di impianto, procedendo alla valutazione dell'efficientamento potenziale per alcune di dette opportunità: lampade ad alto rendimento, cogenerazione e gruppo frigorifero ad assorbimento.

In particolare, per le tre tecnologie è stata calcolata la variazione del fattore Energetico (F.E.), definito come il consumo mensile di energia elettrica (in kWh) diviso per la produzione annua (in tonnellate).

Tabella 116. Matrice delle opportunità tecnologiche di un prosciuttificio tipo

OPPORTUNITA'	Lampade ad alto rendimento	Rifasamento	Isolamento	Cogenerazione	Macchine ad assorbimento	Recupero calore dai compressori	MACCHINE / IMPIANTI	Motori elettrici	Caldaie	Compressori	Ventilatori	Lampade	Coibentazione	Motori a combustione
							Lampade ad alto rendimento					■		
							Rifasamento	■						
							Isolamento						■	
							Cogenerazione							■
							Macchine ad assorbimento							
							Recupero calore dai compressori			■	■			
			■				Involucro edilizio						■	
			■	■	■		Cella di raffreddamento		■	■	■			
			■	■	■		Cella di salatura		■	■	■			
			■	■	■		Cella di pressatura		■	■	■			
			■	■	■		Cella di preriposo		■	■	■			
			■	■	■		Cella di riposo		■	■	■			
			■	■	■		Cella di asciugamento		■	■	■			
			■	■	■		Cella di prestagionatura		■	■	■			
			■	■	■		Cella di stagionatura		■	■	■			
	■			■			Impianto di illuminazione celle					■		
		■		■			Salatrici	■						
		■		■			Pressatrici	■						
		■		■			Massaggiatrici	■						
		■		■			Lavatrici	■						
		■		■			Spazzolatrici	■						
		■		■			Trasporti interni con muletto	■						
		■		■			Trasporti interni con guidovie	■						
	■			■			Impianto di illuminazione uffici					■		
	■			■			Impianto Illuminazione zona produttiva					■		
				■			Impianto Trattamento acque servizi ig. San.		■					
				■			Impianto Trattamento acque servizi ciclo tecn.		■					
				■		■	Impianto Riscaldamento invernale uffici		■					
				■		■	Impianto Riscald. Invernale zona produttiva		■					
				■		■	Impianto Di condizionamento uffici		■	■	■			
				■			Impianto Prod. Aria compressa	■			■			
			■				Involucro edilizio uffici							■
			■				Involucro edilizio zona produttiva							■

Il *case study* mostra, quale esempio applicativo del metodo e con i limiti di una analisi generalizzata, i risultati quantitativi di efficientamento che sarebbero calcolati in modo automatico dal tool 3EMT-S:

- l'uso di lampade ad alta efficienza permette una riduzione del consumo per 94 kWh per tonnellata di prosciutto prodotto con una incidenza sui consumi totali in termini di risparmio del 7,5% (Tabella 117);
- l'uso della cogenerazione a motore endotermico permette una riduzione del consumo per 110 kWh per tonnellata di prosciutto prodotto, con una incidenza sui consumi totali in termini di risparmio dell'8,8% (Tabella 118);
- l'uso di macchine ad assorbimento abbinate al calore di scarto dei cogeneratori a motore endotermico permette una riduzione di energia elettrica pari a 36,6 kWh pari al 2,9% dei consumi totali (Tabella 119).

Tabella 117. Efficientamento potenziale nell'illuminazione di un prosciuttificio tipo

Fattore Energetico con lampade esistenti	$\text{F. E.}_{\cdot 1} = 188 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Fattore Energetico con lampade ad alto rendimento	$\text{F. E.}_{\cdot 2} = 94 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Differenziale del Fattore Energetico	$\Delta\ \text{F. E.} = 94 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Rapporto incrementale adimensionale	$\frac{\Delta \text{F. E.}_{\cdot \text{illumin.}}}{\text{F. E. T.}_{\cdot 1}} = \frac{94}{188} = 0{,}5$

Tabella 118. Efficientamento potenziale nella cogenerazione in un prosciuttificio tipo

Fattore Energetico Totale senza cogenerazione	$\text{F. E. T.}_{\cdot 1} = 1.252 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Fattore Energetico Totale con cogenerazione	$\text{F. E. T.}_{\cdot 2} = 1.142 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Differenziale del Fattore Energetico Totale	$\Delta\ \text{F. E.}_{\cdot}\ \text{cog.} = 110 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Rapporto incrementale adimensionale	$\frac{\Delta \text{F. E.}_{\cdot \text{cog}}}{\text{F. E. T.}_{\cdot 1}} = \frac{110}{1.252} = 0{,}088$

Per la cogenerazione, la valutazione riportata nella Tabella 118 tiene conto degli spettri di carico elettrico e termico, con una quota parte di fabbisogno elettrico di 200.00 kWh elettrici e una pari quantità di energia termica.

L'energia termica prodotta dai cogeneratori viene utilizzata da macchine ad assorbimento con un CPO di 1. Nella valutazione sommaria si è tenuto conto di un CP delle macchine frigorifere attualmente funzionanti pari a 3.

Tabella 119. Efficientamento potenziale del gruppo frigo di un prosciuttificio tipo

Fattore Energetico Totale con gruppo frigo tradizionale	$\text{F. E. T.}_{\cdot 1} = 1.252 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Fattore Energetico Totale con gruppo frigo ad assorbimento	$\text{F. E. T.}_{\cdot 2} = 1.215{,}4 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Differenziale del Fattore Energetico Totale	$\Delta\ \text{F. E. T. ass} = 36{,}6 \frac{\text{kWh}}{\text{ton/anno}}$
Rapporto incrementale adimensionale	$\frac{\Delta \text{F. E. Tass.}}{\text{F. E. T.}_{\cdot 1}} = \frac{36{,}6}{1.252} = 0{,}029$

Il 3EMT-S è coerente, in larga misura, con la vision del nuovo Piano Energetico Regionale (PER) del Friuli Venezia Giulia, attualmente in inchiesta pubblica: a tal fine, la parte conclusiva del presente studio ha indagato in via preliminare come, opportunamente modificato ed ulteriormente integrato, il 3EMT-S possa diventare anche una metodologia di sistema utilizzabile per la pianificazione territoriale a qualunque livello (dominio territoriale definito: regione, distretto, comune, provincia, bacino generico, ecc.) o dominio discreto (le attività siderurgiche, le strutture ospedaliere, le strutture scolastiche, ecc.). Il metodo considererebbe anche gli aspetti ambientali ed economici, in particolare la CO_2 emessa, e il livello di occupazione, entrambi fattori rilevanti nella pianificazione territoriale.

Il nuovo programma così potenziato, se applicato, porterebbe ad una serie ordinata di indicatori di prestazione e strategie parametrizzate tali da poterle utilizzare per produrre una serie di "traiettorie" che informano il legislatore sui cambiamenti e che sono di utilità per impostare strategie specifiche.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/047.

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Il progetto affronta il tema dell'efficienza energetica degli edifici, tenendo presenti i programmi e le Direttive europee, come la 2010/31/UE, 2012/27/UE, 2014/24/UE ecc., e gli obiettivi nazionali finalizzati a promuovere al massimo l'innovazione tecnologica, gli interventi di efficienza energetica negli edifici, pubblici e privati, il ricorso a procedure di finanziamento tramite terzi e l'utilizzo di finanziamenti europei e nazionali. In tal senso sono state sviluppate attività di ricerca tese a mettere a punto metodologie, strumenti e soluzioni armonizzate e condivise sul tema specifico della efficienza energetica nel settore degli edifici, con particolare riferimento a quelli della P.A..

L'efficienza energetica negli edifici, come riportato nella Strategia Energetica Nazionale (SEN) *è un obiettivo di primaria importanza per il nostro Paese. Un significativo contributo è dato dalle attività di R&S che sono in grado di fornire proposte e soluzioni ad alto valore aggiunto che investono non solo i prodotti e le tecnologie ma anche lo sviluppo di strumenti e metodologie necessarie alle politiche per le programmazioni e gli indirizzi di interventi di efficienza energetica negli edifici.* Al centro delle politiche vi è il lancio di un grande programma che consenta il superamento degli obiettivi europei al 2020 e il perseguimento di una leadership industriale per catturare la forte crescita internazionale attesa nel settore. Come riportato nella SEN, ci si propone di risparmiare ulteriori 20 Mtep di energia primaria al 2020, equivalente ad un risparmio di quasi il 25% rispetto allo scenario di riferimento europeo (superando così l'obiettivo del 20%), evitando l'emissione di circa 55 milioni di tonnellate di CO_2 l'anno e l'importazione di circa 8 miliardi di euro l'anno di combustibili fossili. In questo programma un ruolo importante è ricoperto dagli interventi di efficienza energetica negli edifici.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività del progetto consistono nello studio, sviluppo e valutazione di strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica degli edifici del settore residenziale e non residenziale, finalizzate al contenimento dei consumi energetici, alla riduzione dei gas serra e ad indirizzare le politiche degli interventi di riqualificazione , con riferimento agli edifici della Pubblica Amministrazione (PA). Sono stati tenuti in debito conto gli impegni assunti dalla SEN e presenti nel PAEE 2013 e gli adempimenti che le nuove Direttive europee impongono agli Stati Membri. Si fa riferimento alle indicazioni e prescrizioni contenute nella direttiva 27/2012/CE e nel decreto di recepimento D.Lgs 102/2014, in cui viene data particolare attenzione agli edifici del settore pubblico, residenziali e non residenziali, per i quali si chiedono una serie di dati di caratterizzazione del parco immobiliare, e sui dati dei consumi energetici stimati e/o da bolletta sui quali poter sviluppare misure e standard di intervento accompagnati da una diagnosi energetica e da una sensibilizzazione e formazione del personale tecnico delle PA.

Si è predisposto, da parte del Ministero dello Sviluppo Economico, un Piano di Interventi Nazionale che, sulla base dei dati raccolti e sulla previsione degli interventi di efficienza energetica da effettuare, per rispondere a quanto prescritto negli artt. 4 e 5 del D.Lgs 102/2014 e si sono promosse adeguate misure e provvedimenti per dare un forte impulso all'efficientamento energetico degli edifici del pubblico già dal 2014. Inoltre è stato predisposto un Piano di interventi per gli edifici della Pubblica Amministrazione Centrale (PREPAC) ed istituita una Cabina di Regia che dovrà promuovere e gestire gli interventi di riqualificazione energetica di questa popolazione di edifici per rispondere all'obbligo previsto da decreto di riqualificare il 3% per anno della superficie occupata dalla Pubblica Amministrazione Centrale. In relazione a quanto previsto dalla Legge 90/2013 è stato predisposto un piano per incentivare gli edifici Nearly Zero Energy Building (NEZB) - PANZEB. Infatti, per gli edifici pubblici, tali livelli di prestazione energetica saranno obbligatori dal 1° gennaio 2019 mentre lo saranno dal 1° gennaio 2021 per tutti gli edifici privati, fa eccezione la Lombardia che ha anticipato al 2016. Questo comporta, oltre che lo studio di particolari forme per il finanziamento degli interventi di efficientamento degli edifici, anche lo sviluppo di strumenti, per la valutazione degli indicatori di efficienza energetica, componenti, per migliorare le prestazioni dell'involucro e degli impianti, e servizi tecnologici integrati in grado, a parità e qualità di servizio reso, di offrire il risultato migliore tenendo presente il fattore costo/beneficio. Per la realizzazione degli interventi si dovranno predisporre una serie di attività che investiranno la parte tecnico-amministrativa (contrattualistica, bandi, ecc.) e quella per la conoscenza di strumenti e procedure, che le PA possono utilizzare, per l'accesso ai fondi messi a

disposizione dalla UE.

In quest'ambito la recente emanazione dei decreti sui Requisiti Minimi e le Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici comporteranno l'applicazione di nuovi standard prestazionali, nuove procedure e modelli applicativi per la diagnosi energetica, per la Certificazione energetica degli edifici, per il calcolo dell'Indicatore Prestazionale da fonte non rinnovabile (EPnren), per la definizione di nuovi benchmark per le singole destinazioni d'uso, per l'accesso a finanziamenti europei e nazionali, per la sensibilizzazione dell'utenza sulla convenienza nell'applicazione di interventi per l'efficienza energetica e sull'applicazione di sistemi per la misura dell'efficacia degli interventi.

Le potenzialità degli interventi di efficientamento in Italia, molte dei quali con ritorno economico positivo, sono importanti, ma numerose barriere all'adozione - specifiche nei diversi settori di applicazione - ne impediscono la piena realizzazione. Gli sforzi per il raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico saranno quindi orientati al superamento delle barriere all'applicazione di tecnologie per l'efficientamento, razionalizzando e rinforzando strumenti ed azioni dedicate a ciascun segmento e settore. In particolare si prevede:

- il rafforzamento di standard minimi e normative, in particolare per quanto riguarda l'edilizia ed il settore dei trasporti;
- l'estensione nel tempo delle detrazioni fiscali, prevalentemente dedicate al settore delle ristrutturazioni civili, che andranno aggiornate per renderle più efficaci ed efficienti in termini di costo/beneficio.

La Nuova Strategia Energetica Nazionale prevede:

- l'introduzione di incentivazione diretta per gli interventi della Pubblica Amministrazione, impossibilitata ad accedere al meccanismo delle detrazioni e che intendiamo svolga un ruolo di esempio e guida per il resto dell'economia;
- il rafforzamento degli obiettivi e dei meccanismi dei Certificati Bianchi, prevalentemente dedicati al settore industriale, che avranno un ruolo fondamentale data la rilevanza del settore e l'efficienza di costo che uno strumento di mercato come questo dovrebbe garantire.

Oltre agli strumenti citati sopra, saranno inoltre determinanti alcuni fattori abilitanti quali il rafforzamento del modello ESCO, l'azione di controllo e enforcement delle misure, le azioni di comunicazione e sensibilizzazione, il miglioramento del sistema di monitoraggio e contabilizzazione dei risultati e il supporto alla ricerca e all'innovazione.

L'insieme delle misure citate vengono stimate in circa 15-20 miliardi di euro di supporto pubblico cumulato al 2020, in grado di stimolare 50-60 miliardi di euro di investimenti complessivi, con importanti ricadute su un settore industriale in cui si vuole puntare alla leadership internazionale e con un impatto di circa 8 miliardi di euro l'anno di risparmio di combustibile importato.

Le attività di ricerca del progetto hanno la finalità di dare un significativo contributo al raggiungimento degli obiettivi europei e nazionali sull'efficienza energetica degli edifici, definire valori di benchmark e standard prestazionali a supporto della normativa e delle politiche energetiche. Le attività tengono conto delle esigenze del mercato e degli utenti finali nel rispetto dell'ambiente e con un uso razionale dell'energia, e dell'innovazione tecnologica.

Lo sviluppo delle tecnologie per l'efficienza energetica, l'uso di nuove tecnologie e la conoscenza di dati tipologici e dei consumi energetici degli edifici sono le principali azioni con le quali è possibile far fronte alla riduzione dei consumi termici e alla diminuzione della richiesta di energia elettrica nel settore civile. Le attività del progetto costituiscono la base per l'applicazione di soluzioni tecnologiche e lo sviluppo di strumenti di governance atti a favorire il consenso verso tali strategie e la loro diffusione.

Gli obiettivi delle attività sono: lo sviluppo delle nuove tecnologie per l'efficienza energetica, lo sviluppo di nuovi strumenti e modelli di valutazione per le scelte degli interventi per l'involucro, opaco e trasparente, e gli impianti, nella riqualificazione energetico-ambientale degli edifici, la comunicazione e l'informazione all'utenza, che concorrono a migliorare l'efficienza energetica, la competitività e lo sviluppo del mercato del settore dell'edilizia, nuovi strumenti di contratti a prestazione garantita. Tali obiettivi rispondono anche alle prescrizioni per gli Stati Membri definite nelle Direttive UE (2010/30/UE, 2010/31/UE e 2012/27/UE) inerenti l'efficienza energetica negli edifici, di nuova costruzione o da riqualificare.

Il progetto si articola in due parti, una Parte A che ha come organo esecutore ENEA e una Parte B con organo esecutore il Polo Tecnologico del Sulcis. Quest'ultima prevede sia attività che hanno come organo esecutore SOTACARBO (B.1) sia attività con organo esecutore ENEA (Parte B.2). Nel dettaglio il progetto è strutturato come segue:

Linea Progettuale A

a. Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica
b. Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni
c. Implementazione di una metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di illuminazione naturale
d. Tecnologie per involucri edilizi ad elevate prestazioni
e. Piano per l'informazione, sensibilizzazione e la diffusione sui temi dell'efficienza energetica verso le pubbliche amministrazioni
f. Comunicazione e diffusione dei risultati

Linea Progettuale B

a. Realizzazione un data base degli edifici pubblici
b. Metodologia di analisi del sistema edificio/impianto per l'efficientamento energetico di edifici vincolati

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

LINEA PROGETTUALE A

a. Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso, ufficio e scuole. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Il recente cambiamento del quadro normativo, europeo e nazionale sull'efficienza energetica comporterà una profonda revisione degli standard prestazionali e delle procedure da sviluppare in tale ambito. Il recepimento della direttiva recast 31/2010/UE e della 27/2012/UE non riguardano solo l'efficienza energetica degli edifici dal punto di vista tecnico e tecnologico, ma prevedono lo sviluppo di modelli e strumenti per il finanziamento degli interventi e per la messa punto di contratti di Energy Performance Contract. I temi che vengono affrontati sono quelli relativi alla realizzazione di edifici Nearly Energy Zero Building, per il nuovo e l'esistente da riqualificare, le disposizioni introdotte in materia di monitoraggio dei consumi degli edifici, l'applicazione della metodologia cost-optimal in fase di revisione, e che dovrà essere integrata da un'analisi di sensibilità sugli standard prestazionali proposti in considerazione del fattore costo/beneficio, la messa a punto di strumenti e modelli per favorire gli interventi di riqualificazione negli edifici della PA, la realizzazione di un dimostratore, e la definizione di modelli di aggregazione della domanda rivolta, in modo particolare, alle PA di medie e piccole dimensioni.

a.1 Analisi

Metodo semplificato per la scelta degli interventi ottimali per la riqualificazione del fabbricato. Atlante interventi di riqualificazione energetica

La ricerca mette a punto uno strumento di consultazione di facile comprensione per utenti, progettisti e costruttori, atto a selezionare e confrontare diverse ipotesi di riqualificazione dell'involucro edilizio in modo immediato.

A tale fine è stato sviluppato un programma di lavoro che comprende lo sviluppo di:

- un metodo di calcolo del costo dell'energia risparmiata (CCE, espresso in €/kWh) tenendo in considerazione le peculiarità poste dall'involucro edilizio e tenendo conto sia del costo della fonte energetica di riferimento (di solito il gas naturale), sia degli investimenti richiesti dall'adozione dei singoli interventi, sia delle condizioni climatiche;
- un programma di calcolo che consente il calcolo del CCE per diverse strutture edilizie e per diverse tipologie di intervento. Il programma contiene una banca dati completa su caratteristiche dei componenti più diffusi (chiusure opache e trasparenti), tenendo conto anche dei periodi storici e una banca dati degli inventi di riqualificazione (costi e caratteristiche tecniche). Il programma, sulla base degli input forniti (tipo di struttura di partenza, località e tipo di intervento di riqualificazione), calcola il CCE permettendo di stabilire in modo rapido la configurazione che giustifica i costi richiesti;
- un "atlante" (ovvero una raccolta di casistiche applicative) per la scelta immediata degli interventi di riqualificazione degli edifici. Infatti l'atlante permette, con un colpo d'occhio, di individuare, per ogni struttura di partenza e per zona climatica, quali sono gli interventi più convenienti secondo una modalità grafica intuitiva. L'Atlante viene reso disponibile su supporto cartaceo o elettronico (si tratta - in sostanza -

del programma di calcolo di cui al punto precedente che mette a disposizione, a livello di schermo, l'output sulla base del quale è stato poi preparato l'atlante stesso).

Poiché il patrimonio immobiliare nazionale risulta essere particolarmente vetusto e obsoleto si ha l'esigenza di contenere alla base, attraverso l'aumento dell'efficienza energetica del fabbricato, gli elevatissimi consumi; per contenerli non viene quindi richiesto solamente il soddisfacimento di parte del fabbisogno energetico attraverso le fonti di energia rinnovabile, ma è necessario concentrarsi sull'ottimizzazione dell'involucro edilizio opaco e trasparente dei fabbricati esistenti. Proprio per tali ragioni l'atlante esamina le diverse soluzioni fornendo un indice sintetico di sostenibilità economica - ambientale.

L'atlante elaborato si basa quindi sulle strutture edilizie contenute nel Rapporto tecnico elaborato dal CTI UNI/TR 11552 che riporta componenti edilizi relativi a: pareti in laterizio pieno; pareti in pietra; pareti in materiali composito; pareti a cassa vuota; pareti prefabbricate; solai verso esterno o ambienti non climatizzati; coperture piane; coperture inclinate.

I calcoli sono stati eseguiti in riferimento alla disponibilità di dati economici del prezziario DEI, per tale ragione le simulazioni fanno riferimento a determinate tipologie di prodotti isolanti (quelle maggiormente diffuse sul mercato), mentre sono stati trascurati altri prodotti di cui non si ha conoscenza dei relativi costi. Per l'involucro opaco il risparmio energetico è stato stimato attraverso appositi algoritmi di calcolo con riferimento ai dati climatici della UNI 10349:1994 e al solo periodo di climatizzazione invernale. Lo scenario selezionato riguarda il medio termine (30 anni), ovvero si ipotizza che per tale periodo, per l'involucro riqualificato non ci sia manutenzione. Lo studio presenta quindi per ogni struttura dell'Abaco UNI/TR 11552 tabelle contenenti quadri sintetici della sostenibilità economica. Le celle delle tabelle presentano diversa campitura in base alla convenienza, il verde rappresenta una convenienza economica positiva mentre, al contrario, le graduazioni di rosso mettono in evidenzia la scarsa convenienza economica della soluzione presentata.

Nel caso della valutazione della sostenibilità energetico economica degli involucri opaco e trasparente il CCE varia, per località, in base all'orientamento del componente edilizio poiché da questo dipendono direttamente gli apporti solari gratuiti che influenzano il fabbisogno di energia termica utile del fabbricato. A titolo di esempio in Figura 391 sono riportate le anteprime relative alla valutazione del CCE per un generico involucro opaco verticale, nella prima riga, in ordine da sinistra verso destra, vi è il CCE per componente orientato a nord, nord-est (e nord-ovest), est, nella riga successiva, CCE per componente orientato a sud-est, sud infine l'ultima anteprima riporta il risultato finale contenuto nell'Atlante che considera mediamente l'influenza della radiazione solare a prescindere dall'orientamento del componente edilizio. Il calcoli considerano un fattore di assorbimento solare pari a 60% (colorazione media della superficie esterna del componente sottoposto a riqualificazione). Gli schemi riportano anche i riferimenti ai requisiti minimi al 2015 (colore giallo) e al 2019-2021 (colore arancio). Dai grafici è dunque possibile determinare, partendo dalla trasmittanza termica, le sostenibilità economica per cm aggiuntivo di isolante installato e il valore di riferimento secondo il D.M. 26/06/2015.

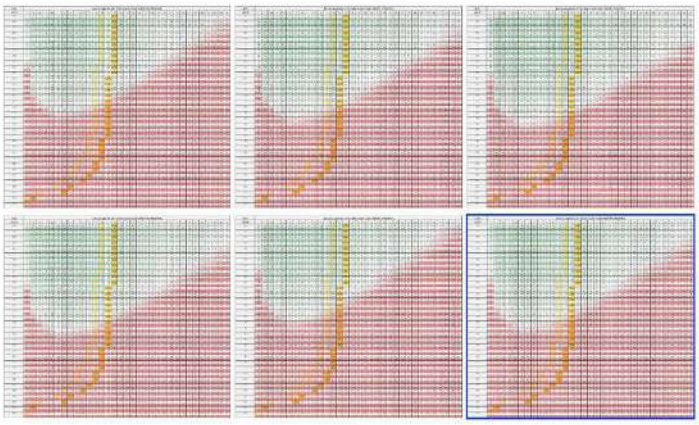


Figura 391. Riqualificazione di componente edilizio verticale, località Torino. Calcolo del CCE per diversi orientamenti. Materiale isolante utilizzato lana di vetro (LV) con λ = 0,032 W/(m × K) applicato a cappotto

Un approccio analogo è stato seguito anche per le finestrature.

Per una descrizione dettagliata del lavoro svolto nell'ambito dell'accordo di collaborazione con il CTI si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/062 e relativo allegato.

Definizione degli edifici tipo di riferimento da utilizzare per i calcoli e le valutazioni di prestazione energetica degli edifici residenziali e non residenziali. Analisi delle prestazioni energetiche degli edifici, da applicare agli edifici di riferimento, per un confronto dei risultati utilizzando un calcolo stazionario ed uno dinamico

Oggetto principale delle attività svolte nel quadro della collaborazione con il Politecnico di Torino è il confronto tra la metodologia di calcolo semi-stazionaria (UNI/TS 11300) e i modelli di simulazione dinamica per la valutazione della prestazione energetica degli edifici in accordo con quanto richiesto agli Stati Membri dalla Direttiva 2010/31/UE.

L'attività ha previsto la valutazione mediante software di calcolo dinamico e in regime semi-stazionario del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva ed invernale di edifici residenziali e ad uso ufficio, rappresentativi del parco edilizio italiano. Lo scopo è quello di definire le opportune opzioni di congruenza tra le metodologie di calcolo dinamico e semi-stazionario, nonché individuare eventuali limiti e opportunità nell'applicazione della procedura semi-stazionaria, ad oggi strumento di calcolo nazionale ufficiale per l'attuazione della Direttiva 2010/31/UE.

Di seguito si riportano le quattro fasi nelle quali si struttura il lavoro, e l'attuale stato di avanzamento:

1. Aggiornamento ed implementazione degli edifici oggetto di valutazione energetica

A partire dagli edifici di riferimento già definiti nell'ambito delle precedenti annualità sono stati individuati quattro casi studio:

- due edifici residenziali (villetta e condominio);
- due edifici ad uso ufficio (tradizionale e moderno).

Gli edifici sono collocati in cinque differenti città rappresentative delle principali zone climatiche italiane: Campobasso, Milano, Roma, Pescara e Catania. Gli edifici considerati sono di nuova costruzione e conformi alle attuali prescrizioni energetiche riportate nel DM Requisiti Minimi 26 giugno 2015.

2. Valutazione del fabbisogno energetico mediante simulazione dinamica

Gli edifici oggetto di valutazione energetica sono stati modellati con il software EnergyPlus mediante l'impiego dell'interfaccia di Design Builder, secondo i dati dimensionali che risultano rappresentativi di ciascuna tipologia edilizia da studi in materia e già oggetto di precedenti attività. Mantenendo invariati i dati tipologici dell'edificio oggetto di studio, alla geometria di ciascun caso studio vengono in seguito associate le caratteristiche costruttive dell'edificio: ciò è stato fatto attraverso differenti template variabili in funzione della zona climatica.

Gli edifici non prevedono la definizione di un impianto specifico e sono quindi simulati in modalità "ideal load" al fine di determinare il solo fabbisogno ideale di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. Il periodo di riscaldamento varia a seconda della zona climatica in base al D.P.R. n.74 del 2013. Il periodo di raffrescamento è considerato complementare a quello di riscaldamento nell'arco dell'anno.

Per un edificio selezionato, l'edificio ad uso ufficio tradizionale, sono state effettuate simulazioni variando la configurazione dell'edificio in termini di isolamento e massa superficiale. In particolare si sono prese in considerazione due configurazioni di trasmittanza termica:

- la prima (U_1) prevede valori di trasmittanza rispondente ai requisiti minimi in vigore dal 2015[15];
- la seconda (U_2) conforme ai requisiti minimi in vigore dal 2019[1].

e due configurazioni di massa superficiale

- massa superficiale maggiore di 230 kg/m^2 (M1)
- massa superficiale minore di 230 kg/m^2 (M2).

Le quattro combinazioni di edificio che ne derivano (U1M1, U1M2, U2M1 e U2M2) sono state analizzate nelle cinque città rappresentative delle zone climatiche italiane.

Sul medesimo edificio si è ipotizzato l'inserimento di un impianto di climatizzazione invernale ed estiva, configurato come segue:

- rete idronica ad acqua calda e ad acqua refrigerata con ventilconvettori a quattro tubi;
- caldaia a condensazione per la generazione di energia termica;
- gruppo frigorifero a compressione per la generazione di energia frigorifera.

Per questo caso studio sono previste due tipologie di funzionamento, uno continuo e l'altro con attenuazione e

[15] Ai sensi del D.M. 26/06/2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici."

raffrescamento on/off in base al fattore di occupazione.

3. Valutazione del fabbisogno energetico mediante metodo semi-stazionario

Per gli stessi edifici individuati si è valutato il fabbisogno di energia in regime stazionario con l'applicazione delle specifiche tecniche UNI/TS 11300. In particolare per tutti gli edifici è stato calcolato il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva ed invernale secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-1 per il periodo di riscaldamento di legge e per il periodo di raffrescamento complementare a quello di riscaldamento, come nella simulazione dinamica.

Per l'edificio ad uso ufficio tradizionale, situato in tre città rappresentative delle principali zone climatiche italiane e caratterizzato da una struttura in un caso massiva e nell'altro leggera, è stato determinato anche il fabbisogno di energia primaria per un impianto a caldaia a condensazione per la climatizzazione invernale secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-2 e un gruppo frigorifero a compressione per la climatizzazione estiva secondo la specifica tecnica 11300-3. Il fabbisogno energetico è stato valutato in caso di impianto con funzionamento continuo e con funzionamento intermittente secondo la norma UNI EN ISO 13790.

Si è posta particolare attenzione alla coerenza nei dati di ingresso utilizzati nelle due metodologie di calcolo.

4. Comparazione dei modelli dinamico e semi-stazionario per la valutazione dei fabbisogni energetici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici

In questa successiva e ultima fase, i dati derivanti dalle simulazioni dinamiche sono comparati con quelli derivanti dall'applicazione del modello di calcolo semplificato UNI/TS 11300, con particolare attenzione alle modalità di valutazione dell'inerzia termica dell'edificio e della gestione dell'impianto per la climatizzazione da parte di entrambi gli strumenti di calcolo.

Il confronto porta a concludere che il metodo semi-stazionario sovrastima il fabbisogno per la climatizzazione invernale e sottostima il fabbisogno per la climatizzazione estiva.

In riferimento alla diverse combinazioni di massa e di trasmittanza termica dell'edificio ad uso ufficio tradizionale si può rilevare un minore scostamento tra i due modelli di calcolo nei casi studio con massa leggera principalmente per la climatizzazione invernale, mentre per la climatizzazione estiva al variare della massa dell'edificio gli scostamenti percentuali su base annua risultano minimi.

Una descrizione dettagliata del lavoro è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/063 e relativo allegato.

Analisi dell'influenza del comportamento dell'utenza sui consumi energetici finali degli edifici: fattori influenzanti, modelli probabilistici per la simulazione degli occupanti e profili comportamentali tipo. Analisi e sviluppo di tecnologie per la climatizzazione ambientale a temperatura moderata. Utilizzo di materiali superisolanti nell'ambito edilizio

Analisi dell'influenza del comportamento dell'utenza sui consumi energetici finali degli edifici: fattori influenzanti, modelli probabilistici per la simulazione degli occupanti e profili comportamentali tipo

L'attività oggetto di studio si sviluppa all'interno del Annex 66 ECB "Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings" dell'IEA. Questa ricerca ha come principale obiettivo una migliore descrizione dei consumi energetici degli edifici definita attraverso una profonda analisi dell'influenza del comportamento dell'utente sulla qualità ambientale indoor e sulla prestazione energetica degli edifici.

L'attività condotta dal gruppo TEBE del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino sul tema definizione della valutazione sui consumi energetici dei comportamenti dell'utenza, si è delineata mediante uno studio teorico ed empirico sull'incertezza della valutazione del consumo energetico dovuta al comportamento degli occupanti in edifici residenziali. Lo scopo principale di questa ricerca è quello di proporre una metodologia per modellare e simulare il comportamento dell'utente nel contesto dei consumi energetici reali. La metodologia si delinea con uno spostamento verso una modellazione probabilistica del comportamento degli occupanti relativo al controllo dell'ambiente interno: l'obiettivo è quello di determinare modelli di comportamento degli utenti capaci di descrivere l'interazione con l'edificio e i sistemi.

La procedura proposta è quindi applicata a dei casi di studio: vengono definiti dei modelli di comportamento degli occupanti relativi all'uso delle finestre e all'uso del termostato in ambito residenziale e in edifici adibiti a terziario. In parallelo si è quindi indagata l'influenza di differenti livelli d'interazione con i principali sistemi di controllo delle condizioni climatiche e ambientali a disposizione degli utenti, sul livello di comfort termico e dunque sui consumi energetici per il riscaldamento. Profili comportamentali per utenti Attivi, Medi, Passivi sono stati implementati secondo passaggi logici incrementali al fine di ottenere la più accurata riproduzione possibile dell'interazione

dell'utente con i sistemi di controllo e l'involucro edilizio. Seguendo tale approccio, la ricerca qui presentata ha evidenziato quale combinazione di profilo comportamentale di utente sia il più "energy-waster" o "energy-saver" nell'ambito degli edifici residenziali.

Nel complesso, lo studio condotto sottolinea l'importanza di indagare e descrivere il comportamento dell'individuo legato all'interazione con edifici e sistemi, al fine di comprendere le differenze nei consumi di energia reali degli edifici. In sintesi, il valore aggiunto dell'attività svolta rispetto allo stato dell'arte, si delinea attraverso l'identificazione della complessità e multidisciplinarità del tema con una profonda conoscenza della natura, logica, tipologia del comportamento dell'utente legato all'uso di energia negli edifici e la proposta di un inquadramento comune di lavoro tra scienze tecniche e scienze sociali. Inoltre, il vero punto di innovazione della ricerca sul comportamento dell'utente legato all'uso dell'energia, è stato lo sviluppo di una metodologia per modellare e simulare il comportamento "energetico" dell'utente al fine di ottenere una previsione più accurata delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici.

Infine, è da sottolineare come nonostante l'applicazione descritta in questa attività sia limitata per la maggior parte all'analisi delle azioni dell'utente nell'ambito residenziale, il metodo presentato può essere applicato anche ad altri tipi di azioni comportamentali in edifici per uffici.

Analisi e sviluppo di tecnologie per la climatizzazione ambientale a temperatura moderata

L'attività oggetto di studio si è sviluppa all'interno del Annex 59 ECB "High Temperature Cooling and Low Temperature Heating in Buildings" dell'IEA. Nello specifico le attività di ricerca si sono concentrate nel programma del Subtask D dell'Annex , che è focalizzato sull'analisi dei sistemi nel loro insieme. L'obiettivo primario è stato quello di ideare e/o analizzare dei sistemi di riscaldamento a bassa temperature e dei sistemi di raffrescamento ad alta temperatura in un'ottica olistica, dalle sorgenti di energia sino ai terminali di impianto. In quest'ambito l'attività svolta dall'unità di ricerca del Politecnico di Torino è consistita nell'ideare e sviluppare un sistema solare termico innovativo basato su materiali a cambiamento di fase fluidizzati (mPCS).

La ricerca è stata divisa in due parti: la prima legata ad un approfondimento sulle proprietà termofisiche del materiale ha comportato a calcolare l'entalpia specifica del mPCS per diverse concentrazioni e alla costruzione di un modello fisico in grado di predire il fenomeno di creaming.

La seconda parte dell'attività sperimentale è consistita nella realizzazione di monitoraggi su un dimostratore in scala reale di un sistema solare termico alimentato a mPCS. In una prima fase ci si è concentrati sul debug dell'apparato di controllo e sulla costruzione di un caso di riferimento attraverso dei test condotti su un pannello ad acqua glicolata. L'ultimo periodo dell'attività ha portato a monitorare un pannello alimentato a mPCS con una concentrazione del 10% di microcapsule. Futuri esperimenti consentiranno di valutare il funzionamento del pannello a concentrazioni diverse ed in presenza di differenti condizioni al contorno.

Utilizzo di materiali superisolanti nell'ambito edilizio

Le attività di ricerca svolte nell'ambito dell'Annex 65 ECB dell'IEA, sono state volte alla definizione di metodi numerico/sperimentali per la valutazione delle reali prestazioni termiche dei materiali superisolanti quando applicati agli edifici.

Nel dettaglio sono stati eseguiti in una prima fase test di laboratorio finalizzati alla definizione di procedure per la misura della conduttività termica di VIPs (Vacuum Insulation Panels) attraverso un termoflussimetro con anello di guardia. I risultati ottenuti hanno dimostrato come le condizioni di prova possano influenzare la misura della conduttività termica. In particolare i principali parametri che ne influenzano la prestazione e l'incertezza di misura risultano rispettivamente: la temperatura media della prova e la differenza temperatura tra le piastre.

Sono stati inoltre elaborati modelli e metodi di valutazione numerico-sperimentale dei ponti termici nei materiali superisolanti a scala di componente. La valutazione dell'effetto dei ponti termici è stata effettuata attraverso analisi numeriche e sperimentali sui giunti costruttivi dei VIPs. In particolare è stato analizzato l'effetto di due diverse tipologie di giunto: quello dovuto all'accoppiamento di due pannelli VIPs (giunto d'aria) e quello di tipo strutturale costituito da listelli per il fissaggio meccanico costituiti da diversi materiali aventi diversa conducibilità termica.

In ultimo l'effetto dei ponti termici dovuto all'accoppiamento di VIPs è stato valutato in termini di trasmittanza media di facciata per diverse tipologie di parete (caratterizzate da diversi valori di resistenza termica totale). A tal fine sulla base delle analisi numeriche condotte per l'individuazione dei valori di trasmittanza termica lineare per ogni configurazione di parete analizzata è stato sviluppato un modello di calcolo empirico per mezzo di interpolazioni polinomiali.

I modelli di calcolo sono stati successivamente impiegati per determinare l'influenza dello scambio termico attraverso i ponti termici sul bilancio energetico dell'edificio ed in particolar modo sul coefficiente globale di scambio termico per trasmissione. Dai primi risultati è stato possibile evincere che l'influenza delle reali prestazioni in opera dei VIPs (considerando l'effetto dei ponti termici) possono avere un effetto non trascurabile sul bilancio totale di energia dell'edificio.

Una descrizione dettagliata del lavoro dal Politecnico di Torino è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/064.

Aggiornamento del SW semplificato DOCET per la certificazione energetica degli edifici residenziali esistenti per l'adeguamento alle nuove norme in vigore

Obiettivo di questa attività svolta da ENEA in collaborazione con l'istituto per le Tecnologie della Costruzione del CNR (ITC-CNT) è stato l'aggiornamento del DOCET, software semplificato per la Certificazione Energetica degli edifici esistenti del residenziale.

Il DLGS 192/05 di attuazione della direttiva 2002/ 91/CE relativa alle prestazioni energetiche degli edifici (EPBD) prevedeva, all'articolo 6 comma 9, la definizione di metodi semplificati per la certificazione energetica, che minimizzassero gli oneri per gli utenti. In questo contesto l'ITC-CNR e l'ENEA avevano sviluppato il software "DOCET" (fino all'ultima versione disponibile 2.09.11.02 utilizzabile fino al 2 ottobre 2014) che implementava la procedura definita nelle norme tecniche di supporto all'EPBD.

Nel corso della presente annualità al software sono stati apportati gli aggiornamenti richiesti dalla emanazione delle nuove norme UNI TS 11300:2012 e di quelli prescritti dai decreti attuativi del MiSE del 26 giugno 2015 relativi ai Requisiti Minimi e alla Linee Guida per la Prestazione Energetica degli edifici. L'aggiornamento del DOCET ha portato ad una sostanziale modifica dello strumento ed ha richiesto una serie di riunioni di chiarimento con il MiSE in cui sono stati concordati alcuni criteri per la semplificazione e i casi studio per la validazione del metodo che, come prescritto dal decreto, sarà lo strumento di riferimento per la certificazione di metodi semplificati commerciali.

Lo strumento di calcolo predisposto per la certificazione energetica di edifici residenziali esistenti con superficie utile inferiore a 200 m^2 è messo a disposizione gratuitamente online sul sito istituzionale di ENEA per i tecnici certificatori come previsto dalle nuove Linee Guida per la Certificazione Energetica. Attraverso DOCET il tecnico certificatore sarà in grado di offrire una prestazione professionale nel pieno rispetto delle normative vigenti e con costi contenuti per il committente.

Nel rapporto RdS/PAR2014/065 è illustrato lo schema e le procedure di semplificazione adottate.

Il software SEAS per le diagnosi energetiche: interventi di assistenza e formazione e sviluppo di un modello semplificato per gli edifici ad uso residenziale

Nelle precedenti annualità ENEA e il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa, è stata elaborata una metodologia per la diagnosi energetica degli edifici ed è stato creato un software di simulazione energetica dotato di interfaccia grafica, dedicato agli edifici ad uso residenziale, uffici, scuole, degenze ospedaliere e alberghi. SEAS (Software Energetico per Audit Semplificati), disponibile gratuitamente da novembre 2014 nella versione 3.0, è in grado di calcolare i fabbisogni energetici relativi ai servizi di riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione ed altre utenze elettriche, nonché di stimare i risparmi energetici ed economici ottenibili attraverso opportuni interventi di riqualificazione. Il software ha suscitato un notevole interesse, essendo stato scaricato da circa trentamila professionisti.

Su queste basi, durante questa annualità sono stati svolti interventi di formazione e assistenza per gli utenti del software, oltre a proseguire lo sviluppo del modello di diagnosi energetica degli edifici, per renderlo uno strumento ancora più flessibile e in grado di rispondere nel migliore dei modi alle esigenze del territorio e del mercato. In particolare, sono state svolte le seguenti macro-attività:

- predisposizione di documentazione di assistenza agli utenti di SEAS (dalle oltre mille domande pervenute via e-mail, ne sono state selezionate circa 50 tra le più significative; domande e relative risposte sono pronte per essere pubblicate sul sito istituzionale del software, in un'apposita sezione di F.A.Q.);
- registrazione audiovisiva di un corso di formazione di base su SEAS (in aggiunta ai manuali e ai casi studio già disponibili, abbiamo preparato un corso in modalità e-learning, nella forma di 21 "pillole" di circa 5 minuti ciascuna; esso è pronto per essere caricato sul sito istituzionale e visionato liberamente in streaming);

- elaborazione di un modello semplificato di SEAS dedicato esclusivamente agli edifici ad uso residenziale (per semplificare la procedura di diagnosi energetica nel caso di edifici residenziali, abbiamo sviluppato un modello termico dinamico a parametri concentrati, denominato SEAS Light, che, nonostante un numero ridotto di input, è in grado di fornire stime attendibili dei fabbisogni termici del sistema edificio – impianto, oltre ad essere facilmente estendibile alla simulazione delle richieste di energia per la climatizzazione estiva).

In aggiunta a queste attività sono stati individuato alcuni bug informatici che saranno assenti nella release 3.1 di SEAS, sono iniziati seminari e corsi di formazione sul territorio riguardanti l'applicazione pratica del software (e abbiamo pubblicato articoli scientifici (che analizzano l'accuratezza e i limiti del metodo implementato.

In futuro, si dovrà compiuta un'ulteriore promozione alla diffusione e al corretto utilizzo del software SEAS per effettuare le diagnosi energetiche sugli edifici del territorio nazionale, in particolare attraverso specifici corsi di formazione per i professionisti e gli uffici tecnici delle Pubbliche Amministrazioni. Queste attività sulla diagnosi energetica sono strategiche, infatti esse sono del tutto in linea con la direttiva europea sull'efficienza energetica 2012/27/UE e il decreto legislativo di attuazione 102/2014, contribuiscono inoltre a sviluppare e diffondere le migliori pratiche di efficienza energetica, utili a breve anche per la progettazione di edifici ad energia quasi zero (nearly Zero Energy Buildings, nZEBs), e rientrano tra i passi necessari per il raggiungimento degli obiettivi adottati dalla Commissione Europea nel Quadro per il Clima e l'Energia 2030.

L'attività è descritta in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2014/068.

a.2 Strumenti

Analisi della dotazione impiantistica di climatizzazione (estiva ed invernale) del patrimonio edilizio ad uso residenziale e terziario e valutazione dell'impatto economico in relazione a misure di politiche energetiche e ambientali finalizzate a incidere sensibilmente sull'efficienza negli usi finali e alla promozione di fonti di energia rinnovabile

La ricerca, svolta nel quadro della collaborazione con il CRESME, ha attraversato tre principali fasi: la misurazione della dotazione impiantistica nel patrimonio edilizio, residenziale e terziario; l'analisi e il dimensionamento dei soggetti economico-produttivi coinvolti nel mercato degli impianti; l'analisi delle problematiche attuali e in prospettiva nel settore dell'industria, del commercio e dell'installazione degli impianti. Gli esiti di queste tre fasi hanno permesso di sviluppare alcune simulazioni finalizzate a misurare l'impatto di eventuali politiche energetiche.

- *La dotazione impiantistica nel patrimonio edilizio residenziale e terziario*

La banca dati sugli impianti di climatizzazione invernale ed estiva è stata costituita sulla base di più fonti statistiche e indagini campionarie svolte nell'ultimo periodo dal CRESME. Queste ultime in particolare hanno impiegato campioni rappresentativi soprattutto in relazione alla zona climatica di appartenenza. La raccolta ed elaborazione dei dati ha consentito di misurare non solo il numero ed il tipo di impianti di climatizzazione, ma anche i consumi medi termici ed elettrici, l'impiego di utenze elettriche, gli stili di consumo energetico in relazione alla tipologia del consumatore e all'area geografica di appartenenza; l'impiego di fonti di energia rinnovabile, ecc. I risultati di questa fase dello studio sono ordinati in: impianti di climatizzazione invernale; impianti di climatizzazione estiva; impianti per ACS; impianti elettrici; impianti di sollevamento. In questo ambito di studio si è voluto inoltre approfondire l'aspetto relativo al tasso di rinnovo/sostituzione degli impianti o di parte di essi e alla sensibilità degli intervistati rispetto al tema energetico ed ambientale.

- *L'analisi e il dimensionamento dei soggetti economici e produttivi coinvolti nel mercato degli impianti*

Qualsiasi ipotesi di mutamento degli scenari energetici attuali comporta inevitabilmente il coinvolgimento di ampi settori economici. La ricerca ha approfondito la segmentazione di tali settori, la misurazione delle variabili economiche (fatturato), occupazionali (addetti) e tecniche (installatori, propensione all'innovazione tecnologia e al suo recepimento applicativo). Lo studio ha anche "disegnato" i flussi di risorse nella filiera dei settori termico, elettrico ed elettrotecnico, in termini di occupati e valore della produzione negli ambiti della fabbricazione (per il consumo interno e per l'export); del commercio e distribuzione; dell'installazione.

Per arrivare alla dimensione delle principali grandezze economiche e alla mappa dei flussi fra i diversi attori economici, sono state impiegate e poste in una sorta di benchmark per la valutazione dell'attendibilità numerose banche dati. Oltre al sistema informativo CRESME sui potenziali del mercato e il sistema della distribuzione, sono state usate: le banche dati ISTAT di carattere strutturale e congiunturale; le analisi e i dati di varie Associazioni di categoria (industria, commercio, costruzioni e impianti); i dati fiscali del Ministero dell'Economia e delle Finanze; i

prontuari per il controllo della Guardia di Finanza, l'applicativo CRESME, ANIA, CINEAS sui costi di costruzione.

- *Analisi delle problematiche attuali e in prospettiva nei settori economici coinvolti da ipotesi di mutamento degli scenari energetici*

Gli esiti delle precedenti fasi si sono rivelati basilari per costruire dei modelli di simulazione finalizzati a dare una dimensione all'impatto di eventuali politiche energetiche. Tuttavia si è inteso fornire informazioni in merito anche alla capacità di assorbimento delle novità da parte dei settori economici coinvolti, in particolare dalle industrie, ma anche dagli installatori. Per tale motivo sono stati rilevati indicatori relativi alla velocità e intensità di innovazione dei settori coinvolti in rapporto al più generale contesto economico in cui operano. Sono state chieste opinioni alle associazioni di categoria e ai principali operatori economici, in merito all'eventualità di accelerazioni del cambiamento (ad esempio da impianti alimentati a gas a quelli alimentati elettricamente); ai tempi necessari per i consumatori di adeguarsi al mutamento; alle risorse annualmente destinate all'innovazione e ricerca tecnologica e a quella di processo; ecc.

Per i risultati dell'analisi si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/069.

Modelli di regressione per la stima dei fabbisogni energetici per la climatizzazione degli edifici

In questo lavoro viene proposta una metodologia di calcolo speditiva che consente di definire, attraverso pochi e semplici parametri, il fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale valutato secondo la metodologia standardizzata prevista dalla normativa italiana sulla certificazione energetica degli edifici (D.Lgs. 19/08/2005 n.192 e successive modifiche ed integrazioni. Tale strumento può risultare un utile supporto al legislatore in fase di definizione delle caratteristiche prestazionali dell'involucro edilizio, in quanto consente di verificare rapidamente come le variazione di tali caratteristiche vadano a modificare i fabbisogni energetici degli edifici.

Partendo da tre diverse tipologie di edifici, monofamiliare, piccolo condominio e grande condominio, sono state eseguite delle simulazioni numeriche per la valutazione del fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale, attraverso un codice di calcolo stazionario che utilizza la metodologia definita dalle Norme UNI TS 11300. I test sono stati effettuati per delle località di riferimento poste in diverse zone climatiche invernali, rappresentative dei diversi climi italiani. Successivamente è stato sviluppato un algoritmo di regressione attraverso il quale è possibile calcolare il fabbisogno energetico normalizzato dell'involucro edilizio una volta noti il rapporto di forma S/V e la trasmittanza dell'involucro e i Gradi-Giorno della località. Tale relazione può essere utilizzata per la stima della prestazione energetica in condizioni di calcolo differenti.

L'attività svolta da ENEA è illustrata nel rapporto RdS/PAR2014/070.

Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia e di modelli per la quantificazione del potenziale ventilative cooling nell'edilizia

L'attività, inserita nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici (DEIM), prevede due linee di ricerca.

Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia"

È stata svolta l'analisi delle principali metodologie di calcolo dell'energia incorporata nei materiali e nelle tecnologie energetiche, riferiti prevalentemente al sistema edificio-impianto e allo stato dell'arte sull'energia incorporata negli edifici.

La prima fase dell'attività ha riguardato l'analisi degli studi disponibili in letteratura sulle metodologie per la quantificazione dell'energia incorporata, ovvero l'energia spesa durante le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili, di trasporto, di costruzione, di manutenzione e demolizione.

Dall'analisi è risultato che le metodologie più diffuse sono:

- La Life Cycle Assessment (LCA);
- L'analisi Input – Output (I - O) con estensione energetica;
- I metodi ibridi.

La LCA applicata alla quantificazione dell'EI nel sistema edificio – impianto consente di ottenere risultati accurati, poiché analizza in modo sistematico gli input e gli output di tutti i processi inclusi all'interno dei confini del sistema utilizzando dati specifici dei processi. Inoltre, l'analisi condotta con approccio "from cradle to grave" consente di valutare l'energia incorporata di tutti i materiali e componenti edili nel corso del loro ciclo di vita e di studiarne l'incidenza sul consumo energetico complessivo. Tuttavia, la complessità del sistema legata all'elevato numero di catene produttive coinvolte richiede un numero elevato di dati specifici, spesso non disponibili.

L'analisi I - O con estensione energetica consente di effettuare un'analisi completa dell'energia incorporata negli edifici poiché considera la maggior parte dei processi, diretti e indiretti, coinvolti nella produzione di un bene e può essere sviluppata rapidamente utilizzando dati divulgati da enti di ricerca o istituti di statistica. Di contro, essa fornisce risultati ad un elevato livello di aggregazione e non consente di ottenere informazioni dettagliate relative al singolo prodotto/servizio.

Infine, il metodo ibrido combina i vantaggi della LCA e della I - O. In genere, si applica l'analisi LCA ai processi della catena produttiva principale, per i quali è opportuno, ai fini di garantire una maggiore accuratezza dello studio, utilizzare dati specifici di processo, mentre si applica l'analisi I - O per la valutazione degli impatti connessi ai processi, diretti e indiretti, per i quali sarebbe onerosa la raccolta di dati specifici.

In una seconda fase, si è proceduto con l'analisi dello stato dell'arte dell'energia incorporata negli edifici. L'analisi è stata svolta in relazione ai principali materiali costruttivi impiegati, alla fascia climatica di insediamento e alla destinazione d'uso. Con riferimento ai materiali costruttivi è emerso che, tra i casi esaminati, gli edifici realizzati con struttura in cemento armato e involucro in mattoni presentano valori di EI leggermente più elevati.

In funzione della fascia climatica di appartenenza è emerso che l'energia incorporata appare scarsamente influenzata dal clima per gli edifici tradizionali esaminati.

Infine, dall'analisi in funzione della destinazione d'uso è emerso che gli edifici a uso scolastico presentano i valori più bassi di energia incorporata e un range ristretto di variazione dei valori, mentre gli edifici destinati ad uso residenziale e ad uffici presentano range di variazione dei risultati più ampi.

Dallo studio è possibile trarre una serie di conclusioni e di suggerimenti per lo sviluppo di futuri indirizzi di ricerca. Dall'analisi degli studi di letteratura è emerso che vi è un'elevata discrepanza tra i metodi utilizzati per la valutazione dell'energia incorporata; le differenze riguardano il metodo di calcolo, la definizione dei confini del sistema e la tipologia di dati. In tale contesto, sarebbe necessario sviluppare una procedura di calcolo standardizzata allo scopo di ottenere risultati confrontabili; sarebbe altresì auspicabile definire linee guida sulle tecniche costruttive e sui materiali e componenti edili che consentano di computare l'EI degli edifici. A tale scopo un importante riferimento per i futuri sviluppi di ricerca può essere costituito dalla già esistente norma UNI EN 15978:2011.

Lo studio ha evidenziato come la realizzazione di misure di retrofit energetico, mirate alla riduzione dei consumi energetici nella fase operativa, possono indurre un aumento dell'incidenza dell'energia incorporata sul bilancio energetico complessivo dell'edificio. Questo risultato, in un'ottica di diffusione degli edifici a basso consumo energetico e, con un orizzonte temporale di breve medio periodo, Nearly Net ZEB, sottolinea la necessità di estendere l'analisi energetica dell'edifico all'intero ciclo di vita dello stesso al fine di valutare il contributo dell'energia incorporata

Sviluppo di modelli per la quantificazione del potenziale ventilative cooling nell'edilizia"

Nel corso dell'annualità si sono sviluppate le seguenti analisi:

- analisi dello stato dell'arte sulla modellizzazione a livello internazionale del "*ventilative cooling*", ovvero l'insieme di tecniche di ventilazione naturale, meccanica o ibrida aventi per obiettivo il raffrescamento degli ambienti indoor tramite utilizzo di aria esterna;
- analisi di indicatori di prestazione e applicabilità del "*ventilative cooling*" in funzione di opportuni parametri meteo-climatici.

È stato analizzato lo stato dell'arte della modellizzazione del "*ventilative cooling*", in dettaglio, sono stati analizzati i modelli semplificati, i modelli di *Airflow Network* e i modelli di fluidodinamica computazionale.

Dall'analisi è emerso che i modelli semplificati sono prevalentemente usati nelle fasi preliminari della progettazione per la quantificazione, in prima approssimazione, dei fenomeni investigati. Si tratta di semplici espressioni algebriche che consentono di stimare le portate d'aria di ventilazione e quindi indirettamente i benefici ottenibili con il "*ventilative cooling*" grazie all'accoppiamento con modelli di simulazione termofisica o tramite modellizzazioni semplificate delle interazioni ambiente-edificio. Essi richiedono una limitata mole di dati in ingresso e tempi di calcolo brevi, a causa della loro semplicità possono essere adoperati esclusivamente nel range di applicazione per il quale sono stati formulati.

I modelli di *AirFlow Network* (AFN) sono dei modelli più dettagliati rispetto a quelli semplificati; infatti sono in grado di simulare l'intero edificio considerando le portate d'aria che interessano tutte le aperture presenti nell'involucro e i suoi percorsi interni. L'edificio è rappresentato attraverso una rete in cui i nodi rappresentano le diverse zone, le connessioni tra i nodi i percorsi delle portate d'aria e le resistenze rappresentano le finestre, le

porte, le fessure, ecc. Tali modelli, pur basandosi sulla semplificazione della modellizzazione di *network* nodali di pressioni, raggiungono livelli di dettaglio maggiori rispetto ai modelli empirici ma richiedono una quantità maggiore di assunzioni e di dati in input. Sono spesso utilizzati in connessione a modelli di simulazione dinamica per valutare le prestazioni dell'edificio e l'impatto del "*ventilative cooling*"sulle dinamiche termofisiche approfondite in tali software.

I modelli di fluidodinamica computazionale risolvono numericamente un sistema costituito da equazioni differenziali alle derivate parziali di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Essi forniscono la distribuzione spaziale dei campi di velocità, pressione e temperatura. Il numero di dati in input è elevato, la risoluzione richiede, infatti, la descrizione dettagliata delle caratteristiche geometriche e termofisiche dell'involucro.

Sono stati altresì analizzati gli indicatori di prestazione e applicabilità del "*ventilative cooling*" in funzione di alcuni parametri meteo-climatici. Questi indicatori sono usati nella fase iniziale della progettazione per valutare il potenziale di applicazione di determinate tecniche di "*ventilative cooling*" senza la necessità di eseguire analisi rigorose. Nell'analisi effettuata è emerso che questi approcci generalmente non modellizzano con sufficiente dettaglio l'edificio oggetto di analisi.

L'analisi dei modelli semplificati e degli indicatori di prestazione ha evidenziato che essi si basano principalmente sulle caratteristiche meteo-climatiche esterne e su dati geometrici delle aperture, a riguardo sarebbe opportuno sviluppare degli strumenti più efficaci, in grado di considerare la massa termica allo scopo di ottenere già nelle fasi di *early design* una valutazione più rigorosa delle prestazioni del "*ventilative cooling*".

Riguardo alla modellizzazione AFN si è rilevata l'importanza dell'interconnessione con i software di simulazione energetica degli edifici come soluzione ai limiti intriseci di tale approccio. Allo scopo di ottenere una previsione più accurata dei consumi energetici dell'edificio e delle condizioni indoor e quindi, una valutazione delle prestazioni del "*ventilative cooling*" in un'ottica di bilancio energetico dell'edificio, è auspicabile che siano sviluppati strumenti di modellizzazione che consentano un'interazione sempre più efficace tra i due approcci.

Una descrizione dettagliata del lavoro è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/071.

a.3 Sviluppo sistemi

Realizzazione di un modello sperimentale di parete ventilata per l'utilizzo del vettore gas per l'efficentamento degli edifici pubblici di grandi dimensioni. Valutazioni tecnico-economiche del sistema proposto

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università di Roma Sapienza, riguardano un'analisi energetica relativa alla valorizzazione e all'efficientamento degli edifici di grandi dimensioni, anche di pregio, in uso alla P.A. tramite l'ideazione di un sistema di distribuzione del vettore gas con sistema " plug and play " unito allo sviluppo di componenti per lo smart metering del medesimo vettore.

La ricerca, sviluppando sistemi tecnologici già parzialmente utilizzati in edifici di nuova costruzione anglosassoni, ha mirato a sostituire il circuito elettrico per la forza elettromotrice con la realizzazione di un analogo sistema " lug and play " a gas che alimenti le principali utenze oltre che il riscaldamento, limitando l'utilizzo di energia elettrica al sistema di illuminazione ed a utenze con limitato assorbimento di potenza quali televisori, computer, ecc.

Un ridotto consumo elettrico, unito alla grande volumetria degli edifici rende inoltre appetibile l'utilizzo di sistemi di micro cogeneratori anch'essi a gas in grado di produrre in materia combinata energia elettrica, calore per il riscaldamento e acqua calda sanitaria.

Nel primo anno di attività, si è svolta, essenzialmente, un'analisi dello stato dell'arte sui sistemi di diffusione del vettore gas all'interno degli edifici e della tecnologia di sicurezza e smart metering del medesimo vettore in Europa, negli Stati Uniti e in Canada.

In parallelo è iniziato lo studio di un sistema di contro-pareti ventilate installabili sul perimetro esterno di edifici già esistenti integrate con i dispositivi "plug and play" di collegamento delle singole apparecchiature utilizzatrici alimentate a gas. Lo studio è consistito, sostanzialmente, nell'analisi del comportamento fluidodinamico di pareti ventilate con caratteristiche costruttive note; allo scopo di avere una visione dettagliata sul campo di velocità all'interno di tutta l'intercapedine ventilata sono state eseguite simulazioni CFD utilizzando il software Fluent.

Nella presente annualità è stato realizzato un modello sperimentale in scala 1:1 di un sistema tecnologico di contro-parete attrezzata e opportunamente areata in modo da verificare il reale comportamento della miscela aria- gas naturale in caso di perdita interna nell'intercapedine spessa appena 8 cm. La parete presenta due

aperture rettangolari così da favorire il corretto moto convettivo dell'aria indispensabile a disperdere l'eventuale gas fuoriuscito

Sono state realizzate due sezioni di prova completamente strumentate rispettivamente di altezza 1,5 e 2,2 m (configurazione ritenuta ottimale dalle simulazioni effettuate nella fase precedente della ricerca). In seguito alla realizzazione si è valutato il reale comportamento del sistema in caso di perdita accidentale di gas. Ai fini della sicurezza dell'impianto, oggetto della sperimentazione, si è analizzata la velocità dell'aria in uscita dall'apertura superiore della parete grazie all'ausilio di un flussostato in grado di registrare la portata del fluido. Il profilo di velocità così ottenuto ha confermato quanto, precedentemente, era emerso dalle simulazioni fluidodinamiche.

Un'altra fase della sperimentazione ha riguardato l'accumulo di gas nell'intercapedine. Si è verificato che il fluido in uscita fosse, nei casi di perdita accidentale, composto effettivamente da gas così da avere la conferma della veridicità delle simulazioni dei codici fluidodinamici impiegati. Ciò è stato reso possibile grazie all'installazione di un rilevatore di gas con allarme sonoro, nella parte alta della parete. La scelta della posizione del sensore è frutto di considerazioni riguardanti la natura dei due fluidi in esame (aria e metano) in particolare della loro densità e derivata dalle analisi fluidodinamiche predittive effettuate in precedenza. Anche i dati risultanti da questa seconda analisi hanno confermato la piena efficienza del sistema realizzato non essendosi verificato alcun significativo accumulo di gas e la maggiore efficacia della configurazione di parete di altezza 2,2 metri. Si è arrivati a concludere che il sistema, grazie ai dati ottenuti dalla sperimentazione è conforme agli standard di sicurezza richiesti dalla normativa vigente di riferimento.

Un'altra fase di attività ha riguardato l'ottimizzazione dell'integrazione del sistema sperimentato con un micro co-generatore da 5 kW sperimentale alimentato a metano e a idrometano, al fine di ottimizzare l'interazione col sistema generale in funzione di una apparecchiatura di smart metering messa a punto in collaborazione con un importante gruppo di produzione italiana di sistemi di controllo del gas leader nel mercato mondiale del settore.

Sono infine stati valutati i costi di installazione, gestione e manutenzione del sistema proposto per valutarne la convenienza tecnico economica alla luce del mercato attuale dell'energia e delle sistema normativa che lo regola.

Dettagli sulle attività svolte sono contenute nel rapporto RdS/PAR2014/074.

Riduzione dei carichi elettrici dei sistemi a pompa di calore reversibili attraverso l'uso del solare termico in edifici NZEB

Le nuove tecnologie costruttive degli edifici hanno ridotto il fabbisogno e reso tecnicamente fattibile l'utilizzo della fonte solare termica per un significativo contributo al riscaldamento con superfici e volumi ragionevoli, il presente studio si pone l'obiettivo di analizzare l'impiego della fonte solare termica con accumulo stagionale e della fonte fotovoltaica, anch'essa dotata di accumulo, accoppiate a sistemi a pompa di calore (PdC) per verificarne i risultati in termini energetici e la fattibilità in termini economici. Ciò, in particolare, nell'ottica di realizzare edifici nZEB così come definiti nel decreto attuativo della Legge 90/13.

È stato impostato un programma di lavoro che prevede le seguenti fasi:

- definizione di un sistema ibrido formato da PdC reversibile, solare termico con accumulo e fotovolatico (PV) del relativo sistema di regolazione e delle modalità di integrazione delle tecnologie negli edifici;
- ottimizzazione del sistema, per almeno per tre tipologie di edificio (es.: abitazione monofamiliare, collettiva e edificio commerciale o pubblico) e per tre zone climatiche, finalizzata a minimizzare i consumi elettrici da rete e per conseguire gli obiettivi voluti dalla definizione nazionale di edifici nZEB;
- valutazione economica degli investimenti richiesti per l'individuazione della soluzione più interessante.

Sono stati analizzati di tre "edifici tipo" collocati in tre diverse località geografiche, per un totale di nove casi. Per quanto riguarda gli edifici, si è fatto riferimento alle geometrie proposte dal CTI nei propri "studi di caso"; quelli scelti, in particolare, sono:

- Edificio "1": abitazione singola monofamiliare distribuita su piano terra e piano interrato, avente solo il piano terra riscaldato;
- Edificio "4": palazzina residenziale composta da sei unità immobiliari e dai relativi volumi annessi (zone comuni, garage e soffitte), distribuite su sei piani complessivi;
- Edificio "5": edificio a due piani a destinazione di uso uffici.

Agli edifici sono stati applicati degli involucri rispondenti ai requisiti degli edifici nZEB, così come definiti dalla legislazione vigente.

Per quanto riguarda, invece, le località, sono state scelte Milano, Roma e Reggio Calabria assunte come

rappresentative delle situazioni tipiche del nord, centro e sud Italia per le quali si è fatto riferimento, per i dati climatici, ad “anni-tipo” sviluppati su base oraria.

Partendo da un caso base che prevede la sola pompa di calore/condizionatore come generatore dì energia termica /frigorifera, sono state analizzate diverse configurazioni impiantistiche che vedono l'utilizzo della fonte solare termica assieme ad un serbatoio energetico che lavora su ciclo stagionale per il riscaldamento e della fonte fotovoltaica accoppiata ad un sistema di accumulo dell'energia elettrica per l'autoproduzione di energia (e la conseguente riduzione dei prelievi da rete ed il contenimento delle immissioni in rete) in ausilio alla macchina base. Tali configurazioni di impianto sono portate fino agli "estremi" in termini di dimensioni dei campi solari e dei relativi accumuli per studiarne il comportamento in termini di frazione rinnovabile e riduzione dei prelievi di energia da rete.

Dal quadro tratto, si evidenzia come l'utilizzo del solare termico mal compete con la fonte fotovoltaica trovando un suo ruolo quasi esclusivamente nella produzione di acqua calda sanitaria; infatti, sia in termini energetici che in termini economici, i risultati migliori sono quelli relativi alla configurazione con impianto fotovoltaico ed accumulo di energia elettrica. Pur permanendo, con riferimento a quest'ultimo, alcune incertezze riguardanti le sue prestazioni e la durata delle batterie/costi di sostituzione delle stesse, gli alti costi di investimento e l'impossibilità di intervenire sui consistenti fabbisogni di raffrescamelo rendono in ogni caso non competitiva la soluzione con l'accumulo stagionale di energia termica alimentato da impianto solare termico a tubi evacuati.

Per una descrizione dettagliata del lavoro svolto nell’ambito dell’accordo di collaborazione con il Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali dell’Università Politecnica delle Marche si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/075.

Modello di valutazione della qualità energetica degli edifici integrati con sistemi di BA e fonti rinnovabili, tramite l’utilizzo di specifici indicatori

La ricerca, svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell’Università di Roma Sapienza, riguarda l’analisi dell’applicazione dei sistemi di Home e Building Automation (HBA) negli edifici ad uso residenziale e non residenziale, per valutarne l’impatto in termini di prestazione energetica, anche in presenza di soluzioni evolute tecnologicamente e con presenza di accumulo.

In una prima fase sono stati analizzati i sistemi di Home e Building Automation (HBA), evidenziando le soluzioni più affermate a livello internazionale. Sono state analizzate le diverse architetture di sistema HBA facendo riferimento alla normativa europea sui sistemi Home and Building Electronic Systems (HBES) per uso residenziale e non, individuando le possibili soluzioni applicabili. Particolare attenzione è rivolta all’integrazione con altri impianti di edificio ed all’impiego di sistemi supervisione. L’analisi condotta evidenzia che l’approccio di sistema evoluto necessita di un cambiamento culturale anche sugli aspetti gestionali e di management tant’è che la stessa normativa sulla prestazione degli edifici fa riferimento ad un servizio di gestione tecnica ed energetica degli edifici.

Sono state quindi esaminate possibili soluzioni di microgrid a servizio degli edifici ad energia quasi zero (NZEB). A tal riguardo gli edifici sono stati classificati in due classi, una di tipo “a singola unità” ed una di tipo “multi unità”. Una seconda classificazione riguarda la destinazione d’uso se residenziale o terziario-commerciale. Le architetture di rete proposte considerano la problematica dell’integrazione con generazione locale al fine di conseguire gli obiettivi richiesti dalla direttiva sugli NZEB.

Si è considerata anche la possibilità di utilizzare accumulo sia elettrico sia termico. Per quanto riguarda l’utilizzazione dell’energia, viene fatta una classificazione dei carichi in: utilizzatori fissi (luce, HVAC, ecc.) ed impianti con comportamento random, ed una classificazione in base al livello di gestibilità del carico, non gestibile, gestibile o differibile. E’ stato proposto ed analizzato un modello innovativo di architettura di microgrid per edifici multi unità.

In una terza fase è stato valutato l'impatto della HBA sulla prestazione energetica degli edifici in termini di miglioramento della prestazione energetica (meno energia assorbita a parità di prestazione conseguita) ed in termini di impatto con le reti (riduzione delle punte, sfruttamento dell'energia generata localmente). Per l'analisi dell'impatto sulla grid, sono definiti modelli di controllo del carico, della generazione e dell'accumulo alcuni indici di impatto (KPI), la cui analisi sensitiva può essere di utilità sia in fase di progettazione, al fine di ottimizzare il dimensionamento della microgrid, sia in fase di esercizio per verificare la prestazione effettiva del sistema. Sono definiti indici di impatto (KPI) quali:

- autonomia, calcolata come il rapporto tra l’energia annua prodotta dalla fonte rinnovabile e l’energia annua richiesta dai carichi finali;
- autoconsumo, calcolato come il rapporto tra l’energia annuale generata ed autoconsumata in loco rispetto

all'energia generata;
- indice di scambio di energia con la rete, calcolato come il rapporto tra l'energia annualmente immessa in rete e la potenza nominale dell'impianto FV, che corrisponde al numero di ore equivalente di immissione.

Un'ulteriore fase del lavoro è stata dedicata ai sistemi di metering ed all'importanza che hanno nella gestione energetica degli edifici. Sono state analizzate diverse tipologie di misuratori e le possibili architetture dei sistemi distribuiti di misura. La ricerca propone 3 diverse metodologie di classificazione dei sistemi di misura fornendo indici di bontà di semplice applicazione. Un primo metodo è basato su un approccio di tipo tabellare che, tenendo conto delle caratteristiche tecniche dei singoli misuratori e della loro ubicazione, consente di classificare qualitativamente il sistema di misura distribuito. Un secondo metodo di tipo numerico si basa invece sul presupposto che il sistema di misura in esame sia del tipo comunicante ed integrato. L'indicatore valuta la bontà prestazionale del sistema sulla base di alcuni fattori che tengono conto della posizione dei misuratori e della loro capacità di monitorare i singoli carichi. Un terzo metodo, evoluzione del secondo, si basa sulla definizione dei servizi d'area in funzione all'interno dell'unità immobiliare in analisi. L'unità in esame è suddivisa in aree funzionali (uffici, corridoi, piano 1, ecc.). Si individuano quindi i servizi che operano nell'unità e si definiscono i servizi d'area come i singoli servizi che operano in ciascuna area. E' fornito quindi un indicatore numerico valutabile mediante un semplice calcolo. La caratteristica del metodo è che evidenzia come la bontà di un sistema di misura dipende sia dal numero di misuratori sia dalla configurazione dei circuiti elettrici, a meno che non si usino misuratori a livello di singoli carichi. Gli indici valutati per i tre metodi sono applicati ad esempi di studio elementari in diverse configurazioni di sistema di metering.

La parte finale dello lavoro è stata dedicata alle simulazioni che dimostrano come l'introduzione di sistemi di building automation possono determinare importanti ottimizzazioni energetiche dimostrate dal miglioramento degli indici KPI negli scenari con logiche di controllo.

Le simulazioni sono state condotte da ENEA. A tal fine è stato sviluppato un modello creato per verificare l'impatto degli HBES all'interno di un edificio che è stato integrato al modello ODESSE sviluppato in ENEA. Si è scelto di utilizzare un edificio ad uso residenziale di tipo unifamiliare dotato di microgrid con: riscaldamento/ raffrescamento tramite pompa di calore, generazione da FER con un impianto fotovoltaico di 2,7 kW, accumulo termico per la pompa di calore, presenza dei carichi gestibili quali lavatrice e lavastoviglie. Sono stati valutati gli indicatori KPI proposti ovvero autonomia, autoconsumo e indice di scambio di energia con la rete, per diverse situazioni di controllo tramite HBES che tengano conto o mendo del sistema fotovoltaico e della pompa di calore.

Le simulazioni dimostrano come il miglioramento della prestazione energetica già evidente per un'utenza monofamiliare, possa diventare importante nel caso di aggregazioni di utenze. L'indice di scambio di energia con la rete, si può ridurre drasticamente, sfruttando i naturali fattori di contemporaneità che caratterizzano le aggregazioni di utenza e le masse energetiche in gioco. Obiettivo del controllo è quello di minimizzare l'immissione di energia in rete in modo da massimizzare l'autoconsumo in loco dell'energia generata.

Per approfondimenti sull'attività svolta si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/076.

Sviluppo di un sistema informatico dinamico per la certificazione energetica degli edifici.

I metodi di valutazione dei consumi energetici degli edifici pubblici sono spesso caratterizzati da modelli euristici che utilizzano di fogli elettronici di calcolo, opportunamente predisposti e personalizzati, che fanno riferimento quasi esclusivamente alle metodologie delle norme UNI TS 11300 e sue derivate di tipo statico.

Tuttavia i metodi derivanti dall'applicazione dell'attuale complesso di norme e decreti, non considerando i nuovi decreti attuativi della L. 90/2013 che entreranno in vigore il 1 ottobre 2015, pongono alle base alcune ipotesi semplificative e limitative (quali ad esempio la costanza della temperatura interna per la presenza attiva degli impianti per tutto il giorno) che rendono i risultati ottenuti non sempre affidabili nelle valutazioni dei consumi energetici reali degli edifici e in special modo degli edifici pubblici che hanno specifiche peculiarità di utilizzo.

I modelli statici, infatti, non possono fare riferimento alla variabilità delle condizioni d'uso degli impianti o agli stili di vita all'interno degli edifici.

Il modello semplificato a cinque resistenze ed una capacità (*R5C1*), proposto dalla UNI EN 13790:2008, e già analizzato nella sua applicazione con solo calore sensibile, è stato integrato con l'equazione di bilancio del calore latente al fine di realizzare un codice di calcolo dinamico completo, rapido e sufficientemente affidabile per il calcolo dell'energia primaria totale e dei consumi energetici negli edifici di qualsivoglia tipologia sia in condizioni invernali che estive.

Oltre al riscaldamento, si è focalizzata l'attenzione anche sul calcolo dei consumi energetici per il raffrescamento

che pone, usualmente, problemi propri dell'analisi dinamica degli scambi energetici degli edifici e risulta più complesso rispetto al calcolo per il riscaldamento.

Il modello implementato può comunque essere utilizzato per calcolare correttamente i consumi energetici per uno o più periodi dell'anno e anche per l'intero anno mediante sequenze giornaliere multiple. Lo strumento realizzato, attualmente principalmente in ambiente *Excel*®, implementa il metodo di calcolo orario e può essere utilizzato per l'analisi *dinamica* dei carichi termici in qualsivoglia condizione di calcolo (sia estiva che invernale), oltre che il calcolo dei consumi energetici stagionali.

La scelta del foglio di calcolo è stata fatta per esaltare la facilità e la rapidità di utilizzo del metodo di calcolo proposto. In ogni caso il foglio di calcolo è da considerare come un *dimostratore* della fattibilità di un codice di calcolo più complesso per usi più estesi, eventualmente anche commerciali.

Il metodo di calcolo orario, inoltre, consente di ottenere risultati formalmente più corretti e con più informazioni rispetto ai calcoli cosiddetti *statici* derivanti dall'applicazione delle UNI TS 11300. I questa sede vengono evidenziati i limiti di quest'ultima metodologia di calcolo anche ai fini della valutazione dei consumi energetici reali degli edifici. A questo scopo il programma in Excel consente di effettuare bilanci energetici annuali dell'energia di involucro, suddivisi per i mesi invernali e per i mesi estivi. In questo modo è possibile calcolare anche l'energia primaria stagionale, assegnata l'efficienza globale di impianto, in modo decisamente più evoluto ed affidabile rispetto ai metodi statici.

E' infatti nota la frequente incongruenza dei valori predetti dai metodi statici rispetto a quelli dinamici e, ancor di più, rispetto ai valori effettivamente rilevati dei consumi energetici, ad esempio con audit energetici. I metodi statici quasi sempre trascurano gli effetti degli scambi di calore latenti che, in certe condizioni e per alcune località, possono essere significati e non trascurabili.

Riferito al giorno medio mensile (metodo indicato dalla UNI EN 13790), il metodo proposto consente di ottenere con relativa facilità risultati dinamici di grande interesse e con informazioni anche sulla variabilità oraria delle grandezze calcolate (temperatura di superfice, temperatura di massa e flussi termici sensibili e latenti). Il metodo consente di tenere in conto anche della nuova Proposta di Norma del CT n. 102 sul "*Calcolo del comportamento degli edifici in regime termico non stazionario*". In particolare è possibile assegnale i profili d'uso sia dei carichi interni che dell'utilizzo degli impianti in conformità alla proposta di norma suddetta.

Il modello *R5C1* con soluzione oraria richiede, fra i dati di input, anche diverse serie temporali orarie di alcuni vettori di calcolo (flussi solari, temperatura esterna, umidità specifica esterna o umidità relativa, temperatura di ventilazione, …). Questi dati possono essere reperiti dai data base climatici internazionali o ricostruiti con metodi di *detrending* (*Detailed Simulation Tools, DST),* a partire dai dati medi giornalieri mensili, quali quelli forniti dalla UNI 10349 o da altri data base, quale l'IGDG.

Con il modello completo, R5C1 calore sensibile + calore latente, si dispone di uno strumento di calcolo completo sia per i bilanci termici (mensili, stagionali ed annuali) che per la determinazione dei carichi termici stagionali.

Oltre allo sviluppo del modello completo sono state svolte alcune comparazioni per edifici reali. I risultati ottenuti, considerando la scarsa qualità dei dati disponibili, mostrano una generalizzata sottostima degli indici energetici calcolati con i metodi statici rispetto ai risultati ottenuti con il metodo dinamico R5C1. Inoltre considerando anche il calore latente si osserva che i bilanci energetici invernali ed estivi risentono molto degli effetti dell'umidità relativa esterna. In alcuni casi, laddove l'umidità esterna scende al di sotto del 50% (valore imposto per l'umidità interna) si ha una diminuzione del carico totale mentre si ha l'opposto nel caso in cui l'umidità esterna superi il 50%. Nelle condizioni estive il calore latente porta ad un incremento del carico totale.

Infine si è effettuato uno studio più approfondito su un caso reale (palazzina sita a Torino) per il quale sono disponibili i dati di consumo reali per un mese (periodo marzo – aprile 2015). I risultati ottenuti, pur in mancanza di dati sui profili d'uso sia degli impianti che dei carichi interni, sono in buon accordi con i dati sperimentali, anche in considerazione del periodo invernale particolarmente rigido che si registrato,

L'attività svolta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Catania è descritta nel rapporto RdS/PAR2014/077.

Applicazione del modello di calcolo ad un caso reale e relative valutazioni energetiche -

Lo studio e la definizione del comportamento termofisico di un edificio risultano alquanto complessi a causa della variabilità delle condizioni ambientali, che rendono, di non semplice valutazione, i fenomeni che avvengono negli scambi termici tra l'edificio e l'ambiente in una condizione di transitorio continuo. Motivo, questo, da cui nasce la necessità di considerare una metodologia di calcolo dinamico che, nella definizione del fabbisogno termico

dell'edificio, tenga conto delle caratteristiche dinamiche di scambio termico, tra interno ed esterno, degli elementi costruttivi e costitutivi del l'involucro. Il modello implementato dall'Università di Catania (R5C1, rapporto RdS/PAR2014/077) è stato sviluppato per poter rispondere a tali esigenze e poter essere quindi utilizzato per calcolare correttamente i consumi energetici per uno o più periodi dell'anno e anche per l'intero anno mediante sequenze giornaliere multiple.

Lo strumento realizzato, infatti, implementando il metodo di calcolo orario, può essere utilizzato per l'analisi dinamica dei carichi termici in qualsivoglia condizione di calcolo (sia estiva che invernale), oltre che il calcolo dei consumi energetici stagionali.

Obiettivo della presente attività era quello di valutare quanto la metodologia di calcolo implementata fosse in grado di fornire delle informazioni sui consumi energetici reali degli edifici, per cui è stata effettuata una comparazione fra i risultati forniti dal metodo R5C1, quelli prodotti dal software ODESSE e i consumi termici misurati di un edificio reale. In particolare è stato scelto un edificio del Centro di Ricerca della Casaccia (Roma), adibito ad uffici (ed. F-51), per il quale si disponeva di alcuni dati relativi ai consumi energetici e che risultava rappresentativo per gli edifici con questa destinazione d'uso.

Dal confronto emerge che il modello R5C1 è in grado di fornire informazioni sufficientemente precise sui consumi reali dell'edificio: la differenza rispetto ai consumi misurati si attesta sul 6% in inverno e sul 18% in estate. Tali differenze aumentano se si esegue il confronto su base mensile in quanto si verificano degli effetti di compensazione poiché l'approccio del modello è quello di un calcolo giornaliero medio, "spalmato" su tutto il periodo esaminato, quindi aumentare il periodo di calcolo a cui è riferita la media (come l'intera stagione di riscaldamento o raffrescamento) attenua l'approssimazione. Il confronto mette ,inoltre, in evidenza l'importanza di avere dati climatici più vicini possibili a quelli reali della località esaminata e quando l'incidenza degli stessi sia elevata sul risultato finale, specialmente se l'obiettivo ultimo è avere informazioni sui consumi reali dell'edificio.

Una descrizione dettagliata del lavoro è contenuta nel rapporto RdS/PAR2014/265.

b. Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni

Linee guida per l'analisi dei dati di assorbimento elettrico di edifici del terziario pubblico

L'analisi dettagliata degli assorbimenti elettrici riferiti alle diverse utenze di un parco edilizio del terziario pubblico consente di individuare eventuali criticità che possono ricondurre a margini di risparmio energetico e riduzione dei costi di gestione.

Eccezion fatta nei casi in cui siano presenti avanzati sistemi di monitoraggio, integrati ex-novo a livello impiantistico e dotati di software di gestione dinamica delle letture, negli edifici esistenti in generale l'analisi può seguire un approccio empirico, installando opportuni data-logger di registrazione degli assorbimenti elettrici ed elaborando i dati raccolti per un periodo di tempo sufficientemente rappresentativo.

Le linee guida per l'analisi dei dati di assorbimento elettrico di edifici del terziario pubblico, oggetto della presente attività, sono l'esito dell'esperienza maturata con l'indagine svolta sul parco edilizio del Politecnico di Milano.

La metodologia di analisi delle letture dei dati di assorbimento elettrico disponibili per gli edifici del Politecnico di Milano (rilevate tramite un sistema di lettura remota di diversi x-meter progressivamente installati dall'anno 2012) è stata sviluppata al fine di individuare eventuali criticità nella gestione degli immobili ed ha consentito di implementare un set di indicatori di reale assorbimento elettrico, rappresentativi di edifici-tipo del terziario pubblico, disaggregati per diverse utenze (circuiti luce e forza motrice, generazione frigorifera, ventilazione, ecc.). La procedura adottata ha comportato l'esportazione dei dati dal sistema di lettura, selezionandone la sorgente con cadenza oraria, e la loro trasposizione in fogli elettronici. Tramite opportune macro strutturate in Visual Basic è stato possibile organizzare la mole di dati secondo i desiderati periodi temporali e generare grafici rappresentativi delle letture volute (quali, ad esempio, gli andamenti degli assorbimenti relativi a settimane-tipo delle diverse stagioni, o i dati di consumo energetico distinti in fasce temporali cui possono corrispondere diverse condizioni tariffarie). Le rappresentazioni grafiche consentono, infatti, di evidenziare in modo agevole eventuali criticità, al fine di definire interventi di retrofit e/o strategie di rimodulazione dei criteri di gestione delle utenze elettriche. Incrociando i dati di assorbimento rilevati con le pertinenze dimensionali edilizie, inoltre, è stato possibile risalire a consumi specifici (per m^2 di superficie calpestabile e/o m^3 di volume edificato) reali che, a differenza di quanto assunto convenzionalmente seguendo i criteri di gestione ideali previsti dagli standard, possono costituire indicatori più coerenti per estrapolazioni su larga scala.

Infine, è stato possibile correlare la variabilità dei consumi connessi alla domanda di raffrescamento ai dati meteo (nel caso specifico, rilevati dalla stazione del Politecnico) caratterizzanti le diverse annualità di lettura, per

estrapolare indicatori di consumo specifico variabili in funzione dei diversi Gradi Giorno.

La metodologia di indagine è stata dunque implementata, con ulteriori annualità di dati disponibili per il parco edifici del Politecnico, e tradotta in linee guida cui altre realtà di gestione patrimoniale pubblica potranno fare riferimento.

Le fasi di lavoro svolte possono riassumersi come segue.

- *Validazione e/o ricalibrazione delle ipotesi di allocazione degli assorbimenti riguardanti le letture dei recenti x-meter installati nel Campus Bovisa*
  L'analisi grafica degli assorbimenti facenti capo alle ulteriori letture disponibili hanno confermato le ipotesi di allocazione di assorbimenti assegnate nella precedente fase della ricerca.
- *Implementazione di ulteriori dati di assorbimento necessari per completare l'annualità delle letture attivate nell'estate 2013 (Campus Bovisa)*
  Le elaborazioni dei dati desumibili dalle letture degli x-meter attivati durante l'estate 2013 hanno consentito di completare un'intera annualità, di disporre della lettura relativa alla stagione invernale 2014-15 e della prima parte dell'estate 2015, rivelatasi particolarmente calda.
- *Implementazione degli ulteriori dati di assorbimento necessari per completare una seconda (Campus Bovisa) e una terza (Campus Città Studi) annualità, al fine di poter estrapolare consumi riconducibili alla domanda di raffrescamento correlati ai Gradi Giorno di 2 e 3 stagioni estive*.
  Le elaborazioni dei dati desumibili dalle letture degli x-meter a completamento della stagione estiva 2014 hanno consentito di correlare i consumi di raffrescamento ai gradi giorno di due (Bovisa) e tre (Città Studi) intere stagioni estive, e di aggiungere una nuova annualità alle stagioni estive parziali contemplate nella precedente fase.
- *Implementazione del set di valori di consumi specifici reali*
  Sono stati implementati nuovi dati di consumo specifici: quelli relativi all'annualità 2014 e, nel rispetto delle tempistiche del PAR, quelli relativi alla stagione estiva equivalente 2014-2015 (composta accorpando i dati complementari di ciascun anno).
- E*laborazione di grafici di consumo per raffrescamento correlati ai Gradi Giorno*
  La variazione dei consumi elettrici specifici relativi ai carichi maggiormente soggetti alle condizioni climatiche (impianti connessi alla domanda di raffrescamento) è stata correlata ai Gradi Giorno estivi delle diverse annualità, elaborati avvalendosi dati climatici orari della stazione meteo del Politecnico.
- *Stesura di linee guida della metodologia di analisi dei dati di assorbimento elettrico degli edifici*
  Le linee guida descrivono procedure e criteri di analisi e riportano gli script delle macro precostituite in Visual Basic per implementare i fogli elettronici di gestione, elaborazione e rappresentazione grafica dei dati utili ai fini dell'analisi.

La procedura sviluppata dal Dipartimento di Architettura, ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito del Politecnico di Milano è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/078.

Progettazione di cruscotto informativo per la gestione del bilancio energetico di un ente pubblico

Nelle precedenti annualità del programma è stata sviluppata una metodologia per l'elaborazione di dati energetici territoriali Local Energy Balance (LEB) e il relativo strumento software open source. L è stata orientata alla progettazione di uno strumento di gestione destinato alle amministrazioni pubbliche, per utilizzare le nuove funzionalità rese possibili dall'applicazione dello schema di riferimento LEB:

- l'analisi di informazioni quantitative relative ai consumi, alle conversioni e agli usi di energia presso edifici e strutture pubbliche, nonché delle relative emissioni di gas serra
- la condivisione e il confronto di tali dati relativi a soggetti e/o strutture variamente articolati (edifici, impianti, sistemi, etc.)
- l'integrazione multilivello e a differenti scale territoriali di tali informazioni, ai fine di un trasferimento di informazioni tra ambito pianificatorio e gestionale dell'energia.

In particolare le funzioni affidate allo strumento sono le seguenti:

- monitoraggio e analisi di serie storiche di dati energetici relativi a edifici, strutture e impianti pubblici
- interfacciamento bidirezionale di tali informazioni tra il livello di gestione (energy manager – cruscotto gestionale) e quello di pianificazione locale (LEB per Patto dei Sindaci e/o Piani Energetici Regionali)
- calcolo e analisi, a partire dall'incrocio tra i flussi energetici acquisiti sulle singole strutture e i dati LEB di

bilancio energetico locale, delle emissioni di gas serra relative al comparto del terziario pubblico
- verifica dei risultati conseguibili con interventi di efficienza energetica
- rappresentazione dei risultati e la gestione dinamica delle ipotesi di calcolo

L'attività svolta ha riguardato in primo luogo la progettazione dello strumento in termini di:

- definizione dei flussi di dati di ingresso e uscita per ciascun elemento (edificio/impianto)
- architettura di base per la gestione e l'archiviazione dei dati relativi a patrimoni terziari pubblici
- definizione degli elementi informativi e dell'organizzazione di un cruscotto gestionale
- definizione dell'interfaccia di scambio dati secondo protocollo LEB

Successivamente è stato svolto un test di potenziale applicazione presso una struttura del terziario pubblico.

I risultati dell'attività svolta nel quadro della collaborazione con il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino sono documentati nel rapporto RdS/PAR2014/079.

Modello matematico e strumento informatico user-friendly per la valutazione del consumo e degli interventi di risparmio energetico dei centri sportivi

L'attività di ricerca si pone l'obiettivo di verificare se il metodo di previsione dei consumi studiato, nelle precedenti annualità per i centri sportivi di grande e media dimensione, risultasse valido anche per quelli di piccole dimensioni. Per centri sportivi di piccola grandezza si intendono essenzialmente le palestre scolastiche, i centri fitness cittadini generalmente ospitati nei piani interrati dei palazzi, i piccoli campi all'aperto, ed i circoli sportivi in genere di superficie non superiore a circa 500 m^2.

In base alle ricerche degli anni precedenti, si suppone che i centri sportivi di piccole dimensione non si comportino come quelli più grandi; di conseguenza il lavoro in oggetto risulta necessario per correggere i modelli di previsione ed adattarli a qualsiasi dimensione di impianto.

La prima fase della ricerca, resa difficile dalla scarsa competenza tecnica dei gestori, è consistita in una raccolta dati, relativi a:

- dati di consumo;
- caratteristiche edili/impiantistiche e dati generali della struttura;
- modalità di utilizzo dell'impianto sportivo;
- distribuzione degli impianti, delle necessità energetiche e degli spazi per ogni tipo di sport;
- tipologia e benefici degli interventi di risparmio ad oggi effettuati.

Massima attenzione è stata data alla valutazione delle condizioni al contorno, relative alla gestione ed alla manutenzione di impianto, che permettono di ricavare con maggiore precisione gli indicatori di consumo per ogni tipo di struttura e per ogni zona climatica. Nel presente lavoro, come nei precedenti, gli indicatori di consumo vengono calcolati anche in base alla validità della gestione; l'effettiva qualità di amministrazione viene misurata, secondo gli unici (pochi) dati reperibili, in funzione della quantità di proficui interventi di risparmio energetico effettuati sull'impianto.

Lo scopo finale del lavoro è quello di definire un metodo matematico di previsione dei consumi valido per tutti i centri sportivi, di tutte le dimensioni. Il lavoro svolto si articolato nelle seguenti fasi:

1. indagine sul campo per la ricerca dei dati di consumo dei piccoli centri sportivi;
2. statistica sui principali interventi di risparmio energetico, nonché della relativa validità energetica, oggi applicati agli impianti sportivi di piccola taglia;
3. valutazione delle disponibilità tecniche, economiche ed organizzative delle società sportive ad attuare le strategie di ottimizzazione;
4. calcolo, verifica e redazione delle tabelle contenenti gli indicatori di consumo suddivisi per tipo di impianto, per zona climatica e per ogni diverso livello di ottimizzazione; queste adattate con un fattore di scala che tenga conto anche dei piccoli impianti;
5. studio del modello di calcolo generale per la valutazione dei consumi energetici e del livello di ottimizzazione dell'impianto sportivo;
6. programmazione di un software *user friendly*, di tipo aperto, utile agli utenti ed ai gestori di impianto, per la previsione dei consumi e dei possibili risparmi ottenibili;
7. verifica dei risultati ottenuti in base ai dati statistici raccolti e collaudo del software;
8. stesura della relazione tecnica finale contenente le linee guida per la valutazione energetica.

In breve, nel presente lavoro sono stati portati a completamento i seguenti punti essenziali:

- indagine del comportamento energetico dei piccolissimi centri sportivi, questo a completamento delle indagini già svolte sui centri sportivi di media e grande dimensione;
- verifica ed aggiornamento degli indicatori di consumo annuale, alla luce degli audit energetici effettuati nell'ultimo anno; gli indicatori, riferiti alla superficie, sono suddivisi per zona climatica, per tipologia di ambiente e per classe di ottimizzazione (funzione della quantità di interventi di risparmio implementati);
- calcolo del *fattore di scala* che adatta il consumo a preventivo delle strutture all'aumentare della superficie totale dell'impianto;
- definizione e spiegazione di un semplice modello di calcolo per la valutazione dei consumi, basato sugli indicatori annuali; il metodo volutamente semplice risulta utilizzabile anche dai meno esperti e facilita pertanto l'opera di sensibilizzazione energetica;
- definizione di un cruscotto quantitativo e qualitativo per un migliore confronto tra l'energia valutata in fase di preventivo e quella effettivamente consumata e conteggiata a consuntivo; tale sistema grafico relaziona direttamente i consumi, quindi il comportamento energetico del sistema, con una classificazione a tre livelli divisa in ottima, intermedia e scadente;
- costruzione di semplice software user friendly (Figura 392), basato su excel, che permetta a tutti di effettuare una prima verifica in maniera autonoma.



Figura 392. Schermata del software di calcolo

Lo strumento informatico proposto per la valutazione dei consumi si presenta utile, con una duplice valenza, per i gestori di impianti sportivi:

- il gestore può facilmente calcolare un preventivo dell'energia consumata oppure, una volta raccolto un anno di bollette, confrontare quantitativamente e qualitativamente il proprio impegno di energia con i dati statistici raccolti;
- il gestore, anche se non esperto, risulterà facilmente informato e sensibilizzato su quelle che sono le reali possibilità di risparmio.

Dettagli sull'attività, svolta nel quadro della collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica della Sapienza Università di Roma, sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2014/080.

Analisi sull'andamento dei consumi per clienti residenziali e del terziario allacciati a reti di teleriscaldamento nelle zone E ed F in presenza di valvole termostatiche

L'obiettivo della ricerca è stato quello di analizzare i consumi di edifici adibiti ad uso prevalentemente residenziale e commerciale in comuni serviti da reti di teleriscaldamento, in zone climatiche E ed F, in presenza di valvole termostatiche, anche al fine di fornire utili indicazioni agli utenti e ai gestori di patrimoni immobiliari.

Le direttive sulle prestazioni energetiche degli edifici (2010/31/UE) e sull'efficienza energetica (2012/27/UE) pongono in primo piano l'efficientamento del parco immobiliare, sia pubblico, sia privato. Due tipici interventi riguardano la promozione di reti di teleriscaldamento e l'installazione delle valvole termostatiche. Talvolta tali interventi, in particolare nelle zone del Centro-Nord Italia, possono risultare abbinati. Da un'analisi preliminare è risultato che manca una base di dati e studi sugli effetti dell'abbinamento teleriscaldamento-valvole termostatiche. Lo studio realizzato ha analizzato i dati disponibili presso i gestori, correlandoli con i dati climatici e

l'utilizzo di alcuni edifici campione, al fine di indagare su tale abbinamento.

L'attività, in una prima fase, ha riguardato la raccolta bibliografica e l'analisi, dal punto di vista legislativo e regolatorio, delle novità introdotte dal recente Decreto Legislativo n. 102 del 4 luglio 2014. Tale provvedimento ha imposto particolari obblighi di installazione di sistemi di termoregolazione negli edifici e ha previsto la promozione delle reti di teleriscaldamento, oltre a prevedere importanti attività in capo all'Autorità per l'Energia il Gas e i Servizi Idrici.

La seconda fase del lavoro è consistita nell'individuazione dei potenziali fornitori di dati e successiva raccolta, elaborazione, correlazione e commento dei dati di due impianti a rete e nove edifici nei Comuni di Tirano (zona climatica E) e Sondalo (zona climatica F), entrambi nella provincia di Sondrio. Tali casi studio sono stati selezionati grazie al supporto della FIPER (Federazione Italiana di Produttori di Energia da Fonti Rinnovabili), che ha provveduto ad inoltrare un'apposita comunicazione ai propri associati, in base alla disponibilità di dati.

La valutazione delle prestazioni dei singoli condomìni è stata effettuata sia secondo modalità convenzionali, sia con la produzione di indicatori specifici per tener conto del rapporto dei consumi pre e post installazione delle valvole termostatiche, in relazione agli andamenti dell'intera rete di riferimento.

La modalità convenzionale ricostruisce dai dati di consumo e dai dati climatici la curva energetica dell'edificio oggetto di studio, prima e dopo l'installazione dei sistemi di ripartizione dei consumi.

L'indicatore specifico utilizzato è invece basato sulla determinazione del ruolo che lo specifico edificio ha avuto nel coprire il consumo globale di tutti gli edifici allacciati; questa quota viene calcolata mese per mese mettendo in luce se lo specifico edificio ha cambiato il suo modello di consumo a valle della installazione dei sistemi di contabilizzazione.

L'analisi dei dati ha mostrato che globalmente, nelle quattro stagioni invernali studiate, dal 2011 al 2015, la domanda di energia termica riferita al consumo dell'intero parco di edifici allacciati ha subito una variazione sensibile, con scostamenti da +6% a -14% per la rete di Tirano e da +7% a -18% per quella di Sondalo. L'analisi specifica degli edifici selezionati ha mostrato una forte dispersione dei risultati: accanto ad edifici che hanno mostrato una specifica riduzione dei consumi, in aggiunta a quella media della globalità del parco allacciato alla rete, ve ne sono altri che hanno evidenziato oscillazioni consistenti, talvolta di segno opposto. Questo tipo di risultato può non essere quello atteso da chi ha gestito l'installazione dei sistemi di contabilizzazione, ma conferma i dati di letteratura dalle varie esperienze sia italiane che estere. La contabilizzazione può portare alla riduzione dei consumi dopo aver prodotto un riequilibrio fra i vari utenti, corretto le inefficienze preesistenti, e dopo che i vari occupanti hanno compreso ed interiorizzato il meccanismo di regolazione, di lettura e di ripartizione.

Il problema principale riscontrato, superiore alle aspettative, è legato al fatto che i gestori delle reti hanno contezza dei dati fatturati fino alle sottocentrali dei condomìni, mentre questi ultimi non si occupano della suddivisione dei consumi eseguita nelle singole unità abitative o commerciali (e dunque non consentono di comprendere quali elementi collegati all'uso finale possano aver causato le variazioni riscontrate).

Al termine dello studio è stata redatta una guida sintetica che ha l'obiettivo di informare amministratori di condominio ed utenti su come adoperarsi per massimizzare i benefici derivanti da una corretta regolazione e contabilizzazione del calore.

Dettagli sui risultati dell'indagine eseguita da FIRE sono riportati nel rapporto RdS/PAR2014/081.

Sviluppo di un sistema informatico per gli edifici ad uso scolastico per le valutazioni tecnico-economiche degli interventi

Le attività hanno riguardato lo sviluppo di un sistema informatico, indirizzato alle P.A., per l'acquisizione di dati, (stato di conservazione, dati energetici, strutturali e sicurezza) per la conoscenza dello stato di fatto degli edifici. I dati e le informazioni acquisite saranno utilizzate per la definizione di parametri tecnico-economici, sulla base dei quali, poter fare una prima valutazione per la convenienza degli interventi di riqualificazione o di sostituzione da promuovere. ENEA, in particolare, ha curato la parte che investe gli aspetti energetico-ambientali, svolgendo un'analisi mirata a definire la consistenza del parco edilizio e le caratteristiche tipologiche dell'involucro e degli impianti, di questa tipologia di edifici. Per tale attività è stato sviluppato un apposito modello (Figura 393). Tale attività ha contribuito allo sviluppo della struttura della scheda di indagine, articolata in diversi ambiti, per la raccolta dei dati e delle informazioni necessarie per costruire un data base per il sistema informatico e rendere possibile le valutazioni di convenienza tecnico-economica. E' stata, sviluppata una scheda-questionario di indagine che è stata testata nel territorio siciliano di Siracusa.

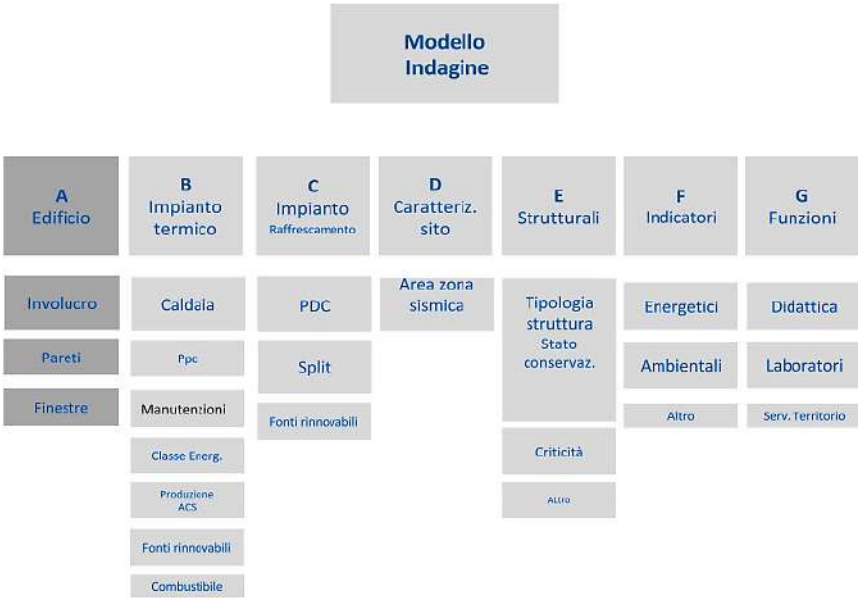


Figura 393. Modello indagine

In collaborazione con ANCE ed ANCI sono stati anche definiti dei parametri economici di riferimento tramite i quali la Pubblica Amministrazione potrà valutare la convenienza dell' intervento.

Il rapporto relativo a questa attività, anche se predisposto in collaborazione con ANCI e ANCE, non è stato reso ancora pubblico poiché necessita di un nulla osta dei vertici di ANCI ed ANCE.

Sviluppo di una metodologia per la valutazione dell'impatto occupazionale per interventi di efficienza energetica nella green economy

La prima fase dell'attività ha riguardato un'analisi sistemica che prende in considerazione i principali aspetti del settore dell'efficienza energetica nel suo complesso. I dati raccolti comprendono tutti i settori economici relativi ai settori industriali e dei servizi in base alla classificazione standard ISIC REV3 a 2 digit e il settore pubblico. I dati sono raccolti in un arco temporale che va dal 1995 al 2009 per tutti i paesi dell'Unione Europea, al fine di avere una rappresentazione complessiva, dal momento che le politiche per l'efficienza energetica sono in larga misura dettate dalla Commissione Europea e poi adottate a livello nazionale. Nel dettaglio, i dati (tutti su scala temporale annuale) riguardano l'output economico dei singoli settori, gli investimenti di capitale, il numero di occupati, l'ammontare di energia consumata, la propensione all'innovazione, misurata in questo caso attraverso una metodologia di attribuzione dei brevetti presentati all'ufficio brevetti europeo (EPO) ai settori economici qui investigati.

Successivamente è stata costruita una banca dati relativa alle politiche pubbliche a sostegno dell'efficienza energetica realizzate a livello nazionale, derivabili dalle banche dati IEA-Energy Efficiency database e IEA-Energy Efficiency in the Building Sector. A fianco di indici di tipo discreto associati all'esistenza o meno di tali politiche pubbliche, è stato definito sempre su scala nazionale un indicatore complesso, l'energy tax bundle, che esprime il peso della tassazione energetica rispetto al prezzo finale dell'energia ponderato per i consumi fisici delle diverse fonti primarie.

Infine, è stato definito un indice sintetico che rappresenta i guadagni di efficienza nei consumi energetici ottenuti anno per anno dal settore pubblico in ogni nazione investigata. Questo ultimo indicatore rappresenta una misura indiretta dei guadagni ottenuti attraverso la realizzazione di interventi di efficientamento energetico nel solo settore pubblico.

Questa fase di studio ha portato a proporre una prima mappatura del comportamento dei diversi settori economici dei diversi paesi dell'UE rispetto alle dinamiche occupazionali e alle dinamiche di efficienza energetica nell'arco temporale considerato. Numerose considerazioni possono derivare già dalla mera analisi descrittiva, laddove si evidenzia un gap soprattutto tra i paesi dell'UE a 15 e i paesi nuovi entrati, che presentano ancora andamenti in crescita rispetto ai consumi energetici, a fronte di una dinamica occupazionale piuttosto in linea con

la media europea. Considerando la dimensione temporale analizzata, è necessario sottolineare come gli andamenti evidenziati sono solo parzialmente influenzati dalla crisi economica di fine decennio.

Sulla base della banca dati sopra descritta, la seconda parte dell'analisi propone un modello di stima econometrica volto a identificare quali siano i driver principali legati anche agli interventi di efficienza energetica che spiegano le dinamiche occupazionali. Attraverso un modello di tipo panel a effetti fissi con stimatore standard di tipo OLS emergono alcuni risultati di particolare rilievo. Qui di seguito se ne sintetizzano i principali.

In primo luogo, si evidenzia un lieve impatto negativo sulle dinamiche occupazionali in tutti i settori dell'economia associate a interventi specifici di settore per efficienza energetica. In sostanza, a parità di altre condizioni, in quei settori dove si sono ottenuti guadagni di efficienza energetica maggiori da un anno all'altro si manifesta una ridotta capacità di incrementare l'occupazione (il che non significa una riduzione dell'occupazione, ma solo una relativa minore capacità di incrementarla). Tale risultato è spiegabile in base alla natura della complementarietà nell'uso dell'energia come input nella funzione di produzione, che in molti settori ha natura complementare e non sostituta.

In secondo luogo, appare molto interessante il contributo positivo dei guadagni di efficienza ottenuti nel consumo di energia da parte del settore pubblico sulle dinamiche occupazionali degli altri settori dell'economia. Considerando questo indicatore come una misura indiretta degli sforzi di policy fatti a livello nazionale, la spiegazione dell'effetto positivo si basa su due punti. Il primo canale di influenza è rappresentato dal risparmio sulla bolletta energetica del comparto pubblico che riduce i costi di gestione ordinaria e quindi libera risorse pubbliche che possono essere reimpiegate nel sistema di welfare incrementando i tassi di occupazione attraverso sgravi fiscali alle imprese o fornendo incentivi per nuove assunzioni. Il secondo canale è invece rappresentato dalla domanda di lavoro generata dalla necessità di realizzare gli interventi di efficientamento energetico nel comparto edilizio pubblico (si pensi all'installazione di apparecchiature per l'audit energetico o di supporti isolanti, ecc.).

Considerando la sola Unione Europea a 15 membri è stato poi possibile sviluppare alcune analisi più specifiche legate alla realizzazione delle politiche pubbliche nel settore dell'efficienza energetica e al sistema di tassazione energetica.

Le politiche in vigore per promuovere l'efficienza energetica hanno prodotto, a parità di altre condizioni, una maggiore probabilità di incrementare i livelli di occupazione nel tempo. Il fatto che tale risultato sia statisticamente valido per la sola UE15 dipende direttamente dal fatto che le politiche per l'efficienza energetica sono state realizzate da un numero di anni maggiore e manifestano quindi in modo più evidente il loro impatto (tipicamente di medio e non di breve termine) sulle dinamiche occupazionali.

Un secondo risultato specifico per l'UE15 degno di nota riguarda l'interazione tra i guadagni di efficienza energetica a livello settoriale e il peso della tassazione energetica su scala nazionale. A parità di guadagno di efficienza energetica a livello settoriale, i settori che si trovano in paesi con un peso della tassazione energetica maggiore ottengono incrementi di occupazione nel tempo maggiori degli stessi settori collocati in paesi con minore peso della tassazione energetica. Questo risultato può essere interpretato nel seguente modo: nonostante ci sia complementarietà tra il consumo di energia e gli altri input nella funzione di produzione, laddove il guadagno di efficienza sia tale da risparmiare ingenti risorse finanziarie (e questo è possibile laddove il costo dell'energia sia particolarmente elevato), queste possono essere reimpiegate per espandere il sistema produttivo, ottenendo anche incrementi nei livelli occupazionali.

Dall'analisi descrittiva e dai risultati dell'indagine econometrica risulta evidente come il miglioramento dell'efficienza energetica a livello nazionale possa portare a guadagni sui livelli di occupazione con un orizzonte temporale di media durata e non legati a dinamiche puramente congiunturali.

Da questa analisi però non è possibile derivare specifiche conclusioni rispetto all'efficienza dell'intervento pubblico in termini di risorse finanziarie impiegate per realizzare gli interventi di efficienza energetica in modo diretto. A causa della carenza di dati sia su scala settoriale che su scala pubblica relativi alla mole di investimenti economici e finanziari impiegati nel settore oggetto di indagine, non è possibile valutare se gli interventi di promozione dell'efficienza energetica promossi e realizzati sia dal settore pubblico che privato siano non solo efficaci (valutazione possibile grazie alla disponibilità di dati sui consumi fisici di energia) ma anche efficienti, ovvero che il risparmio nei consumi energetici sia ottenuto grazie ad un ammontare di investimenti che sia economicamente fattibile e politicamente accettabile. In tal senso, si propone di promuovere la realizzazione di un sistema di contabilizzazione degli investimenti sia pubblici che privati nel settore dell'efficienza energetica, anche al fine di valutare quale tipologia di interventi sia non solo la più efficace dal punto di vista della performance energetica ma anche la più efficiente dal punto di vista politico ed economico.

L'analisi, condotta nell'ambito della collaborazione con il Dipartimento di Economia, Università di Roma Tre, è

descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR 2014/082.

Linee guida per un contratto Energy Performance Contract secondo il D.Lgs 102/2014

Il cambiamento del quadro normativo europeo (Direttiva 2012/27/UE e 2010/31/UE) e nazionale (D.Lgs. n. 102/2014 e Legge n. 90/2013) sull'Efficienza Energetica, ha comportato una profonda revisione degli standard prestazionali e delle procedure da sviluppare in tale ambito, che non prevede solo quello dell'efficienza energetica degli edifici dal punto di vista tecnico, tecnologico e gestionale, ma anche la predisposizioni di modelli, misure e strumenti per il finanziamento degli interventi e quindi la sottoscrizione di nuovi di format contrattuali di Energy Performance Contract (EPC) tra P.A. (di seguito definita Stazione Appaltante/Amministrazione Committente) e ESCO (di seguito definita Assuntore) come proposti in seguito.

Per rendere operative le disposizioni dell'art. 14, comma 4, del D.Lgs. n. 102/2014, e tenendo presente gli elementi minimi elencati nell'allegato 8 del D.Lgs. n. 102/2014, è stato proposto un format contrattuale EPC, e il relativo capitolato d'appalto, con "*garanzie del risultato*" che mira a favorire gli interventi di "efficientamento" energetico nel sistema edificio impianto e garantirne la loro realizzazione e gestione nel tempo.

Il modello contrattuale EPC proposto per le P.A. favorisce il coinvolgimento degli operatori privati (ESCO, Istituti di credito, ecc.) al fine di generare economie di scala, rendere trasparenti e certi i risultati da conseguire nel rispetto sia delle procedure per l'assegnazione degli appalti in base alle disposizioni legislative vigenti sia in riferimento alle nuove disposizioni in materia di efficienza energetica degli edifici.

Il contratto EPC proposto è caratterizzato sia da un'atipica natura giuridica, sia da un contenuto altamente tecnico; infatti in esso, oltre ai contenuti giuridici (garanzie, foro competente, norme di sicurezza, ecc.), sono presenti sia contenuti economici (modalità di finanziamento, calcolo delle prestazioni, ecc.), sia contenuti ingegneristici (diagnosi energetica, interventi di riqualificazione energetica dell'involucro edilizio e degli impianti). Ciò ha comportato il superamento di alcune difficoltà per semplificare il format contrattuale proposto al fine di contemperare le esigenze della Stazione Appaltante/Amministrazione Committente, che deve raggiungere degli obiettivi "obbligatori di efficienza energetica" e dell'Assuntore che deve finanziare, realizzare e gestire gli interventi previsti nel contratto EPC.

La documentazione proposta prescinde dalle procedure di gara che devono essere conformi alle norme sugli appalti pubblici, forniture e servizi, atte alla qualificazione economica, tecnica e finanziaria dell'Assuntore. Pertanto, lo schema contrattuale proposto non prevede un articolo sulla modalità di finanziamento dal momento che lo stesso modello di finanziamento è deciso in fase dell'offerta ed è parte integrante della stessa. Il finanziamento può avvenire sia attraverso forme di partenariato pubblico-privato (PPP) per contratti di notevole entità economica, sia con il sistema tradizionale (con fondi propri dell'Assuntore), sia attraverso un Finanziamento Tramite Terzi (FTT). Qualsiasi forma di finanziamento si scelga occorre che l'investimento sia remunerato obbligatoriamente dal risparmio energetico prodotto.

Per approfondimenti sull'attività si rimanda al rapporto RdS/PAr2014/083.

Sviluppo della certificazione energetico ambientale degli edifici come strumento per l'efficienza energetico-sostenibile e l'aumento della qualità ambientale interna degli edifici

La ricerca svolta dal centro CITERA dell'Università di Roma Sapienza riguarda il tema della certificazione ambientale degli edifici, che è oggigiorno di grande attualità sia sul fronte della ricerca che su quello della vita economica del Paese. L'opportunità e l'esigenza di promuovere una certificazione ambientale degli edifici nasce dall'idea di voler completare la certificazione energetica, oggi obbligatoria, con una di tipo ambientale, volontaria e complementare, che affronta problematiche legate all'impatto ambientale e alla qualità degli edifici, senza trascurare, attraverso l'analisi LCA, il considerevole dispendio energetico relativo alle filiere produttive dei materiali da costruzione e degli impianti.

Attualmente in Italia tale certificazione viene svolta applicando due differenti protocolli, quello Itaca e il sistema LEED Italia, derivato da quello sviluppato da USGBC73 negli Stati Uniti.

Un'analisi critica relativa all'applicazione di tali criteri certificativi alle tecnologie costruttive italiane e contestualizzata in un area climatica tipicamente mediterranea caratterizzata da una fascia di gradi giorno C e D, ha portato all'evidenziazione di alcune significative problematiche, che necessitano una risoluzione se si vuole passare dall'attuale fase volontaristica/premiale ad una successiva più cogente che diffonda i benefici di tale certificazione alla totalità degli edifici pubblici.

In entrambi i sistemi è stata riscontrata un'eccessiva e pedissequa applicazione di tutti i principi della bioedilizia,

senza tenere in adeguato conto sia le peculiarità climatiche della penisola italiana, che comportano ad esempio una ridotta efficienza di alcuni meccanismi che risultano essere estremamente efficaci in clima rigidi e continentali, sia il contesto urbano nel quale si viene molto spesso ad operare.

Inoltre vengono valutate alla stessa maniera pratiche energivore come il riciclo dei materiali ed altre particolarmente virtuose come il riuso dei medesimi, mentre - da analisi LCA - esse si differenziano sostanzialmente proprio sotto il profilo dell'utilizzo di energia elettrica e termica nel processo di realizzazione dei componenti stessi.

Inoltre l'assegnazione dei punteggi e delle conseguenti eventuali premialità costringe all'utilizzo massiccio e contemporaneo di più sistemi di produzione di energie rinnovabili, cosa difficilmente realizzabile in contesti altamente urbanizzati, sia per l'assenza di apporti energetici rinnovabili significativi (alle volte bisogna scegliere tra fotovoltaico e solare termico), che per la compatibilità con la vincolistica spesso presente sul patrimonio edilizio italiano.

Nella prima fase della ricerca è stata svolta un'analisi comparativa ed una rivisitazione critica dei principali protocolli esistenti ed in particolare di quelli attualmente utilizzati in Italia. Sono stati conseguentemente analizzati: il metodo BREAM, il marchio CASACLIMA, il sistema HQE, lo Swan Ecolabelling – Nordic Ecolabelling for Small Houses, il metodo LEED, il metodo GBC, il metodo CASBEE, il sistema PASSIVHOUSE, Il marchio Minergie®, Il metodo Built Green, Il metodo Nabers e il metodo HK-BEAM.

L'analisi sullo stato dell'arte si è poi estesa conseguentemente al Protocollo Itaca Nazionale indagato prima a livello di struttura generale e poi attraverso il suo processo evolutivo di più di dieci anni. Lo strumento operativo del Protocollo che ne è derivato è organizzato in aree di valutazione, categorie di requisiti e requisiti necessari a stabilire la performance di sostenibilità energetico-ambientale di fabbricati di nuova e vecchia edificazione, in relazione a situazioni normative e climatiche di ogni singola area geografica. L'analisi dello sviluppo è terminata con lo studio anche di alcuni protocolli semplificati adottati su base regionale quali ad esempio il "PROITACA della Regione Lazio (2015).

Si è proseguito poi con una analisi critica del Protocollo ITACA al fine di evidenziare eventuali punti di debolezza e/o scostamenti dalla realtà edilizia del nostro paese applicando tale protocollo a due casi studio particolarmente significativi quali un edificio residenziale in ristrutturazione ed un edificio ad uffici di nuova costruzione.

Dall'analisi dei risultati ottenuti messi a sistema con altri casi di applicazione svolti all'interno delle attività di ricerca del centro CITERA si evidenziano incongruenze macroscopiche delle schede che riguardano i materiali rinnovabili, riciclabili e riusati, ma si evidenzia altresì la difficoltà per chi opera nell'ambito della costruzione/ristrutturazione residenziale in un contesto fortemente urbanizzato, di potere realizzare ad esempio opere, quali fitodepurazione o vasca settica, richieste per limitare la immissione di rifiuti liquidi nella rete fognaria.

Anche nel caso di applicazione del protocollo ITACA residenziale in zone con clima mediterraneo, viene confermata l'estrema difficoltà, se non quasi l'impossibilita di ottenere un punteggio finale che superi la classificazione "buona" e cioè che riesca a raggiungere il 4. In linea generale questo deriva dal relativo peso che viene dato al consumo di energia (generalmente elettrica e quindi pregiata) che viene utilizzata per la climatizzazione estiva degli edifici, e che è diretta conseguenza dell'applicazione della normativa attualmente vigente in tema di certificazione energetica in edilizia. Questo rappresenta una criticità che assume una particolare rilevanza nella fascia climatica mediterranea che comprende parte del centro e quasi tutto il sud Italia e le isole e diventa quindi fondamentale una sostanziale revisione del sistema di protocollo da parte delle regioni più interessate a tale problematica.

La seconda fase della attività di ricerca ha riguardato la messa a punto, sulla base delle criticità sopra esposte, di sostanziali correttivi alle schede dei protocolli di certificazione attualmente in uso, con particolare riferimento alle tematiche innovative del ciclo virtuoso dei rifiuti (end of waste) e di tutti gli aspetti di contenimento dei consumi energetici che sono parte fondamentale dei criteri di costruzione e gestione degli edifici a energia quasi zero (NZEB).

In particolare sono state definite approfonditamente schede tecniche valutative relative alla differenziazione tra riciclo (pratica altamente energivora) e riuso dei materiali in edilizia, basate sull'utilizzo di analisi LCA dei componenti edilizi stessi (compresi i materiali provenienti da fonte rinnovabile)ed infine di quelle relative alla produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile che dovranno tenere in conto, nella loro premialità, di quanto attualmente necessario al sistema di produzione e dispacciamento di energia elettrica nel nostro Paese.

Sulla base delle nuove schede prodotte è stata effettuata una analisi di sensibilità sulle variazioni ottenibili sul risultato finale del Protocollo mediante la realizzazione di tre casi studio relativi a un edificio ad uso scolastico, ad un residenziale e ad un edificio a uffici nella zona climatica D.

Infine è stata valutata la compatibilità preliminare del sistema di certificazione ambientale dell'edificio proposto con quanto in fase di elaborazione dal Gruppo di Lavoro Scientifico dedicato all'elaborazione di un protocollo di certificazione ambientale dei manufatti edilizi su base urbana. Tale verifica è risultata essenziale per legare l'attività certificatoria a livello del singolo edificio con quella più generale (ancora in fase di sviluppo) che si occupa di "celle urbane complesse" viste come insieme continuo di manufatti.

L'attività svolta è documentata nel rapporto RdS/PAR2014/084.

c. Implementazione di una metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di illuminazione naturale

Costruzione degli Anni Meteorologici Tipo per l'Illuminamento Naturale (AMTIN) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli edifici

Il fabbisogno finale di energia per illuminazione artificiale degli ambienti di edifici rappresenta una percentuale significativa degli usi elettrici e globali negli edifici, specialmente per quelli del settore non residenziale. La norma EN 15193:2007 "*Energy performance of Buildings. Energy requirements for lighting*" introduce procedure di calcolo e misura per edifici non residenziali. Alcuni studi condotti negli anni procedenti hanno evidenziato i limiti di entrambi i metodi di calcolo, semplificato e dettagliato, implementati nella norma, soprattutto per quanto riguarda l'assenza dei dati climatici riguardanti la potenzialità e la disponibilità di luce naturale nelle località in cui si trova l'edificio da valutare.

ENEA propone un metodo di calcolo alternativo, ancora in fase di sviluppo, che utilizza l'illuminamento diffuso esterno sul piano orizzontale quale parametro climatico per stimare la disponibilità di luce diurna negli edifici e, conseguentemente, determinare i fabbisogni finali di energia elettrica per l'illuminazione artificiale.

Seguendo l'ormai stabile orientamento in ambiente internazionale per quanto riguarda l'organizzazione dei dati climatici, sono stati costruiti Anni meteorologici tipici d'illuminamento naturale (AMTIN), costituiti da vettori di dati orari d'illuminamento su piano orizzontale globale e diffuso per tre località (Milano, Roma, Palermo); l'estensione all'intero territorio nazionale è immediata.

Il rapporto RdS/PAR2014/085 presenta i primi risultati di un progetto avente come obiettivo la realizzazione dì mappe georeferenziate dei valori d'illuminamento, in maniera del tutto analoga a quanto già disponibile per la radiazione solare. *Anni meteorologici tipici d'illuminamento naturale* (AMTIN) orizzontale globale e diffuso sono stati costruiti per tre località (Milano, Roma, Palermo) a partire dai dati di radiazione solare, elaborati da ENEA, per calcolare i valori d'illuminamento, utilizzando i modelli più rilevanti disponibili in letteratura. I modelli consentono di calcolare i dati d'illuminamento dai dati d'irradianza solare e da altri parametri, dipendenti dal particolare modello adottato. I dati d'illuminamento globale e diffuso sono in seguito elaborati in modo da ottenere curve di disponibilità di luce naturale, da utilizzare per la stima del contributo dell'illuminazione naturale e calcolare i requisiti energetici per l'illuminazione artificiale negli edifici.

Sviluppo successivo del lavoro sarà di verificare e adattare i modelli di efficacia luminosa di letteratura impiegati o di identificarne uno nuovo, specifico per la situazione climatologica nazionale, mediante il confronto diretto tra le misure radiometriche della radiazione solare e le misure fotometriche di illuminamento globale e diffuso ottenute da apposita strumentazione (luxmetro) in tre stazioni già individuate: Milano, Roma e Lampedusa.

Proseguirà, inoltre, il lavoro di sviluppo del metodo di calcolo alternativo, proposto da ENEA, per la valutazione del fabbisogno energetico per l'illuminazione interna degli ambienti basato sui dati dell'AMTIN. Tale metodo sarà proposto, dopo la conclusione della presente linea di ricerca, per la revisione della citata norma EN 15193:2007 e sarà utilizzabile dal Ministero dello Sviluppo Economico per individuare i limiti e i requisiti per il servizio energetico "illuminazione artificiale" negli ambienti ai fini dell'attestato di prestazione energetica (APE) degli edifici.

Analisi tecnico-economica per il retrofit illuminotecnico di un edificio per uffici condotta con diverse metodologie di calcolo

L'analisi dei dati sui consumi di energia elettrica in Italia evidenzia quanto sia consistente l'incidenza dell'illuminazione artificiale nel settore terziario. La norma UNI EN 15193, che definisce il metodo di calcolo del fabbisogno energetico dovuto all'illuminazione, è attualmente in fase di revisione in quanto numerosi studi hanno evidenziato la sovrastima dei fabbisogni energetici per l'illuminazione calcolati con la presente nella norma. Obiettivo del lavoro è quello di confrontare il metodo di calcolo del *LENI* da norma con un metodo alternativo, già definito in un precedente report di ENEA, attraverso la simulazione su più tipologie di ambienti definiti sulla base

di un set di parametri variabili, in modo tale da identificare le relazioni tra i parametri in gioco e i valori del *LENI*, approfondire le criticità del metodo da norma, evidenziare quelle del metodo alternativo e suggerire soluzioni migliorative. Le due tipologie di ambienti scelti sono uffici e ed aule scolastiche, mentre i parametri di variazione applicati ai casi studio sono la latitudine, i rapporti aeroilluminanti (*RAI*), la geometria dei locali e delle finestre, la tipologia di sorgente luminosa installata. I risultati del confronto confermano che il *C* ottenuto con il metodo da norma è superiore a quello ottenuto con il metodo alternativo, e che questi registra le variazione dei parametri geometrici e geografici considerati in modo più significativo.

L'approccio utilizzato per confrontare i valori del *LENI* ottenuti con il metodo completo da norma e quelli con il metodo alternativo, si fonda sulla procedura definita ed utilizzata nel report ENEA RdS/PAR2013/120. Il calcolo del *LENI* definito dalla UNI EN 15193, è stato effettuato utilizzando un foglio di calcolo che consentisse di determinarne i valori con il metodo completo su base annuale e mensile, con le ore di utilizzo diurne (t_D) e non diurne (t_N) calcolate su base nazionale su un anno tipo.

Il metodo alternativo nella formula del *LENI* sostituisce alle ore di utilizzo t_D e t_N, le ore di accensione dell'impianto t_{sat} calcolate sulla base dei dati di illuminamento esterno misurati, per la valutazione del contributo dovuto all'illuminazione naturale. Ogniqualvolta i livelli di illuminamento esterno possono garantire da soli il raggiungimento dei livelli di illuminamento mantenuto indicato per gli interni, l'impianto si riterrà spento. Per calcolare il livello di illuminamento esterno E_e che garantisce il raggiungimento di quello interno E_i prescritto, è stata utilizzata la formula del fattore di luce diurna *FLD.*

Il confronto fra i risultati del metodo alternativo e quelli ottenuti secondo la UNI EN 15193 con tempi di accensione calcolati su base nazionale, è stato effettuato su tutti i casi studio combinando le differenti variabili sopra indicate. Su un set limitato di casi è stato svolto un ulteriore confronto tra i valori del *LENI* ottenuti con gli altri metodi di calcolo definiti dalla norma (il metodo semplificato su base annuale ed il metodo completo su base annuale con t_D e t_N *indicate* nel prospetto G.1 della norma) e con il metodo alternativo su base annuale calcolando le ore di disponibilità di luce diurna utilizzando i diagrammi di Dresler.

Dal punto di vista funzionale si è deciso di analizzare un ambiente scolastico ed un ambiente di tipo ufficio. Gli ambienti sono stati posizionati idealmente a tre latitudini differenti: Milano, Roma e Palermo. La fascia oraria operativa scelta per l'ambiente scolastico è 8:00 - 16:00 con un intervallo di chiusura 13:00 - 14:00, mentre per gli uffici è un orario continuato 8.00 - 18:00. Le ore complessive annuali nel primo caso sono state definite sulla base del calendario dell'anno scolastico 2014/2015, mentre nel secondo caso sulla base dei dati nazionali sui giorni lavorativi per anno tipo. I valori specifici con t_D e t_N sono stati ridefiniti utilizzando gli orari di alba e tramonto per ognuna delle tre latitudini prese in esame.

In base alle prescrizioni normative vigenti, si è deciso di calcolare il *LENI* per due livelli di illuminamento, 300 lx per le scuole e 500 lx per gli uffici, e di garantire rapporti aeroilluminanti di 1/5 ed 1/8 (identificando poi diverse tipologie di finestre) per ogni ambiente analizzato e per ognuna delle tre località. I casi studio risultanti dalla variazione dei parametri geometrici per ogni località sono 11 per le aule scolastiche e 4 per gli uffici. Per il confronto completo tra i due metodi sono stati utilizzati corpi illuminanti con sorgente LED. E' stata successivamente effettuata una comparazione tra i valori del *LENI* ottenibili utilizzando altri corpi illuminanti con sorgenti fluorescenti lineari T5 e T8.

Confronto tra i valori di LENI annuali

Sia per le aule che per gli uffici, i due parametri variati in questa analisi sono la latitudine e la geometria dei locali e delle finestre mentre è rimasta invariata la tipologia di sorgente luminosa (LED). Nel caso del metodo alternativo, i valori del *LENI* sono stati calcolati tenendo in considerazione sia il FLD_m che i *FLD* puntuali.

Nelle 11 tipologie di aule analizzate, i risultati ottenuti mostrano che il *LENI* calcolato con il metodo alternativo sulla base del FLD_m è sempre inferiore a quello calcolato secondo la norma. Sulla base del *FLD* puntuale, solo quando il punto di calcolo è molto vicino alle finestre, il valore del *LENI* calcolato con il metodo alternativo è inferiore a quello da norma per tutte e tre le latitudini; negli altri casi (punti più distanti dalla finestra) risulta essere superiore a quello da norma. In particolare, con il metodo alternativo:

- si registrano in modo molto più significativo rispetto alla norma le differenze di latitudine mostrando un decremento proporzionale al diminuire della latitudine, sia se calcolato sulla base del FLD_m che se calcolato con il FDL puntuale;
- i casi in cui si registrano differenze nel valore del *LENI* al variare della geometria della finestra sono più frequenti rispetto alla norma, ma di entità inferiore. (norma: tra 0.5 – 0,6 kWh/m^2 anno; metodo alternativo: tra 0,1 e 0,2 kWh/m^2 anno);

- le differenze nel valore del *LENI* al variare del *RAI* risultano essere molto maggiori rispetto alla norma. (norma: tra 0,3 e 0,6 kWh/m^2 anno; metodo alternativo : tra 0,5 e 1,6 kWh/m^2 anno)

Nelle 4 tipologie di uffici analizzati, come per le aule, i risultati ottenuti mostrano che il del FLD_m calcolato con il metodo alternativo sulla base del FLD_m è sempre inferiore a quello calcolato secondo la norma. Sulla base del FLD_m puntuale, quando il punto di calcolo è molto vicino alle finestre il valore del *LENI* calcolato con il metodo alternativo è inferiore a quello da norma per tutte e tre le latitudini; per i punti più distanti dalla finestra risulta essere superiore a quello da norma. In particolare, con il metodo alternativo;

- si evidenzia che il *LENI*, decresce proporzionalmente ed in modo più sostanziale rispetto alla norma al diminuire della latitudine in ogni ambiente ad eccezione di un caso in cui il *LENI* da metodo alternativo a Roma è maggiore di quello a Milano. Questo risultato è legato alla combinazione di più variabili come gli orari operativi, i dati climatici di riferimento, i livelli di illuminamento nell'area de compito;
- le differenze nel valore del *LENI* al variare dei *RAI* risultano essere molto maggiori rispetto alla norma. (norma: tra 0,4 e 0,9 kWh/m^2 anno; metodo alternativo: tra 3,6 e 5 kWh/m^2 anno)

Confronto tra i valori di LENI mensili

Con entrambi i metodi è possibile effettuare un calcolo del *LENI* mensile. Il confronto è stato effettuato per il soli casi localizzati idealmente a Roma. Con il metodo da norma i risultati ottenuti mostrano come negli uffici non si registrano sostanziali variazioni nei vari mesi, mentre nelle aule queste sono più consistenti in relazione al fatto che nei mesi estivi le attività sono ridotte o assenti.

I risultati con il metodo alternativo hanno un andamento del tutto differente perché, nonostante i giorni e le ore lavorative mensili considerati siano gli stessi, il metodo alternativo registra in maniera precisa le variazioni di illuminamento esterno portando anche considerare l'impianto di illuminazione artificiale completamente spento per tutto l'orario operativo in per alcuni mesi dell'anno.

Valori del LENI *con diverse tipologie di sorgenti luminose*

Sono stati confrontati i valori del *LENI* ottenuti utilizzando corpi illuminanti con sorgente a LED, con fluorescenti lineari T5 e T8. Si è limitata l'analisi alle aule scolastiche a Milano in quanto, essendo il *LENI* proporzionale alla potenza installata, il rapporto tra le diverse sorgenti luminose rimane il medesimo anche per le altre località prese in esame. Si sono mantenute costanti le dimensioni degli apparecchi, il loro orientamento e la posizione di installazione. Con tutti i corpi illuminanti sono comunque sempre state rispettate le prescrizioni imposte dalla UNI EN 12464-1 sia in termini di $\bar{E}_m$ che di l'uniformità orizzontale (*UO).* E' risultato che il *LENI* calcolato con sorgenti T5 è il 91% di quello calcolato con sorgenti T8. Il *LENI* calcolato con i LED è il 56% di quello con sorgenti T5 ed il 50% di quello con sorgenti T8.

Confronto tra i vari metodi di calcolo del LENI

Un ulteriore approfondimento è stato effettuato confrontando tra loro tutti i metodi con i quali è possibile calcolare i valori del *LENI*. Questa comparazione è stata eseguita su due aule e due uffici di uguali dimensioni ma con differenti *Rai* (1/5 ed 1/8). I dati sono stati ottenuti attraverso:

- il metodo semplificato su base annuale secondo la UNI EN 15193;
- il metodo completo su base annuale secondo la UNI EN 15193, con t_D e t_N indicati nel prospetto G.1 della norma;
- il metodo completo su base annuale secondo la UNI EN 15193, con t_D e t_N calcolati su base nazionale su un anno tipo;
- il metodo alternativo su base annuale, calcolando t_{sat} servendosi dei i dati di illuminamento esterno provenienti dal database di satel-light.com;
- il metodo alternativo su base annuale, calcolando le ore di utilizzo dell'impianto di illuminazione artificiale servendosi dei diagrammi di Dresler.

Nelle aule scolastiche le differenze tra i due metodi alternativi sono in valore assoluto molto contenuti (al massimo 0,2 kWh/m^2 anno. Tra il metodo alternativo con dati satellitari ed i metodi da norma, le differenze in valore assoluto raggiungono anche 7,8 kWh/m^2 anno (1300%) in favore del metodo alternativo.

Negli uffici le differenze crescono in valore assoluto (sempre in favore del metodo alternativo) raggiungendo al massimo 10,7 kWh/m^2 anno, ma scendono in percentuale (302%) in virtù della differenza degli orari operativi.

Le differenze riscontrate tra i valori del *LENI* ricavate con i diversi metodi di calcolo, rispecchiano i risultati presenti nei precedenti studi. Questo metodo alternativo ha restituito nella maggior parte dei casi valori del *LENI* inferiori a quelli ottenuti con i vari metodi descritti nella UNI EN 15193, risultando più sensibile alle variazioni della latitudine

e della geometria degli ambienti. Attraverso questa ricerca è stato anche possibile evidenziare alcune criticità di questo metodo alternativo legate principalmente alla scelta dei dati climatici di riferimento e alla definizione dell'apporto di luce naturale negli ambienti. Futuri sviluppi della ricerca potrebbero prendere in considerazione il confronto del *LENI* calcolato con dati climatici provenienti da differenti database, considerando in qualche modo anche l'apporto diretto della luce diurna in considerazione del fatto che alle latitudini più basse in Europa la condizione di cielo coperto non è quella più frequente, possibilmente scegliendo un parametro alternativo al **FLD** per la valutazione dell'apporto di luce diurna. Un più ampio set di casi studio potrebbe certamente descrivere in maniera più dettagliata l'influenza dei parametri fisico-geometrici degli ambienti sul valore del *LENI*, integrando anche un'analisi economica.

Per approfondimenti sull'attività, svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica della Sapienza Università di Roma, si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/087.

d. Tecnologie per involucri edilizi ad elevate prestazioni

Invecchiamento e sporcamento di cool material: esposizione naturale e accelerata

L'utilizzo di materiali ad alta riflettanza solare ed emissività termica - noti come cool material - per le coperture degli edifici può contribuire al risparmio energetico, migliorare il microclima urbano e la qualità dell'aria. Tuttavia, le superfici degli edifici sono soggette a invecchiamento e sporcamento, fenomeni che alterano la riflettanza solare e l'emissività termica, riducendo i risparmi per la climatizzazione estiva ottenibili con i cool material.

Nei precedenti anni di attività sono stati selezionate 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole in terracotta di tipo olandese, con diversa rugosità superficiale e riflettanza solare al tempo zero (fra 0,26 e 0,85).

A partire da metà aprile 2012, i materiali selezionati sono stati esposti su due edifici a Roma e Milano e dopo 3, 6, 12, 18, 24, e 36 mesi di esposizione i campioni sono ritirati, ne è stata misurata la riflettanza solare spettrale, e sono stati riesposti. Al tempo zero e dopo tre anni di esposizione ambientale è stata misurata anche l'emissività termica.

In collaborazione con il Lawrence Berkeley National Laboratory, è stata sviluppata una procedura accelerata di esposizione atmosferica e sporcamento per i materiali per coperture, utile a valutare le condizioni di sollecitazione nei contesti urbani italiani. Questa prevede cicli di esposizione ai raggi UVA e caldo umido (a 40 °C e 90% di umidità relativa), e di sporcamento mediante l'irrorazione di una miscela a base acquosa di polveri minerali, nero di carbone, sali, e acido umico.

Grazie all'esposizione ambientale si è osservato che la riflettanza solare delle membrane impermeabilizzanti risulta stabile dopo circa due anni. Con una regressione sui dati sperimentali, si è calcolato che per membrane con riflettanza solare iniziale pari a 0,80 la perdita è stata in media di 0,24 per i campioni esposti a Milano, e di 0,17 a Roma. Inoltre, se due materiali hanno la stessa riflettanza solare iniziale, quello fra i due che ha maggiore riflettanza nel vicino infrarosso presenta un minore decremento di riflettanza solare rispetto al materiale con maggiore riflettanza nel campo del visibile. Questo accade perché il carbon black è l'inquinante che maggiormente contribuisce all'assorbimento di radiazione solare, e la sua assorbanza per unità di spessore di deposito è decrescente con la lunghezza d'onda. Inoltre, la maggior parte delle perdite di riflettanza dovute al degrado fotochimico, all'azione dell'acqua e alle deposizioni di materiale organico e inorganico, si manifesta principalmente fra 420 e 600 nm. A tre anni di esposizione si sono registrate fluttuazioni che non alterano il quadro generale, a seguito dell'anomalia climatica dell'estate del 2014, eccezionalmente piovosa. Le variazioni dell'emissività termica sono invece modeste. Dopo tre anni, la riflettanza solare delle tegole in laterizio, invece, appare ancora in decremento: quella delle tegole rosse varia da 0,47 a 0,35, mentre per quelle rivestite con una pittura bianca varia da a 0,73 a 0,53 (in media fra Milano e Roma).

La procedura di esposizione atmosferica e sporcamento accelerato sviluppata è stata ulteriormente affinata, fornendo un miglior raccordo con i dati sperimentali. La procedura sviluppata consente di riprodurre in pochi giorni (circa una settimana) e in modo economico e affidabile gli effetti dell'esposizione ambientale sulla riflettanza solare dei materiali d'involucro edilizio esposti in contesti urbani italiani. Dato che per soddisfare i criteri di economicità e di rapidità della procedura vengono eseguiti solo pochi cicli di esposizione accelerata ai raggi UV e ad alta umidità relativa, questa procedura non può essere considerata una procedura di valutazione della durabilità o della vita utile dei materiali o componenti edilizi. E' utile come procedura per fornire risultati provvisori per nuovi prodotti in attesa che siano ottenuti i dati da tre anni di esposizione naturale, e non va quindi intesa come sostitutiva dell'esposizione naturale.

I risultati dell'attività svolta nel quadro della collaborazione con il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) del Politecnico di Milano sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2014/088.

Involucro trasparente a carattere dinamico e adattativo tramite l'integrazione di Phase Change Material in elementi schermanti, ai fini della riduzione della domanda energetica per raffrescamento e illuminazione artificiale.

L'attività è rivolta allo sviluppo di un elemento vetrato tradizionale con un sistema schermante in policarbonato e materiale a cambiamento di fase (PCM) integrato. Il sistema è costituito da un vetrocamera con un sistema schermante scorrevole che integra PCM. La tecnologia studiata aveva l'obiettivo di:

- modulare i carichi solari entranti, grazie alla presenza della schermatura con materiale a cambiamento di fase;
- implementare l'inerzia termica del componente trasparente;
- regolare la radiazione luminosa evitando fenomeni di abbagliamento e mantenendo livelli di illuminazione naturale adeguati.

Ad una prima fase di concept del sistema e messa in opera sono seguite le fasi di testing, condotte sia a livello di materiale in laboratorio (caratterizzazione termica e spettrofotometrica) che di componente/sistema (misure sull'apparato sperimentale TWINS – cella di prova posizionata su un edificio del Politecnico di Torin) e di simulazione (accoppiamento modellazione Energy Plus e Daysim).

Sono state testate due configurazioni mirate ad analizzare l'effetto del colore del policarbonato (cristallo/opale/blu/verde) e di tre diverse tipologie di PCM (sali idrati, paraffina e biobased) sulla prestazione energetica e luminosa del sistema. L'ipotesi iniziale di studiare anche diverse temperature di transizione è stata condotta solo in laboratorio, anche a causa di una stagione estiva eccezionalmente calda per periodi di tempo molto lunghi.

I dati ottenuti hanno dimostrato che il sistema ha una discreta potenzialità nel ridurre i carichi di raffrescamento (in condizioni ideali si arriva ad un abbattimento del 30% delle energie giornaliere entranti) ma molto variabile in funzione delle condizioni microclimatiche esterne (in presenza di cielo sereno, temperature esterne superiori a 30 °C portano ad un melting del PCM troppo rapido rendendo inutile se non peggiorativa la sua presenza nel policarbonato).

A livello tecnologico è importante sottolineare che risulta ad oggi ancora estremamente problematica (ad esclusione del PCM biobased) la tenuta del materiale nel policarbonato e che su questo tema è necessaria una ricerca specifica.

Dal punto di vista della prestazione energetica globale (riscaldamento/raffrescamento/illuminazione) il sistema non si rivela particolarmente efficace nella configurazione testata a temperatura di fusione unica, mentre l'accoppiamento di più lastre con temperature diverse renderebbe il sistema maggiormente "adattivo".

I risultati dello studio condotto presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino sono illustrati nel rapporto RdS/PAR/072.

Misura e prestazioni di sistemi trasparenti integrati con PV del tipo view-through

Negli ultimi anni l'utilizzo di moduli fotovoltaici si è notevolmente diffuso, sia per la presenza di meccanismi di incentivazione che per un rinnovato interesse verso le tematiche ambientali rivolte alla progettazione di edifici che consumino poca energia e garantiscano bassi livelli di emissioni inquinanti. In particolare, notevole sviluppo hanno avuto le tecnologie legate al Building Integrated Photovoltaics (BIPV), ossia all'installazione di sistemi fotovoltaici integrati nell'involucro che rivestono la duplice funzione di produttori di energia e di elementi di involucro e non più semplicemente e banalmente "depositati" sulle superfici che costituiscono il confine dell'edificio.

In particolare i sistemi vetrati costituiscono un elemento fondamentale dell'involucro edilizio in grado di svolgere più funzioni contemporaneamente: ingresso di energia, ingresso di luce, visione del contesto ambientale esterno. L'innovazione tecnologica dei materiali permette attualmente di aggiungere anche una ulteriore funzione che è quella della produzione di energia ossia della trasformazione dell'energia radiante solare in energia elettrica. Ciò risulta di notevole interesse in relazione alla necessità di realizzare entro pochi anni, sulla spinta della legislazione nazionale e europea, edifici che non consumino energia (ZEB) o che ne consumino molto poca (NZEB) e che al contempo garantiscano un basso impatto ambientale con limitate emissioni e basso consumo di risorse.

Parallelamente alla diffusione di tali tecnologie, si sono aperte nuove tematiche di ricerca legate alla caratterizzazione termo-energetica dei moduli BIPV. La loro applicazione e le loro caratteristiche sono in continua evoluzione ed i temi che li riguardano da sviluppare ed approfondire sono numerosi. In particolare, non sono ancora stati completamente consolidati i valori dei principali parametri di caratterizzazione energetica e ottica di tali elementi. Tali parametri risultano indispensabili per poter caratterizzare correttamente i componenti e per poter confrontare questi sistemi con i tradizionali elementi d'involucro trasparenti e non produttori di energia. Il

tema risulta interessante soprattutto se si considera quest'ultimo aspetto legato alla produzione di energia elettrica. Nel bilancio complessivo dell'edificio, infatti, non sarà più presente una sola componente passiva di ingresso/uscita di energia attraverso il componente stesso, come accade ora per i tradizionali elementi di involucro trasparenti ed opachi, ma anche una componente attiva di produzione di energia che potrebbe, in parte o del tutto, compensare lo svantaggio in termini di bilancio energetico.

In quest'ottica e dopo una corretta caratterizzazione, è possibile quindi pensare di poter stimare in maniera più precisa il fabbisogno di energia degli edifici, anche e soprattutto in una fase di progettazione. Tale previsione può essere fatta grazie all'utilizzo di metodi di simulazione oramai sufficientemente consolidati nel campo dell'energetica degli edifici.

Il presente lavoro rappresenta il completamento di quanto sviluppato nella precedente annualità dallo stesso gruppo di lavoro e ha l'obiettivo di sviluppare le tematiche aperte, sopra citate, e di colmare le lacune presenti nel campo della caratterizzazione dei componenti BIPV. Nei due anni di lavoro sono state affrontate le misure dei parametri citati attraverso il coinvolgimento del Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale dell'Università IUAV di Venezia, dei laboratori ENEA, della Stazione Sperimentale del Vetro di Murano (VE) e del Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (Friburgo, Germania). Parallelamente alla caratterizzazione dei parametri termici ed ottici, si è sviluppato un modello termico alle differenze finite, che ha permesso di affrontare in maniera più solida la simulazione del sistema edificio. La ricerca si è sviluppata nei seguenti pacchetti di lavoro:

- analisi dello stato dell'arte rispetto ai prodotti BIPV. Si sono presi in considerazione sistemi produttori di energia di tipo fotovoltaico integrati nell'involucro edilizio (BIPV) e si è ampliata l'indagine di mercato sulle diverse tipologie di prodotti e sulle loro caratteristiche;
- analisi dello stato dell'arte rispetto alla caratterizzazione di sistemi BIPV. Sono stati considerate le tecniche di caratterizzazione dei sistemi BIPV catalogando le esperienze presenti nella letteratura scientifica;
- attività sperimentale di caratterizzazione. Sono stati predisposti un sistema vetrato stratificato fotovoltaico semi-trasparente e una vetrocamera fotovoltaica semitrasparente con la collaborazione dell'azienda Union Glass di Motta di Livenza (TV) Si è proceduto alla caratterizzazione della produzione elettrica in diverse condizioni di irraggiamento presso il Università IUAV. Presso il Laboratorio Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE di Friburgo si è proceduto alla determinazione del fattore di guadagno solare. Infine le proprietà ottiche e radiative degli elementi dei sistemi studiati (coefficienti di riflessione, trasmissione ed assorbimento) sono state misurate attraverso analisi spettrale alle varie lunghezze d'onda presso la Stazione Sperimentale del Vetro di Murano Venezia;
- messa a punto di un modello numerico. Si è completata la realizzazione di un modello numerico del comportamento energetico di sistemi BIPV al fine di stimarne le caratteristiche ottiche e termiche. Utilizzando tale modello sono state effettuate le stime dei parametri di trasmissione solare e trasmittanza e i valori sono stati confrontati con i risultati sperimentali sintonizzando il modello numerico;
- simulazione dell'applicazione di sistemi BIPV. Utilizzando un software di simulazione energetica dinamica dell'edificio, si è analizzata l'integrazione del sistema di produzione fotovoltaica sull'edificio. Le analisi sono state eseguite considerando un modulo ufficio e una abitazione singola soggetta a retrofit energetico.

Nel caso dell'edificio per uffici si è considerato il comportamento energetico di un "piano tipo" posto al piano intermedio di un edificio a torre a pianta quadrata. Sono state valutate quattro tipologie di WWR (Windows to Wall) e tre livelli di prestazione energetica dell'involucro. La proposta di intervento consiste nell'installazione, in tutti gli orientamenti e in egual modo, di celle BIPV che coprono il 60% delle chiusure trasparenti.

L'analisi evidenzia come l'installazione del sistema BIPV, nonostante un sensibile aumento dei consumi in regime invernale, permetta una riduzione considerevole dei consumi energetici totali per la climatizzazione. Maggiore è la percentuale di WWR maggiore è la percentuale del risparmio energetico dell'intervento. La percentuale di risparmio energetico rimane pressoché invariata per tutti i tre tipi di involucro analizzati. Si nota inoltre come la produzione elettrica del sistema BIPV con una percentuale di copertura del 60% delle chiusure trasparenti garantisca, per tutti gli edifici con WWR superiore al 20%, la copertura totale dei consumi annuali per la climatizzazione invernale ed estiva. Al contrario, nonostante il sistema copra grande parte dei consumi, non si riesce in nessuna combinazione a soddisfare la totalità dei consumi annuali: i consumi per la climatizzazione invernale ed estiva, l'illuminazione, la produzione di ACS e le apparecchiature elettroniche.

La soluzione BIPV, nel caso di edifici ad uffici, risulta una valida proposta per la produzione di energia elettrica soprattutto di edifici sviluppati in altezza. Questa soluzione, permette al contempo un miglior controllo solare in regime estivo, sacrificando però la parte invernale. Maggiore è il WWR dell'edifico maggiore è la convenienza di tale sistema. E' importante però valutare la compatibilità della luce naturale all'interno dei luoghi di lavoro.

Nel caso dell'edificio residenziale I'installazione di un sistema BIPV negli infissi e nella copertura permette di

ridurre il fabbisogno di energia primaria di circa il 8%. L'inserimento del fotovoltaico all'interno delle finestre comporta una serie di considerazioni generali: il contributo al miglioramento delle prestazioni energetiche è minore ed è dovuto alla minor superficie e alle diverse esposizioni e all'angolo di incidenza verticale; le celle utilizzate sono opache e riducono la trasparenza del vetro, ma non influiscono gravemente sul comfort visivo e sulla luce naturale all'interno degli ambienti; i costi invece rimango molto elevati se confrontati all'installazione del fotovoltaico in copertura e anche il ritorno dell'investimento non è conveniente rispetto alla produzione di energia elettrica fornita. Si è poi analizzato un insieme di interventi di retrofit energetico tra cui è stata prevista anche l'installazione di sistemi BIPV utilizzando la metodologia proposta dall'Annex 56 di IEA, che prevede l'ottimizzazione rispetto al consumo di energia, al costo e alle emissioni di gas serra.

Si è notato come una notevole influenza sul risultato finale sia rivestita dal tipo di combustibile e di generatore. In particolare con l'utilizzo del pellet si hanno risultati molto interessanti. Le prestazioni energetiche dei casi con il BiPV sono complessivamente molto buone e rappresentano le soluzioni con i minori fabbisogni di energia primaria per l'edificio. Tuttavia i costi sono elevati, con una quota variabile del 200-150% rispetto al valore del caso ottimale M30. Nel contesto dei possibili interventi per il retrofit energetico del patrimonio edilizio esistente, il fotovoltaico integrato è un'opzione sostenibile solo se opportunamente configurato non come singolo intervento ma all'interno di un programma di interventi che riguardano l'involucro e l'impiantistica; nel caso studio infatti il fotovoltaico integrato con il cambio di generatore e l'isolamento dell'involucro permettendo di ottimizzare l'intervento nell'edificio: sono raggiungibili elevate prestazioni energetiche, registrando un fabbisogno energetico di 70 $kWh/a*m^2$, le emissioni di gas serra sono ridotte fino 9 $kgCO_2/a*m^2$ e una convenienza economica usufruendo delle detrazioni fiscali.

Per dettagli sulle attività svolte si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/089.

Misura e analisi numerica della trasmittanza termica di vetrate isolanti con schermature in intercapedine

L'edilizia moderna, soprattutto quella del settore non residenziale, è caratterizzata da grandi superfici trasparenti. La facciata continua, come è chiamata in termini tecnici, espone l'involucro edilizio a elevati apporti solari, in quanto è generalmente priva di opportune schermature solari per scelte prevalentemente architettoniche. Essendo l'efficacia delle schermature solari interne molto limitate, è apparso opportuno investigare caratteristiche e prestazioni di schermature solari poste all'interno di vetrate isolanti.

Si sono inizialmente individuati i materiali più utilizzati per queste soluzioni, presentando una serie di misure sperimentali svolte nei laboratori ENEA, atte a caratterizzare dal punto di vista ottico questi materiali. I dati sono poi stati usati come input per la determinazione delle proprietà luminose, solari e termiche di sistemi semi-trasparenti complessi per l'involucro edilizio, evidenziandone limiti e benefici prestazionali in funzione di una serie di variabili significative.

Nella fase finale del lavoro sono state analizzate le prestazioni energetiche e illuminotecniche di un edificio di riferimento ad uso ufficio, in cui le superfici trasparenti sono equipaggiate con diversi soluzioni di sistemi vetrati e schermanti. L'analisi energetica ha esplorato anche la dipendenza climatica della risposta termica dell'edificio in funzione delle soluzioni tecnologiche testate.

L'attività svolta è descritta nel rapporto RdS/PAR2014/090.

e. Piano integrato per l'informazione, sensibilizzazione e diffusione sui temi dell'efficienza energetica verso le Pubbliche Amministrazioni

Guida operativa e tool kit per condurre una valutazione di efficacia delle campagne di sensibilizzazione sui temi del risparmio e dell'efficienza energetica

I progetti di informazione locali dedicati ai temi del risparmio e dell'efficienza energetica condividono il desiderio di informare e/o coinvolgere l'intera comunità formata da target di diversa natura e caratteristiche. L'universo di tali progetti informativi comprende una vasta gamma di attività, ma molti tendono a concentrarsi su uno o alcuni dei seguenti elementi:

News	Rafforzare la credibilità delle fonti di informazione professionale.
Voice	Fornire luoghi in cui gli attori coinvolti possono condividere notizie e informazioni
Capacity building	Costruire la capacità di individui e / o organizzazioni di rispondere alle diverse esigenze di informazione e di utilizzare strumenti diversi.
Awareness	Creare campagne di sensibilizzazione

È stata redatta una guida [rapporto RdS/2014/091] che l'obiettivo di aiutare le PP.AA. a raccogliere informazioni utili circa l'efficacia e l'impatto dei propri programmi di informazione sui temi dell'efficienza energetica, mettendo in evidenza gli aspetti del processo di valutazione.

La guida descrive e include strumenti rilevanti e significativi che possono essere utilizzati per valutare i progetti di informazione in relazione ai temi connessi al risparmio e l'efficienza energetica.

La guida conduce i valutatori attraverso i passi essenziali per la progettazione di una valutazione dei progetti di informazione comunitari. Inoltre, essa include suggerimenti, strumenti ed esempi di progetti di informazione della comunità che sono attualmente in corso di attuazione da diversi beneficiari.

Nel documento si spiega cosa fare e quali elementi considerare nelle diverse fasi del processo di valutazione:

1. Descrivere il progetto e identificare il relativo target di riferimento;
2. Identificare lo scopo della valutazione e le domande chiave;
3. Progettare la valutazione con metodi efficaci;
4. Comunicare e riferire i risultati della valutazione per prendere decisioni e agire.

In appendice, il documento contiene modelli che possono essere applicati a qualsiasi percorso di valutazione.

Modulo didattico definitivo del Corso EQUEM PA

Modulo didattico definitivo del Corso EQUEM PA. Nell'ambito della seconda annualità del progetto "Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico" è stato progettato, realizzato e testato E-quem PA un percorso formativo basato sull'utilizzo delle nuove tecnologie per l'apprendimento e finalizzato a migliorare le competenze da parte dei funzionari pubblici nel campo della Gestione dell'Energia e dell'Efficienza Energetica. Il test è avvenuto all' interno di due corsi realizzati presso la Scuola delle Energie del Centro ENEA della Casaccia. A seguito di tale azione pilota sono state raccolte le valutazioni, i commenti ed i suggerimenti di tutti partecipanti consentendo la realizzazione della versione finale dello strumento che viene messo a disposizione della PA [rapporto RdS/PAR2014/092].

L'etichettatura energetica: dagli eldom ai componenti e sistemi

L'attività svolta è essenzialmente incentrata sugli aspetti normativi e descrittivi, alla luce del recepimento delle Direttive Europee, che riguardano l'etichettatura energetica, oggi non solo applicata a prodotti domestici, professionali ed industriali, ma considerata come strumento per fornire informazioni sulle prestazioni energetiche e funzionali di sistemi composti da diversi prodotti a loro volta coperti da etichettatura energetica e/o requisiti di ecodesign.

Nel rapporto RdS/PAR2014/094 sono descritti in dettaglio i requisiti di etichettatura ed ecodesign ultimamente pubblicati o entrati in vigore per apparecchi per la ventilazione domestica e commerciale, per la refrigerazione professionale, caldaie e scaldaacqua a combustibile liquido, solido e gassoso.

Il consumatore pro-attivo

Nel caso in esame viene considerato "consumatore proattivo" qualsiasi soggetto privato o pubblico che persegue azioni per migliorare la propria impronta ecologica attraverso la caratterizzazione ambientale dei propri acquisti utilizzando gli strumenti diretti o indiretti esistenti a livello nazionale e soprattutto comunitario: Patto dei Sindaci, Green Public Procurement, etichette energetiche ed ambientali, direttive e regolamenti comunitari sull'efficienza energetica.

Nella presente annualità numerose azioni dirette ed indirette sono state realizzate da ENEA - che è anche il Coordinatore nazionale del Patto dei Sindaci - per migliorare la conoscenza e supportare la diffusione del Green Public Procurement (GPP) fra gli attori economici e non del Paese. Di particolare importanza l'analisi dei Piani d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES) di un campione di comuni firmatari del Patto in cui sono state previste azioni di GPP e delle risposte ad uno specifico questionario e la preparazione di una Guida che fornisce indicazioni sull'importanza del GPP nel PAES e suggerimenti per l'implementazione pratica. Queste azioni sono state realizzate in collaborazione con CONSIP che condivide con ENEA la gestione del progetto comunitario "Green ProcA – In prativa … acquisti verdi". Questo progetto si rivolge soprattutto ai firmatari del Patto dei Sindaci che hanno incluso gli acquisti verdi fra le azioni previste dal loro Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile, ma anche ai soggetti pubblici che hanno intenzione di aderire al Patto o che hanno stabilito degli obiettivi volontari di miglioramento dell'efficienza energetica e di riduzione delle emissioni di CO_2.

Nel rapporto RdS/PAR2014/095 vengono descritte le complesse interazioni e sinergie esistenti nella legislazione comunitaria (direttive e Regolamenti) per l'efficienza energetica, le etichette e marchi energetici e ambientali e gli appalti pubblici in cui si inserisce il Green Public Procurement. In particolare emerge come le etichette e i marchi energetici ed ambientali sono non solo lo strumento di elezione per identificare i beni e servizi eco-efficienti, ma sono anche la fonte o comunque la guida per la definizione dei criteri verdi e infine lo strumento per accertare e verificare la conformità dei prodotti acquistati a tali requisiti.

Strumento per la sensibilizzazione dell'utente finale sui temi del risparmio energetico, in riferimento alla scelta di comportamenti più consapevoli nell'utilizzo dell'energia

L'aumento del prezzo dell'energia, unito alla diffusione di nuove apparecchiature domestiche e all'adozione di comportamenti sempre più energivori, hanno fatto sì che la spesa per le forniture energetiche pesi in maniera sempre più importante sul bilancio delle famiglie. Altro ambito particolarmente gravoso sulla spesa delle famiglie è rappresentato dagli spostamenti quotidiani, prevalentemente quelli casa-lavoro.

Diversi soggetti pubblici e privati hanno sviluppato strumenti per il calcolo delle emissioni e dei consumi energetici legati ai trasporti e/o ai consumi domestici. Ad esempio esistono strumenti per misurare l'impatto degli spostamenti quotidiani, o calcolatori di emissioni causate da uno o più viaggi aerei, o le emissioni di CO_2 associate alla realizzazione di un evento, al ciclo di vita di un prodotto, all'offerta di un servizio o ad altre attività. Raramente tali strumenti contemplano insieme la dimensione domestica e quella degli spostamenti quotidiani e il più delle volte questi mirano a promuovere azioni di compensazione, ovvero la possibilità di compensare le proprie emissioni finanziando progetti per impianti a fonti rinnovabili o progetti per la forestazione sostenibile.

L'attività di ricerca svolta da ENEA ha portato alla realizzazione di uno strumento, rivolto ai cittadini e finalizzato alla promozione di azioni di risparmio ed interventi di efficienza energetica negli usi finali.

Lo strumento, di facile interfaccia sviluppato in Excel, a partire da un set di informazioni fornite dall'utente, elabora stime su consumi energetici, spese ed emissioni per gli usi elettrici, termici e per gli spostamenti casa lavoro, ed è in grado di simulare un ampio set di azioni di efficienza e risparmio in tutti e tre gli ambiti di indagine, restituendo stime sui possibili risparmi conseguibili. Il tool, oltre ad informare l'utente sui livelli di emissione e di spesa associati ai suoi consumi energetici, è in grado di simulare una ampia serie di possibili azioni di efficienza e risparmio, corrispondenti a soluzioni tecnologiche più sostenibili e a comportamenti maggiormente virtuosi, alternativi a quelli abituali.

Il tool è articolato in tre momenti (Figura 394), cui corrispondono tipologie di informazioni e dati di natura differente:



Figura 394. Struttura del tool

- *Anagrafica dell'utenza*: all'utente viene chiesto di inserire informazioni circa il comune di residenza e la tipologia del nucleo familiare.
- *Audit energetico*: vengono richieste informazioni sul tipo di dispositivi presenti in casa e sull'utilizzo medio, sulla tipologia di abitazione e sul sistema di riscaldamento, sul percorso e veicolo adoperato per gli spostamenti casa lavoro, allo scopo di fornire stime sui consumi energetici legati agli usi elettrici, termici e spostamenti. Per ciascuna delle tre aree è fornita una stima dei consumi energetici, dei rispettivi costi di combustibile e delle emissioni di CO_2 associate, oltre ad un confronto con valori medi di riferimento.
  I consumi energetici stimati dallo strumento fanno riferimento a tre aree di intervento:
  a. usi elettrici nell'abitazione;
  b. usi termici (riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria);
  c. spostamenti casa – lavoro

- *Simulazione azioni di risparmio ed interventi di efficienza energetica*: per ciascuna delle tre aree di intervento, l'utente può simulare azioni di efficienza energetica (dalla sostituzione di elettrodomestici, interventi di ristrutturazione, cambio di veicolo per spostamenti casa lavoro), piuttosto che modifiche di comportamenti (minor utilizzo di apparecchiature, uso del trasporto pubblico locale, etc..); in riferimento a tali indicazioni lo strumento fornisce nuove stime di consumi, spesa ed emissioni annue, che vengono confrontate con la situazione di partenza, per quantificarne il possibile risparmio.

Comunicazione e diffusione delle attività IEA in materia di ricerca e innovazione tecnologica sugli usi finali dell'energia - Rapporto sul Building Coordination Group meeting

L'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), che svolge attività di analisi e studio in materia di mercato mondiale e sicurezza dell'energia, scenari, politiche e tecnologie energetiche a livello mondiale, dedica ampio spazio all'efficienza energetica e alla ricerca tecnologica, nell'ambito degli Energy Technology Initiatives o Implementing Agreements (IA):

- EBC - Energy in Buildings and Communities
- ECES - Energy Conservation through Energy Storage
- DSM - Demand Side Management
- HPP - Heat Pump Programme
- AFC - Advanced Fuel Cells
- SHC - Solar Heating and cooling
- PVPS - Photovoltaic Solar Systems.

ENEA è delegato nazionale al Comitato per le tecnologie sugli usi finali dell'energia, l'EUWP IEA, e detiene attualmente la presidenza del gruppo tematico in materia di edilizia, con il compito di facilitare la comunicazione, il coordinamento e il monitoraggio dei programmi di ricerca nel settore. Nel febbraio 2015, inoltre, su mandato del Ministero dello Sviluppo Economico, ENEA, in qualità di delegato all'EUWP, ha organizzato la prima giornata nazionale Implementing Agreement (IA) in tema Edilizia.

Le informazioni raccolte in occasione dell'evento hanno permesso di:

- specificare il contributo delle istituzioni italiane partecipanti
- descrivere attività ed esiti degli IA, individuando nuove possibilità di diffusione, promozione e uso dei risultati attraverso il confronto con i principali attori nazionali del settore
- indicare l'interazione con altri programmi europei e nazionali
- fornire un quadro del settore e di possibili scenari di innovazione in Italia.

Le schede dei progetti IEA a partecipazione italiana, redatte con il contributo degli esperti nazionali, riassumono i risultati, il potenziale impatto, le iniziative e programmi correlati, e riportano riferimenti utili per ulteriori approfondimenti. Le schede sono raccolte nel rapporto RdS/PAR2014/097. Destinatari del rapporto sono i potenziali fruitori della ricerca nel settore, indicati nelle stesse schede: in primis decisori dell'amministrazione pubblica (P.A.) ma anche rappresentanti dell'industria e del mondo scientifico e accademico, agenzie per l'innovazione, ordini professionali e associazioni dei consumatori.

Analisi e studio di modelli di valutazione dei programmi finalizzati al cambiamento del comportamentale per il risparmio e l'efficienza energetica

Nonostante venga stimato un alto potenziale di risparmio energetico derivante da programmi finalizzati al cambiamento comportamentale per il risparmio e l'efficienza energetica, la valutazione di tali programmi è ben lungi dall'essere matura.

Il lavoro di ricerca svolto ha inteso discutere lo stato delle pratiche correnti relative alla progettazione e alla valutazione tecnica dei programmi comportamentali – traendo lezioni dalla salute pubblica, marketing sociale, sostenibilità, energia e altri settori - e presentando una selezione di protocolli consigliati per i programmi comportamentali sviluppati da parte di progetti recenti.

Inoltre vengono forniti una serie di esempi di valutazione tratti dalla letteratura più recente e la loro applicazione. Particolare attenzione viene dedicata alla persistenza del comportamento nel tempo, elemento che viene spesso attualmente sottovalutata nel valutazione del comportamento.

I risultati della ricerca possono contribuire al dibattito attuale circa le *modalità di valutazione dei programmi comportamentali i*ncentivabili attraverso il meccanismo dei Titoli di Efficienza Energetica come previsto dal D.lgs 2102/2014 e nelle Linee Guida per dei TEE sottoposte recentemente a consultazione pubblica dal parte del

Ministero per lo Sviluppo Economico.

Per approfondimenti sullo studio condotto si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/098.

f. Comunicazione e diffusione dei risultati

L'energia della comunicazione: Linee guida per l'efficienza energetica nella PA

L'informazione e la creazione di consapevolezza sui temi del risparmio e dell'efficienza energetica rappresentano un elemento imprescindibile per l'efficacia delle politiche nazionali e locali. Per la costruzione di campagne e di percorsi capaci di raggiungere i diversi target presenti sul territorio, è necessario trasferire a livello periferico un know-how specifico e degli strumenti operativi che consentano di progettare, realizzare e valutare l'efficacia delle azioni di sensibilizzazione.

A tal fine si è realizzato, in collaborazione con l'Università Sapienza di Roma un manuale operativo dedicato alla PA. Il manuale presenta strumenti e tecniche di comunicazione, con specifici riferimenti alle modalità di utilizzo dei linguaggi e dei canali, adatti alla realizzazione di una campagna di sensibilizzazione efficace, riproducibile e facilmente replicabile (uno schema standardizzabile che un amministratore possa facilmente riempire di contenuti e adattare in funzione del target di riferimento e del contesto territoriale/aziendale).

E' stato redatto un documento [rapporto RdS/PAR2014/066] che si propone di sensibilizzare gli operatori/amministratori delle PA interessati ad attivare campagne di comunicazione sul risparmio energetico: in altre parole, il primo passo verso una distribuzione democratica della conoscenza riguardante l'efficienza energetica è *la sensibilizzazione dei sensibilizzatori*, amministrazioni centrali e locali, opinion leader, associazionismo e gruppi di pressione. In particolare si intende far emergere un'interpretazione dell'energia quale strumento che permetta alle comunità di esprimere il proprio potenziale economico, sociale e culturale.

Nel lavoro si è partiti dai presupposti psicologici, sociologici e normativi della comunicazione dell'efficienza energetica, per arrivare, alla rassegna di alcuni strumenti e tecniche di comunicazione, con specifici riferimenti alle modalità di utilizzo dei linguaggi e dei canali, adatti alla realizzazione percorsi di sensibilizzazione efficaci, riproducibili e facilmente replicabili (uno schema standardizzabile che l'Amministratore possa facilmente riempire di contenuti e adattare in funzione del target di riferimento e del contesto territoriale/aziendale).

Il kit operativo contiene anche dei riferimenti alle voci di spesa per consentire agli operatori di progettare un'attività di comunicazione verosimilmente coerente con i budget e con il personale a disposizione. Sono stati, inoltre, indicati alcuni strumenti funzionali alla valutazione e alla misurazione degli effetti delle strategie comunicative adottate.

Al fine di fornire agli Amministratori le competenze necessarie alla realizzazione di un'attività di comunicazione coerente con il contesto di riferimento, ma anche in vista di una continua interlocuzione con i principali stakeholder, si è scelto di fornire anche alcune indicazioni sulle metodologie di ricerca sociale. Tutto questo dovrebbe consentire, inoltre, agli operatori delle PA di definire meglio i destinatari delle campagne, da un lato, ma anche di individuare gli aspetti strategici su cui è prioritario indirizzare l'azione di sensibilizzazione, dall'altro.

Infine, il manuale non intende essere esaustivo, ma si pone come struttura aperta, da integrare con le sperimentazioni e le esperienze di chi lo utilizzerà. Solo così si potrà sfruttare pienamente la rete tra la ricerca, i saperi esperti, le istituzioni e la società in generale, puntando sulla forza aggregatrice dell'energia quale leva di identità, di senso di appartenenza e di comunità.

Il lavoro svolto all'interno della collaborazione con il Dipartimento di Comunicazione e Ricerca Sociale della Sapienza Università di Roma è descritto in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2014/066.

LINEA PROGETTUALE B. ATTIVITÀ SVOLTE PRESSO IL POLO TECNOLOGICO DEL SULCIS

Le attività hanno considerato quanto previsto nel Piano straordinario per il Sulcis e la valenza strategica che dovrà acquisire il Polo Tecnologico del Sulcis. In questa prima annualità si sono sviluppate, tramite una forte azione sinergica tra le competenze ENEA e quelle della Sotacarbo, una serie di attività per dare attuazione a quanto dovrà essere messo in campo sul tema dell'efficienza energetica degli edifici. A tal fine sono state messe a punto e testate sul campo metodologie e strumenti finalizzati alla realizzazione di interventi per l'efficienza energetica nel settore del civile nel territorio della Provincia dei Carbonia Iglesias, contribuendo alla crescita delle conoscenze del personale del Polo Tecnologico ed alla competitività delle PMI.

Nell'ambito della presente attività sono stati definiti e sviluppate metodologie, modelli e strumenti per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici, in particolare della PA, e delle prestazioni energetico -

ambientali di prodotti e componenti per l'edilizia, facendo riferimento al quadro normativo vigente europeo, nazionale e regionale in materia.

Alcuni risultati della ricerca, con il coinvolgimento della PA in particolare per gli edifici scolastici, sono stati applicati per una prima indagine sul patrimonio edilizio pubblico i cui dati saranno raccolti in un apposito database ed in un rapporto contraddistinto dalla presentazione di primi indici statistici indicatori. I risultati ottenuti potranno essere utili per la definizione strategica degli obiettivi, delle condizioni generali di sviluppo e l'attuazione dei relativi programmi nel Sulcis Iglesiente previsti nel protocollo d'Intesa- Piano Sulcis.

a.1 Realizzazione un data base degli edifici pubblici

Sviluppo della metodologia di indagine. Realizzazione di schede tecniche moduli per la formazione del personale Sotacarbo per la creazione di un primo data base degli edifici pubblici insistenti sul territorio del Sulcis

Il lavoro svolto ha avuto lo scopo di fornire un modello per sviluppare ed applicare azioni e tecnologie per affrontare il tema dell'efficientamento energetico degli edifici.

È stato prodotto un documento, sotto forma di guida, in cui sono raccolte procedure e criteri finalizzati alla definizione di un percorso metodologico che partendo dalla conoscenza del contesto in cui si opera e delle tecnologie utilizzabili definisce l'approccio metodologico da seguire per poter programmare interventi e creare una banca dati degli edifici degli edifici pubblici, dal punto di vista di efficienza energetica. In tal senso sono analizzate tecnologie e sistemi, che tengono conto anche delle fonti rinnovabili, da applicare agli edifici per il miglioramento dell'efficienza energetica.

Per avviare la fase di conoscenza del parco immobiliare e acquisire i dati necessari per la creazione della banca dati è stata messa a punto una scheda di indagine. La scheda contiene le informazioni specifiche sulla caratterizzazione del sistema edificio impianto e sui consumi energetici, elettrici e termici.

Quanto prodotto nel quadro di questa attività è descritto nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/100.

Realizzazione di un data base degli edifici pubblici insistenti sul territorio del Sulcis: caratterizzazione edifici e indicatori statistici

Gli obiettivi generali dell'attività sono rivolti, in questa prima fase, alla caratterizzazione del patrimonio edilizio pubblico della Regione Sardegna, con particolare riferimento allo sviluppo di una metodologia per interventi di efficienza energetica in edifici vincolati nel territorio dell'ex Provincia del Sulcis Iglesiente.

Lo studio ha analizzato lo stato del patrimonio edilizio scolastico dell'ex Provincia di Carbonia Iglesias sulla base di una campagna di raccolta di dati sperimentali realizzata con la collaborazione delle amministrazioni locali. Da un punto di vista costruttivo sono state analizzate l'epoca di costruzione e alcune caratteristiche geometriche significative, tra cui: la superficie complessiva, il numero di piani, l'altezza d'interpiano, le tipologie della copertura e la struttura dell'edificio. E' stato inoltre richiesto ai tecnici delle amministrazioni, una valutazione sullo stato di conservazione complessivo. Altre informazioni specifiche hanno riguardato infissi e finestre, gli impianti a servizio degli stabili quali caldaie e sistemi di produzione di energia elettrica. L'analisi è stata portata a termine con l'indicazione dei consumi energetici per edificio.

Altro dato interessante, ai fini energetici, è la disponibilità di superfici per l'installazione di impianti di pannelli fotovoltaici. Anche se per tali impianti la maggiore produzione di energia elettrica avviene nei mesi estivi, la loro installazione alleggerirebbe la bolletta elettrica della scuola. Interventi in tale ambito richiedono un dettaglio di approfondimento in termini di verifica di tenuta, orientamento dei tetti, ed eventuali vincoli sugli edifici storici.

Nel suo insieme il censimento ha evidenziato il rilevante potenziale di risparmio energetico connesso a possibili interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare scolastico dell'ex Provincia del Sulcis Iglesiente. Il retrofit energetico del patrimonio edilizio scolastico analizzato potrebbe, di fatti, garantire edifici energeticamente efficienti, con riduzione dei costi di esercizio, di manutenzione.

Dettagli sull'attività svolta sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2014/101 e relativo allegato.

a.2 Metodologia di analisi del sistema edificio/impianto per l'efficientamento energetico di edifici vincolati

Nello svolgimento dell'attività sono stati analizzati obiettivi e procedure di diagnosi energetiche finalizzate alla riqualificazione energetica degli edifici della Pubblica Amministrazione. Si considera quanto sta avvenendo in merito agli sviluppi, a livello normativo e, in modo particolare, l'evoluzione che la materia sta riscontrando in relazione alle misure di incentivazione ed agli obblighi che gli edifici della Pubblica Amministrazione devono

ottemperare.

Accanto ai riferimenti normativi, viene analizzato il concetto di diagnosi energetica con le varie fasi che ne caratterizzano lo sviluppo; successivamente sono evidenziati i principali obiettivi e le differenze tra diagnosi e certificazione energetica. In Tabella 120 si riporta un quadro di sintesi, certamente non esaustivo, delle più comuni problematiche relative all'edificio e agli impianti installati ed i possibili interventi correttivi.

Tabella 120. Problematiche legate all'edificio e agli impianti installati e possibili interventi di energy saving

		PROBLEMATICHE	POSSIBILI INTERVENTI DI ENERGY SAVING
EDIFICIO		ASSENZA DI ISOLAMENTO O ISOLAMENTO INSUFFICIENTE	ISOLAMENTO DELLE SUPERFICI OPACHE
		INFISSI A VETRO SINGOLO	SOSTITUZIONE DEGLI INFISSI 0 DEI SOLI COMPONENTI VETRATI
		ESPOSIZIONE SOLARE SFAVOREVOLE ALLA CLIMATIZZAZIONE ESTIVA	UTILIZZO DI SCHERMATURE
		ELEVATA ALTEZZA DEI LOCALI CLIMATIZZATI	UTILIZZO DI CONTROSOFFITTATURE
IMPIANTI	IMPIANTO TERMICO	RIVESTIMENTO ISOLANTE INSUFFICIENTE PER TUBAZIONI E COLLETTORI	RINFORZO O RIFACIMENTO DEL SISTEMA ISOLANTE
		ECCESSIVA TEMPERATURA DEI PRODOTTI DI COMBUSTIONE AL CAMINO	ADOZIONE DI SISTEMI DI RECUPERO DEL CALORE SENSIBILE DEI FUMI
		IMPIANTO DI COMBUSTIONE SOVRADIMENSIONATO RISPETTO ALLA POTENZA DEL GENERATORE	SOSTITUZIONE DEI BRUCIATORI POCO EFFICIENTI
		RENDIMENTO TERMICO RIDOTTO	SOSTITUZIONE DEL COMBUSTIBILE
		GENERATORI IN NUMERO LIMITATO E DI POTENZA SOVRADIMENSIONATA	SOSTITUZIONE GENERATORI PER NUMERO, TIPO, POTENZA, RENDIMENTO
	ACS	ASSENZA DI UN SISTEMA DI REGOLAZIONE AUTOMATICA DELLA TEMP. DI MANDATA DELL'ACS O INADEGUATA TARATURA DELLO STESSO	ADOZIONE DI EFFICIENTI SISTEMI DI REGOLAZIONE AUTOMATICA DELLA TEMPERATURA DI MANDATA
		INSUFFICIENTE ISOLAMENTO DEL SERBATOIO E DELLE TUBAZIONI	REVISIONE DELL'ISOLAMENTO DEL SERBATOIO E DELLE TUBAZIONI
		INSUFFICIENTE CAPACITÀ DEL SERBATOIO DI ACCUMULO	INSTALLAZIONE DI UN ALTRO SERBATOIO DI ACCUMULO
	DISTRIBUZIONE	INSUFFICIENTE RIVESTIMENTO ISOLANTE	REVISIONE DEL RIVESTIMENTO ISOLANTE DI TUTTE LE RETI
	SISTEMI DI REGOLAZIONE E CONTROLLO	INSUFFICIENTE CONTROLLO A LIVELLO LOCALE	ADOZIONE DI DISPOSITIVI DI REGOLAZIONE SUI CORPI SCALDANTI (Sensori di controllo, Valvole termostatiche, Controller sui ventilatori) ADOZIONE DI DISPOSITIVI DI REGOLAZIONE SULLA DISTRIBUZIONE (Valvole a due vie, Valvole a tre vie
		INSUFFICIENTE CONTROLLO E REGOLAZIONE A LIVELLO DI CENTRALE TERMICA	ADOZIONE DI SISTEMI DI REGOLAZIONE SUI GRUPPI DI GENERAZIONE E DISTRIBUZIONE IN CENTRALE TERMICA (Controlli " in Cascata" dei generatori, Sonde climatiche, Sistemi a Inverter, Pompe di circolazione a giri variabili)
	CONDIZIONAMENTO	DISSIPAZIONE DI UN'ECCESSIVA QUANTITÀ DI ENERGIA TERMICA CON L'ESTRAZIONE DELL'ARIA	INSTALLAZIONE DI SISTEMI DI RECUPERO ARIA-ARIA PER IL RIUTILIZZO DELL'ENERGIA TERMICA PERDUTA CON L'ARIA ESPULSA
		FUNZIONAMENTO AL MASSIMO CARICO ANCHE IN ORARI DI MANCATA UTILIZZAZIONE DEI LOCALI	APPLICAZIONE DI TIMER E DI MOTORI A DOPPIA POLARITÀ PER IL COMANDO DEI VENTILATORI NELLE ZONE A OCCUPAZIONE PREVEDIBILE
		SQUILIBRIO TRA CONDIZIONI AMBIENTE RAGGIUNTE IN ZONE SERVITE DALLO STESSO CIRCUITO	ZONIZZAZIONE DELL'ALIMENTAZIONE DEI CIRCUITI CHE SERVONO AREE CON CARATTERISTICHE DIVERSE

ENEA ha quindi effettuato l'analisi energetica su un complesso edilizio di pregio architettonico, l'Istituto Universitario Europeo di Badia Fiesolana.

L'attività svolta è descritta nel rapporto RdS/PAR2014/086.

Applicazione della metodologia di analisi del sistema edificio/impianto per l'efficientamento energetico di edifici vincolati

La normativa in materia energetica, in continua evoluzione, si è fatta molto stringente in questi ultimi anni e, come diretta conseguenza, gli edifici di nuova costruzione sono energeticamente efficienti e spesso ricorrono a fonti energetiche rinnovabili. La tendenza negli anni a venire di riduzione di nuove costruzioni, pone l'attenzione sul

patrimonio edilizio esistente. Un passo in questa direzione è già stato messo in opera, in quanto la normativa energetica include gli edifici esistenti, oggetto di ristrutturazione, nel suo ambito di applicazione. In questo modo tali costruzioni possono essere adeguate alle attuali esigenze, con prevedibili conseguenze positive sia in termini economici che ambientali.

Quindi, mentre per ciò che riguarda il retrofit energetico degli edifici del secolo scorso le prescrizioni e i requisiti imposti sono chiari, la strada che porta agli edifici storici, perlopiù oggetto di vincoli architettonici, è stata ancora poco battuta e, al momento, il problema è stato affrontato facendo quasi esclusivamente riferimento al concetto di "deroga". Infatti, far rientrare nel progetto di restauro il miglioramento dell'efficienza energetica può essere un ulteriore passo per la conservazione dell'edificio, comporta la necessità di affrontare una serie di problemi aggiuntivi, le cui soluzioni al momento non sono totalmente individuate. Concentrarsi sugli edifici storici è da sempre un ambito che pone forti limitazioni, ma è necessario superare la visione puramente conservativa optando per un approccio che ricorra a soluzioni "tipo", sfruttando anche i continui progressi della tecnologia.

È importante sottolineare che l'efficientamento energetico è un fondamentale passo da compiere per la conservazione del costruito storico, capace di favorirne la fruizione grazie ad una progettazione attenta non solo ai caratteri tecnologici impiantistici, ma anche alle antiche tipologie edilizie, alle tecniche costruttive storiche e ai materiali della tradizione.

Come caso studio è stato preso in esame un edificio storico del Centro Ricerche Sotacarbo. L'edificio, facente parte del complesso della Grande Miniera di Serbariu costruito tra il 1938 e il 1939, e riattato nel 2002, sorge all'interno dell'ex Magazzino Materiali ed è considerato un edificio identitario soggetto pertanto a vincoli definiti dalla Sovrintendenza. L'opportunità di realizzare l'analisi, presso la propria sede, ha permesso quindi di individuare le soluzioni tecniche e impiantistiche per il suo efficientamento, tenendo presente le limitazioni di intervento derivanti dalla caratteristica identitaria dello stabile.

Lo studio condotto da Sotacarbo è descritto nel rapporto RdS/PAR2014/264.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito (ABC)
(rif. Obiettivo b)

Le attività svolte dal Dipartimento ABC hanno riguardato la stesura di linee guida per l'analisi dei dati di assorbimento elettrico di edifici del terziario pubblico, con riferimento alla metodologia sviluppata per il parco edilizio del Politecnico di Milano.
La metodologia di analisi delle letture dei dati di assorbimento elettrico disponibili per gli edifici del Politecnico di Milano, messa a punto nel precedente PAR, era stata sviluppata al fine di individuare eventuali criticità nella gestione degli immobili ed ha consentito di implementare un set di indicatori di reale assorbimento elettrico, rappresentativi di edifici-tipo del terziario pubblico, disaggregati per diverse utenze (circuiti luce e forza motrice, generazione frigorifera, ventilazione, ecc). La metodologia di indagine è stata implementata, con ulteriori annualità di dati disponibili per il parco edifici del Politecnico, e tradotta in linee guida cui altre realtà di gestione patrimoniale pubblica potranno fare riferimento.

Politecnico di Torino - Dipartimento di Energia *(rif. Obiettivi a, b, d)*

Le attività hanno riguardato i seguenti temi: la definizione dei parametri energetici da utilizzare per la metodologia comparativa, prevista dalla Direttiva 32/20107CE, per la valutazione degli standard nazionali per la certificazione energetica degli edifici previsti dal quadro normativo vigente tenendo conto anche del parametro costi/benefici; le potenzialità di impiego dei modelli inversi per lo studio dei consumi energetici e l'influenza del comportamento degli occupanti sui consumi stessi, con modelli predittivi diretti che indiretti (data-driven), al fine di identificare e valutare l'efficacia di misure per l'efficienza energetica; lo sviluppo di uno strumento per la verifica degli obiettivi da raggiungere e delle politiche di risparmio energetico applicate alla scala di territorio e di grande patrimonio edilizio; sviluppo ed analisi di involucri trasparenti a carattere dinamico e adattativo tramite l'integrazione di Phase Change Materials in elementi schermanti, ai fini della riduzione della domanda energetica per raffrescamento e illuminazione artificiale.

Università di Catania, Dipartimento di Ingegneria Industriale *(rif. Obiettivo a)*

L'obiettivo dell'attività è stato lo sviluppo di una metodologia di calcolo dinamico per la certificazione energetica degli edifici (residenziali e non) in regime invernale ed estivo e la realizzazione del relativo SW di calcolo. Premesso

che esiste una normativa tecnica (UNI EN ISO 13790) in cui è riportato un metodo di calcolo dinamico orario semplificato, la prima parte dell'attività ha riguardato l'analisi della suddetta norma al fine di verificare se il metodo proposto è applicabile, integralmente o parzialmente, per la certificazione dinamica degli edifici; è stato poi proposto un metodo alternativo di calcolo.Il metodo proposto consente di ottenere con relativa facilità risultati dinamici di grande interesse e con informazioni anche sulla variabilità oraria delle grandezze calcolate (temperatura di superfice, temperatura di massa e flussi termici sensibili e latenti). Inoltre il metodo consente di tenere in conto anche della nuova Proposta di Norma del CT n. 102 sul "Calcolo del comportamento degli edifici in regime termico non stazionario"..

Università di Roma Tre, Dipartimento di Economia *(rif. Obiettivo b)*

Obiettivo dell'attività è stato lo sviluppo di una metodologia di analisi per valutare gli impatti occupazionali nel settore dell'efficienza energetica per il settore residenziale con particolare riferimento alla green economy. Le attività sono state indirizzate in modo da definire i settori coinvolti nel campo dell'efficienza energetica degli edifici residenziali, il quadro di riferimento allo stato attuale i criteri/fattori da utilizzare per poter creare una prima banca dati di riferimento sugli aspetti occupazionali. Le attività hanno definito la metodologia, necessaria per creare una banca dati e ottenere una prima valutazione ex-post.
Dall'analisi descrittiva e dai risultati dell'indagine econometrica risulta evidente come il miglioramento dell'efficienza energetica a livello nazionale possa portare a guadagni sui livelli di occupazione con un orizzonte temporale di media durata e non legati a dinamiche puramente congiunturali.

Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni
(rif. Obiettivo a)

Nelle precedenti annualità ENEA e il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni dell'Università di Pisa, è stata elaborata una metodologia per la diagnosi energetica degli edifici ed è stato creato un software di simulazione energetica dotato di interfaccia grafica, dedicato agli edifici ad uso residenziale, uffici, scuole, degenze ospedaliere e alberghi. SEAS (Software Energetico per Audit Semplificati), disponibile gratuitamente nella versione 3.0, è in grado di calcolare i fabbisogni energetici relativi ai servizi di riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione ed altre utenze elettriche, nonché di stimare i risparmi energetici ed economici ottenibili attraverso opportuni interventi di riqualificazione. Il software ha suscitato un notevole interesse, essendo stato scaricato da circa trentamila professionisti.
Durante questa annualità lo sviluppo del modello di diagnosi energetica degli edifici è proseguito, per renderlo uno strumento ancora più flessibile e in grado di rispondere nel migliore dei modi alle esigenze del territorio e del mercato. Inoltre è stato realizzato un corso on line per facilitare l'utilizzo del SEAS e si è attivato un servizio di FAQ per rispondere alle richieste di chiarimenti e di aiuto nell'applicazione del SW.

Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici
(rif. Obiettivi a)

La collaborazione con l'Università di Palermo prevedeva attività relative allo sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia e di modelli per la quantificazione del potenziale del Ventilative Cooling nell'edilizia.
Relativamente alla prima tematica è stata svolta l'analisi delle principali metodologie di calcolo dell'energia incorporata nei materiali e nelle tecnologie energetiche, riferiti prevalentemente al sistema edificio-impianto e allo stato dell'arte sull'energia incorporata negli edifici. La prima fase dell'attività ha riguardato l'analisi degli studi disponibili in letteratura sulle metodologie per la quantificazione dell'energia incorporata, ovvero l'energia spesa durante le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili, di trasporto, di costruzione, di manutenzione e demolizione. Si è proceduto, quindi, con l'analisi dello stato dell'arte sull'energia incorporata negli edifici che è strettamente connessa al ciclo di vita dei materiali e dei componenti edili adoperati. In particolare, è stato esaminato un campione di studi di letteratura da cui sono stati selezionati e analizzati una serie di casi studio.
Per quanto riguarda la seconda tematica è stata svolta un'analisi dei principali software e pacchetti di modellizzazione utilizzati in letteratura per stimare l'incidenza del "Ventilative Cooling" nelle strategie di efficientamento energetico degli edifici. I tool e i modelli analizzati sono stati differenziati sia nelle capacità di modellizzazione (da semplici formulazioni empiriche a complessi ambienti di simulazione dinamica) che nella qualità degli input richiesti dall'analista, sia nell'applicabilità degli stessi a differenti stadi del design. Sono stati, altresì, analizzati gli indicatori di prestazione e applicabilità del "*ventilative cooling*" in funzione di alcuni parametri meteo- climatici.

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Energetica ed Elettrica - DIAEE
(rif. Obiettivi a, b, c)

Le attività DIAEE sono inserite in tre obiettivi distinti. Nel quadro dell'*obiettivo a,* le attività hanno riguardato l'analisi dell'applicazione dei sistemi di Home e Building Automation (HBA) negli edifici ad uso residenziale e non residenziale, con l'obiettivo di valutarne l'impatto in termini di prestazione energetica, anche in presenza di soluzioni evolute tecnologicamente e con presenza di accumulo.
Nell'ambito dello stesso obiettivo è stata svolta un'analisi energetica relativa alla valorizzazione e all'efficientamento degli edifici di grandi dimensioni, anche di pregio, in uso alla P.A. tramite l'ideazione di un sistema di distribuzione del vettore gas con sistema " plug and play " unito allo sviluppo di componenti per lo smart metering del medesimo vettore.
Nell'*Obiettivo b* è stata condotta un'indagine sui consumi e sugli interventi di risparmio energetico nei centri sportivi. Lo scopo finale del lavoro era quello di definire un metodo matematico di previsione dei consumi valido per i centri sportivi di tutte le dimensioni, è stata quindi verificata l'applicabilità del metodo di previsione dei consumi energetici sviluppato, nelle precedenti annualità, per grandi e medi centri sportivi ad impianti di piccole dimensioni.
Nell'*Obiettivo c* è stata condotta un'a nalisi critica a per l'individuazione di metodi alternativi per il calcolo del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di illuminazione naturale.

Università Sapienza di Roma, Centro Ricerche C.I.T.E.R.A *(rif. Obiettivo b)*

Le attività, in considerazione da quanto svolto nelle precedenti annualità, sono state finalizzate alla sviluppo di una procedura per una certificazione di tipo ambientale (oggi volontaria) degli edifici, a completamento della certificazione energetica obbligatoria, affrontando problematiche legate all'impatto ambientale e alla qualità degli edifici, senza trascurare il considerevole dispendio energetico relativo alle filiere produttive dei materiali da costruzione e degli impianti. Partendo dall'evidenziazione di alcune significative problematiche in essere che necessitano una risoluzione s'intende passare dall'attuale fase volontaristica/premiale ad una proposta integrativa al fine di renderla più cogente diffondendo i benefici di una certificazione complessa e globale alla totalità degli edifici pubblici.

Università Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria *(rif. Obiettivo a)*

Le attività hanno riguardato l'analisi delle strategia di raffrescamento passivo mediante ventilazione e il modo in cui il clima urbano, ossia l'innalzamento della temperatura dell'aria in funzione delle caratteristiche del costruito, interferisce con le potenzialità di tale strategie.
E' stata implementata una procedura di analisi numerica per valutare le potenzialità della ventilazione naturale e meccanica su scala di edificio. A tal fine sono stati realizzati alcuni modelli di strutture con possibilità di modificarne le prestazioni dell'involucro e della geometria degli ambienti al fine di quantificare l'influenza che la ventilazione naturale ha sul fabbisogno energetico.
Lo studio ha tenuto conto dei precedenti modelli di edificio inseriti in un contesto urbano, considerando quindi l'alterazione delle condizioni termo-igrometriche esterne legate all'urbanizzazione rispetto ai dati climatici di riferimento e il conseguente impatto sulle strategie di ventilazione.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali *(rif. Obiettivo a)*

Lo studio, svolto nel quadro della collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche, si poneva l'obiettivo di analizzare l'impiego della fonte solare termica con accumulo stagionale e della fonte fotovoltaica, anch'essa dotata di accumulo, accoppiate a sistemi a pompa di calore per verificarne i risultati in termini energetici e la fattibilità in termini economici. Ciò, nell'ottica di realizzare edifici nZEB così come definiti nel decreto attuativo della Legge 90/13.

Università Sapienza di Roma - Dipartimento di Comunicazione e Ricerca Sociale *(rif. obiettivo f)*

Con le competenze del Dipartimento di Comunicazione e Ricerca Sociale dell'Università la Sapienza di Roma, si è messo a punto un manuale per la sensibilizzare gli operatori/amministratori delle PA interessati ad attivare campagne di comunicazione e sensibilizzazione sul risparmio energetico. Nel manuale sono presentati strumenti e tecniche di comunicazione, con specifici riferimenti alle modalità di utilizzo dei linguaggi e dei canali, adatti alla realizzazione di una campagna di sensibilizzazione efficace, riproducibile e facilmente replicabile (uno schema standardizzabile che l'Amministratore possa facilmente riempire di contenuti e adattare in funzione del target di riferimento e del contesto territoriale/aziendale).

Università IUAV di Venezia, Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi
(rif. Obiettivo d)

Le attività di ricerca, svolte nell'ambito della collaborazione tra ENEA e l'Università IUAV di Venezia, sono rivolte al miglioramento del comportamento energetico del sistema edificio- impianto, vengono presi in considerazione elementi di involucro innovativi e la loro integrazione nel bilancio energetico dell'edificio. Più specificamente vengono caratterizzati sistemi produttori di energia da fonti rinnovabili di tipo fotovoltaico applicati sull'involucro edilizio (BIPV, Building Integrated Photo-Voltaic).
La ricerca considera le tecnologie più concretamente applicabili nel contesto della progettazione delle residenze e degli edifici del terziario anche proponendo soluzioni progettuali modulari e adattive da applicare in contesti climatici e sociali differenti.

Come previsto dal Piano Annuale di Realizzazione 2014, sono stati avviati dei contratti di ricerca con alcuni operatori per la compiuta esecuzione delle attività, in particolare:

Centro Ricerche CRESME *(rif. Obiettivo b)*

Il CRESME ha continuato l'attività di ricerca ed indagine per la definizione del parco immobiliare pubblico (scuole e uffici) e la valutazione dei relativi consumi energetici. È stata definita la consistenza degli edifici di queste destinazioni d'uso, ne è stata caratterizzata la distribuzione sul territorio, le caratteristiche tipologiche costruttive ed impiantistiche e i consumi energetici da bolletta. Lo studio ha fornito dati e caratteristiche degli edifici necessarie per definire l'edificio tipo richiesto dalla Direttiva 31/2010/CE per l'applicazione della metodologia comparativa.

Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia FIRE *(rif. Obiettivo b)*

La FIRE ha sviluppato una ricerca finalizzata allo sviluppo di un modello per promuovere il teleriscaldamento nell'ambito dell'amministrazione pubblica. Obiettivo della ricerca è stato quello di analizzare i risultati conseguiti attraverso l'installazione di valvole termostatiche presso differenti tipologie di edifici adibiti ad uso prevalentemente residenziale e commerciale in comuni serviti da reti di teleriscaldamento, in zone climatiche E ed F, anche al fine di fornire utili indicazioni agli utenti e ai gestori di patrimoni immobiliari.
Tale attività deriva dal fatto che il teleriscaldamento è una delle soluzioni promosse in modo deciso dalla direttiva 2012/27/UE, che contestualmente chiede alla Pubblica Amministrazione di giocare un ruolo centrale nell'efficienza energetica, non solo promuovendo adeguato strumenti di regolazione e pianificazione, ma soprattutto realizzando interventi di riqualificazione energetica del parco edifici.

Comitato Termotecnico Italiano, CTI *(rif. Obiettivo a)*

Il CTI ha svolto una ricerca per la riqualificazione degli edifici della PA con un particolare interesse per l'edificio "NEZB" e per interventi ad alta efficienza con prestazioni ottimali, ovvero quelle prestazioni caratterizzate da costi totali minimi (investimento e installazione, più manutenzione, più gestione). A tale fine è stato sviluppato un metodo di calcolo del costo dell'energia risparmiata (CCE, espresso in €/kWh) tenendo conto sia del costo della fonte energetica di riferimento (di solito il gas naturale), sia degli investimenti richiesti dall'adozione dei singoli interventi, sia delle condizioni climatiche.
Il programma di calcolo, che consente il calcolo del CCE per diverse strutture edilizie e per diverse tipologie di intervento, contiene una banca dati completa su caratteristiche dei componenti più diffusi (chiusure opache e trasparenti), tenendo conto anche dei periodi storici e una banca dati degli interventi di riqualificazione (costi e caratteristiche tecniche). Il programma, sulla base degli input forniti (tipo di struttura di partenza, località e tipo di intervento di riqualificazione), calcola il CCE permettendo di stabilire in modo rapido la configurazione che giustifica i costi richiesti. La ricerca comprende anche un "atlante" per la scelta immediata degli interventi di riqualificazione degli edifici.

Stazione Sperimentale del Vetro *(rif. Obiettivo e)*

Le attività hanno portato a sviluppare un calcolatore per la determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate. Il calcolatore, che implementa le equazioni della norma EN 410:2011-vetro per l'edilizia. È stato rivisto il codice di calcolo WINSHELTER, con l'aggiornamento del data base dei componenti di calcolo con nuovi vetri, l'aggiunta nel modulo di calcolo secondo la EN 13363-2, della classe prestazionale come definita nella UNI 14501 e l'implementazione di un sistema semplificato per la generazione di elementi vetrati o schermanti a partire da file di testo contenenti dati spettrali.

Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Lo scenario nel quale s'inquadra il presente progetto vede un aumento della produzione energetica mondiale a costi via via crescenti e un sempre più forte impatto sull'ecosistema a livello mondiale dell'inquinamento e dei cambiamenti climatici connessi con le tecnologie di produzione dell'energia attualmente utilizzate. In particolare, il consumo di fonti primarie, quali i combustibili fossili, gasolio e gas metano, per il riscaldamento e la climatizzazione, impone una riflessione per la tutela e la preservazione dell'ambiente per le generazioni future, oltre che per i rilevanti costi connessi.

L'obiettivo del progetto è principalmente quello di incrementare il livello di sostenibilità energetica del comparto residenziale, intendendo con il termine sostenibilità energetica la produzione e lo sfruttamento dell'energia in modo da consentire un miglioramento ambientale e socio-economico sia per la singola utenza, sia per il sistema (produttivo e utilizzatore) globale.

A livello quantitativo, il comparto residenziale è responsabile del 40% del consumo energetico globale nell'Unione Europea (secondo la Direttiva Europea 2010/31/UE del 19 maggio 2010). Per questo motivo, come riportato nella medesima Direttiva, "la riduzione del consumo energetico e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia costituiscono misure importanti e necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Unione e le emissioni di gas ad effetto serra".

Un'ulteriore problematica legata alle richieste energetiche del comparto residenziale risiede nella crescente proliferazione di impianti di condizionamento dell'aria in tutti i paesi industrializzati. Questo, come ancora riportato nella direttiva succitata, "pone gravi problemi di carico massimo, (in particolare nel periodo estivo, quando più in generale, aumentano anche le necessità di alimentazione della catena del freddo) che causano un incremento del costo dell'energia elettrica ed uno squilibrio del bilancio energetico". Per ridurre tali problematiche, oltre agli interventi suggeriti dalla Direttiva citata, finalizzati al miglioramento delle prestazioni termiche degli edifici durante il periodo estivo, si deve promuovere un uso razionale e maggiormente responsabile delle fonti energetiche (rinnovabili e non) disponibili.

Per questi motivi, si è deciso di indirizzare il presente progetto verso l'approfondimento di quelle attività teoricamente in grado di ridurre al minimo il contributo delle fonti energetiche tradizionali per il riscaldamento degli ambienti, per il raffrescamento degli stessi e per la produzione di acqua calda sanitaria, massimizzando invece il ricorso alle fonti energetiche di tipo rinnovabile.

In linea generale, seguendo quanto proposto nella ASHRAE Green Guide (2006) si possono indicare le seguente linee guida per la realizzazione di una catena energetica di tipo sostenibile:

- efficiente sfruttamento delle risorse naturali non rinnovabili, del suolo, dell'acqua e sfruttamento delle energie rinnovabili in sito in modo da ottenere un consumo netto di energia nullo o comunque la minimizzazione del consumo di risorse naturali;
- minimizzazione delle emissioni che impattano negativamente sugli ambienti confinati in cui viviamo e sull'atmosfera del pianeta (il particolato aerodisperso, le piogge acide e tutte le emissioni che influiscono sulla qualità dell'aria interna, sull'effetto serra e sul riscaldamento globale);
- minimizzazione dello scarico di rifiuti solidi e liquidi (scarti, rifiuti domestici, liquami e acque meteoriche) e contenimento delle infrastrutture necessarie per la loro rimozione;
- minimizzazione dell'impatto negativo sugli ecosistemi locali;
- massimizzazione della qualità degli ambienti confinati (in particolare qualità dell'aria e comfort termico).

Uno dei propositi di questo progetto è quindi quello di mostrare come un utilizzo appropriato delle fonti di energia rinnovabile disponibili e l'adozione di sistemi produttivi integrati, in grado di sfruttare in maniera ottimale tutti i flussi termici prodotti, possa soddisfare i punti sopra indicati consentendo di ottenere i desiderati risultati di risparmio, efficienza energetica e salvaguardia ambientale.

Diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico si sono quindi focalizzate sullo studio di processi per il condizionamento degli edifici basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (solar heating and cooling) o comunque fonti di energia alternative. Questo perché, come già evidenziato, le tecnologie

tradizionalmente utilizzate per il condizionamento invernale ed estivo (sistemi a compressione con motori elettrici) sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici, nonostante negli ultimi anni i valori di COP (*Coefficient Of Performance*) ed EER (*Energy Efficiency Ratio*) delle pompe di calore invertibili siano di molto migliorati.

L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda di climatizzazione con la disponibilità di energia solare.

Lo sviluppo delle tecnologie di solar heating & cooling ed il raggiungimento di elevati livelli di produttività ed affidabilità può peraltro consentire l'impiego di tali sistemi anche in ambito industriale, laddove sia richiesta una produzione di calore di processo a media temperatura.

Considerato che nel settore residenziale le tecnologie di solar heating & cooling abbinate anche ad interventi di retrofit energetico sugli edifici hanno già evidenziato la loro validità dal punto di vista energetico-ambientale, un settore nel quale risulta importante sperimentare l'efficacia di tali tecnologie innovative è quello dell'abbinamento dei sistemi solari a grossi impianti di refrigerazione ad assorbimento che già caratterizzano il settore terziario e commerciale per quanto riguarda la produzione di freddo per vari usi. Infatti, tali macchine che ricorrono al calore come fonte energetica di alimentazione, risultano particolarmente adatte ad essere impiegate nel caso in cui siano disponibili cascami di calore a basso costo (sistemi cogenerativi, calore di scarto da processi industriali) o fonti energetiche rinnovabili di tipo termico quali appunto le tecnologie solari a bassa e media temperatura.

L'evoluzione tecnologica ha permesso inoltre di sviluppare pompe di calore con efficienze doppie rispetto a quanto prodotto negli ultimi 10 anni, che si concretizzano in consumi di energia elettrica dimezzati. Oggi anche la pompa di calore è divenuta una tecnologia matura, che si evolve in soluzioni sempre più efficienti come l'utilizzo della tecnologia ad inverter. Lo sviluppo di pompe di calore in grado di garantire elevati COP in funzionamento invernale ed elevati EER in funzionamento estivo consente un abbattimento dei costi di esercizio anche del 50% rispetto ad impianti tradizionali.

L'utilizzo della pompa di calore permette di soddisfare responsabilmente il comfort richiesto negli ambienti serviti in termini di riscaldamento, raffreddamento e produzione di acqua calda sanitaria. La pompa di calore preleva direttamente dall'ambiente circa il 75% dell'energia necessaria al comfort utilizzando solo il 25% dalla rete elettrica. Il basso consumo di energia elettrica garantisce una riduzione delle emissioni di CO_2 fino al 60% rispetto ai sistemi tradizionali basati sull'uso di combustibili fossili.

Le pompe di calore utilizzano direttamente l'energia fornita dal sole ed accumulata nell'aria, nell'acqua e nel suolo, senza nessuna emissione diretta in atmosfera e nessun utilizzo di combustibile fossile. Il calore fornito dal sole è, infatti, una fonte pulita ed inesauribile, rendendo la pompa di calore una fonte rinnovabile, riconosciuta come tale dalla direttiva europea RES "Renewable Energy Source".

Contestualmente alla climatizzazione elio-assistita, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura rappresentano un settore che può contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità (*CHP - Combined Heat Power*) che consentirebbero un uso più efficiente dell'energia. In quest'ambito, una delle soluzioni tecnologiche più promettenti da indagare e sviluppare è rappresentata dai sistemi integrati co- e tri-generativi di piccola taglia alimentati da fonti rinnovabili ed in particolare da energia solare, mediante collettori a concentrazione da abbinare a micro-impianti a fluido organico (ORC) per la produzione congiunta di calore/freddo ed elettricità. La scelta della tecnologia solare a concentrazione più idonea per tale tipologia di applicazione, si baserà sul livello di temperatura di progetto dell'impianto per cui potranno essere presi in considerazione sia concentratori basati su ottiche "non-imaging" del tipo a CPC o su concentratori parabolici lineari o a lenti di Fresnel.

Il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, attuazione della direttiva europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, impone che nel caso di *edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti*, gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e delle seguenti percentuali della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento:

- il 20 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- il 35 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- il 50 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017.

Gli unici generatori in grado di rispettare i dettami del D.Lgs sono le pompe di calore elettriche a compressione, le pompe di calore alimentate a gas (sia a compressione che ad assorbimento), le caldaie a biomassa e gli impianti di solar heating and cooling.

Non esiste una sola tecnologia che sia sempre la migliore in qualsiasi situazione: la località di installazione, la destinazione d'uso, il tipo di edificio, la superficie da servire ed il numero di ore annue di accensione degli impianti determinano la scelta tra le diverse tecnologie presenti sul mercato.

Per valutare e rendere più performanti le diverse tecnologie emergenti sono state realizzate presso i Centri Ricerche ENEA di Casaccia e di Trisaia alcune facility di prova dei vari componenti d'impianto (es. pannelli solari termici, scambiatori di calore, sistemi di dissipazione passiva, etc.) ed alcuni impianti pilota di tipo sperimentale a servizio di utenze reali o simulate. Il prodotto di queste attività di ricerca è quindi lo sviluppo di un ventaglio di soluzioni valide e performanti che tengono conto delle zone climatiche dove le stesse amplificano i vari punti di eccellenza di ciascuna tecnologia. L'energia elettrica, abbinata e non all'energia resa disponibile dal sole, può quindi essere un'ottima alternativa ai combustibili fossili che in alcuni casi possono del tutto essere sostituiti dall'accoppiamento di questi due tipi di energia.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività sulla climatizzazione innovativa si sviluppa su due linee di attività fondamentali, concentrando gli sforzi e le risorse verso la realizzazione di laboratori e lo sviluppo di componenti innovativi:

- la prima linea è quella dello sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO_2, sistemi desiccant, pompe di calore geotermiche. A questo scopo si realizzano impianti prototipali, laboratori di qualificazione e si assicura la partecipazione a network di ricerca internazionali (IEA);
- la seconda linea di attività riguarda l'integrazione del sistema di climatizzazione, cioè la costruzione di sistemi integrati che possano essere robusti e competitivi assolvendo l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale e della produzione di acqua calda sanitaria. In questo contesto si sviluppano: sistemi integrati pilota e dimostratori dove tali sistemi sono integrati nell'edificio; sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e tele-diagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Le attività di ricerca sono state suddivise in quattro differenti obiettivi:

a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi;
b. Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura;
c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione;
d. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

L'attività prevede la progettazione, realizzazione, messa in funzione e quindi l'analisi sperimentale del funzionamento di prototipi di componenti innovativi costituenti il sistema integrato in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale.

a.1 Evoluzione tecnologica di un accumulo termico del tipo a cambiamento di fase (Phase Change Material)

Nella precedente annualità, si è svolta un'analisi dell'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM, Tabella 121) in un serbatoio di accumulo termico, per sfruttare il calore latente di cambiamento di fase del PCM che, a parità di massa, permette di accumulare una quantità di energia nettamente superiore a quella ottenuta dalla capacità termica dell'acqua per la sua variazione di temperatura.

Per quanto riguarda le schiume solide ad alta conducibilità, ne sono state utilizzati tre tipi (Figura 395), con le caratteristiche principali riportate in Tabella 122; la prima, già testata nella precedente annualità, è una schiuma di carburo di silicio con pori grandi, le altre due sono in rame ma con due porosità differenti, una con pori grandi simile a quella in SiC, l'altra con pori piccoli. Le due schiume di rame inoltre hanno un grado di vuoto maggiore.

Tabella 121. Caratteristiche dei PCM utilizzati

Nome	Tipo	T_{pc} °C	ρ kg/m^3	λ kJ/kg	VHC MJ/m3	c_p kJ/kg K	k W/m K	T_{max} °C	Pericolo
S46	Sale idrato	46	1587	210	333	2,41	0,450	56	Irritante
A46	Organico	46	910	155	141	2,22	0,220	300	Nessuno
A43	Organico	43	780	165	129	2,37	0,180	300	Tossico



Figura 395. Schiume di carburo di silicio; rame 10 ppi; rame 50 ppi

Tabella 122. Caratteristiche delle schiume solide conduttive

Nome	Materiale	ρ kg/m^3	cp kJ/kg	k W/mK	PPI	D_pori mm	ρ_foam kg/m^3	Grado di vuoto	Spessore mm
SiC-10	Carburo di Silicio	2980	670	200	10	1,5	355	88,1%	25
Cu-10	Rame	8920	385	391	12	1,3	488	94,5%	10
Cu-50	Rame	8920	385	391	50	0,4	502	94,4%	2.5

Per valutare l'incremento delle prestazioni del PCM indotte dalla schiuma solida, sono stati caratterizzati provini dei tre materiali, di dimensioni 40x40 mm e spessore 25,5 mm. Le caratteristiche teoriche del materiale composito "PCM + schiuma solida", calcolate dalle frazioni dei rispettivi materiali, sono riportate in Tabella 123, insieme a quelle dei PCM puri.

Tabella 123. Proprietà fisiche nominali dei materiali usati

Materiale	Fraz. di solido	k [W/mK]	P [kg/m^3]	cp [J/kg K]	Λ [kJ/kg]
A46	0	0,22	910	2220	155
A46+SiC-10	0,119	8,14	1156	2035	137
A46+Cu-10	0,055	7,35	1354	2118	146
A46+Cu-50	0,056	7,55	1361	2116	146
A43	0	0,18	780	2370	165
A43+SiC	0,119	8,10	1042	2167	145

Prove sperimentali

Per le prove è stato utilizzato un dispositivo che consiste in un blocchetto di rame di dimensioni 45 x 45 mm e altezza 10 mm, alla cui base si trova un riscaldatore. Sulla faccia superiore viene appoggiato il provino contenente il PCM da testare e il riscaldatore è alimentato opportunamente per ottenere le condizioni volute (che si mantengono uniformi sulla superficie superiore grazie alla massa di rame). Il monitoraggio è effettuato registrando le termocoppie inserite nel rame e nel provino, insieme alla tensione e corrente dell'alimentatore. In Figura 396 è mostrato lo schema del dispositivo, con l'indicazione della posizione delle termocoppie e un immagine dell'apparato durante un test.

Le prove sperimentali sono state eseguite con lo scopo di confrontare il comportamento di PCM puri o inseriti in matrici solide conduttive, quando sottoposti su una faccia a un transitorio di temperatura tipico degli impianti solari termici. La temperatura del riscaldatore viene portata ad un valore finale da un flusso termico costante, poi mantenuta costante fino alla completa fusione del PCM, variando la potenza fornita. Sono stati eseguiti tre transitori che differiscono tra loro per il flusso termico che genera l'aumento di temperatura (1200, 2726 e 10860 W/m^2), mentre il valore finale della temperatura è stato sempre 60 °C.



Figura 396. Dispositivo usato per i test su volumetti di PCM

Dal confronto degli andamenti delle temperature nelle prove effettuate con le tre schiume solide e con solo PCM A46, risulta che la schiuma porta in tutti casi un evidente miglioramento della conduzione termica verso l'interno. Infatti la maggiore potenza assorbita dal blocco di PCM provoca una crescita più lenta della temperatura del riscaldatore (Figura 397a), mentre nella parte alta del blocchetto le temperature salgono molto più velocemente (Figura 397b). Per quanto riguarda il confronto tra le schiume, con le due di rame la conduzione è maggiore rispetto al SiC, nonostante la frazione di solido sia circa la metà e la conducibilità teorica del composito sia invece minore (Tabella 123). Tra le due schiume di rame l'effetto della porosità sembra molto piccolo, e comunque il comportamento migliore è dato dai pori grandi.

Per confrontare le prestazioni del PCM con quelle del serbatoio con sola acqua, in Figura 398 è riportato il confronto tra le potenze assorbite dal PCM e quelle che sarebbero assorbite da un volume equivalente di acqua (con miscelazione continua). Inizialmente l'acqua assorbe una potenza maggiore grazie al suo calore specifico quasi doppio rispetto al PCM solido ed una conducibilità anch'essa maggiore. Quando inizia il cambiamento di fase la potenza fornita al PCM supera quella che andrebbe all'acqua, e questo tempo diminuisce con l'uso delle schiume.

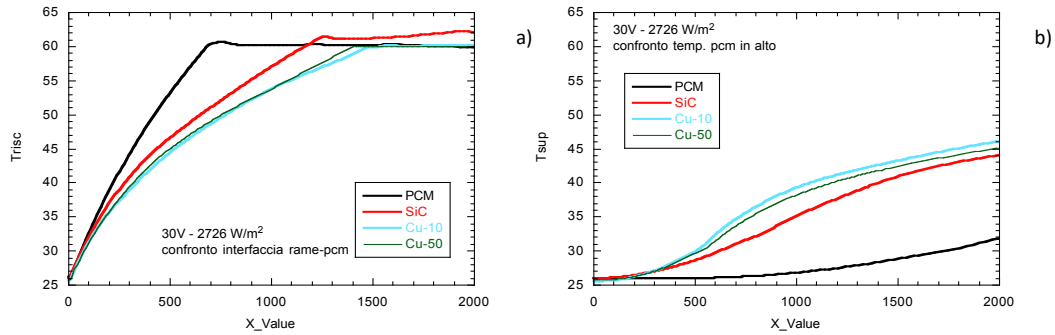


Figura 397. Effetto delle schiume sull'andamento della temperatura del riscaldatore, per transitorio con flusso 2726 W/m^2 fino a T_{risc} = 60°C e poi T_{risc} = cost

Ancora più interessante, per una valutazione del comportamento reale nell'accumulo termico, è il confronto tra le energie assorbite dal PCM (Figura 398). Anche in questo caso la presenza delle schiume del SiC aumenta la

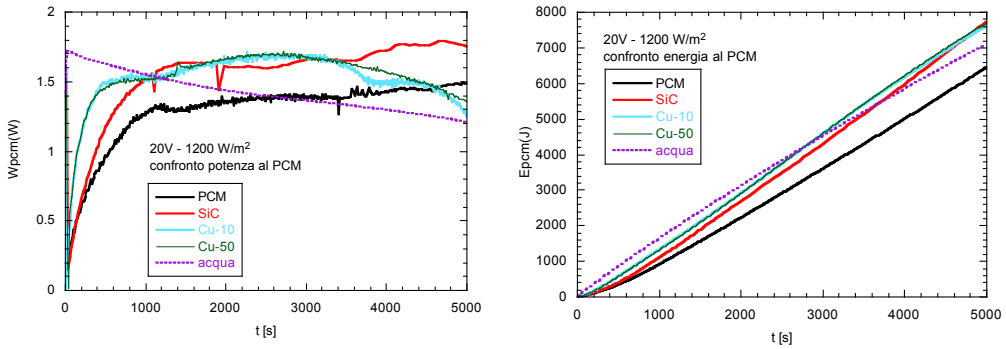


Figura 398. Confronto tra acqua e i quattro PCM, per la potenza e l'energia. Prova con flusso 1200 W/m^2

capacità di assorbimento del PCM puro: in questo caso l'energia assorbita dall'acqua viene superata ad un tempo di oltre 5000 s, che diventa 3300 s con il SiC e 2700 s con le due schiume di rame, indipendentemente dalla

dimensione dei pori. Quindi la schiuma di rame migliora di una altro 20% il tempo per cui il PCM diventa conveniente, anche se ha una frazione di solido metà di quella di SiC.

Simulazioni CFD delle prove sperimentali con modello tridimensionale

Sono stati realizzati tre modelli CFD usando FLUENT, e mostrati in Figura 399:

- schiuma con pori grandi, schematizzata come struttura reticolare di barrette rettangolari, tali che la frazione di solido e la dimensione dei pori sia la stessa del caso reale della schiuma di SiC con 10 ppi;
- schiuma con pori piccoli, con la stessa struttura della precedente ma con dimensioni a metà scala;
- alette piane verticali, per valutare questo tipo di struttura rispetto alla schiuma solida.

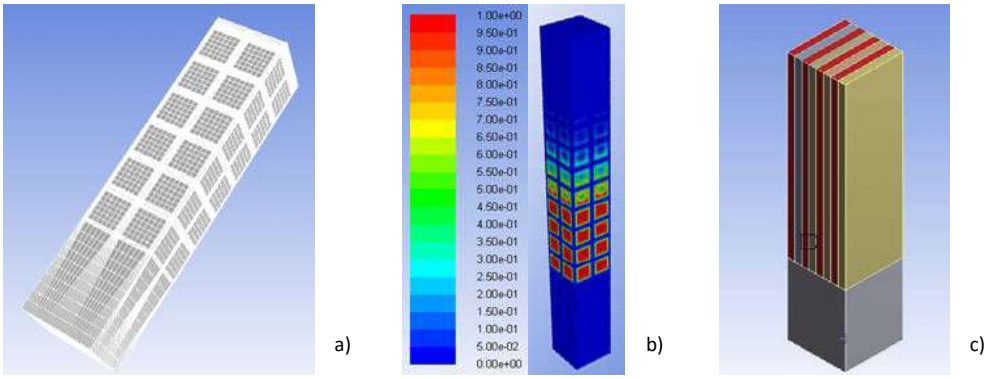


Figura 399. (a) Nodalizzazione per schiuma a pori grandi; (b) tipiche mappe di colore per pori piccoli , (c) struttura della simulazione con alette in rosso il PCM)

I risultati delle simulazioni mostrano che il calore sembra assorbito più rapidamente di quanto non accada nella realtà, con quindi una conducibilità media del materiale composito più alta di quella reale.

Miglioramenti con modifiche dei contenitori di PCM

Durante la precedente annualità, era stata riportata all'interno del report pubblicato [RdS/PAR2013/156] la sperimentazione e la simulazione CFD del tubo contenitore del PCM reale con il volume di acqua ad esso associato nel serbatoio di accumulo. In Figura 400 è mostrato anche il singolo contenitore di PCM e lo schema della sezione di prova sperimentale, usato anche nella simulazione. La sezione di prova è stata schematizzata in geometria cilindrica con la nodalizzazione mostrata in Figura 401.

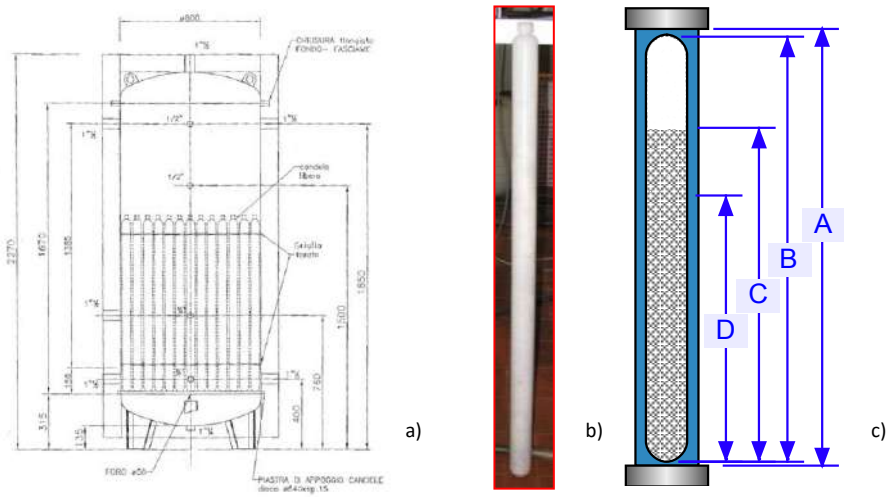


Figura 400. (a) Serbatoio di accumulo; (b) contenitore di PCM); (c) schematizzazione per Fluent, dove C=livello del sale granulare prima dell'uso, D=sale dopo la fusione

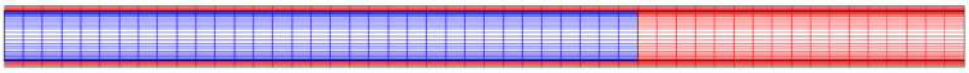


Figura 401. Visualizzazione dei volumi (anulo con acqua, PCM, aria)

Dall'analisi dei dati sperimentali e delle relative simulazioni, si è arrivati a concludere che nella configurazione attuale la sostituzione dell'acqua col PCM diventa conveniente solo se le variazioni di temperatura hanno durata abbastanza lunga, mentre per tempi fino a circa 90 minuti l'accumulo di energia nell'acqua risulta maggiore. Quindi con le loro caratteristiche nominali tutti i PCM valutati hanno una risposta troppo lenta, fornendo vantaggi solo nelle fasi in cui la temperatura varia a cavallo del valore di fusione e poi si mantiene nel nuovo valore per ore. Aumentando la conducibilità a 1 W/mK (valore ottenuto con le schiume) il miglioramento delle prestazioni è modesto, mentre diventa notevole con k=10 W/mK, permettendo di ottenere l'accumulo o il rilascio di gran parte del calore latente di fusione in tempi minori di un'ora, rendendolo quindi molto più efficiente durante le variazioni dovute ad effetti meteorologici.

Nuove simulazioni con FLUENT

Considerando che per aumentare la velocità della fusione del PCM bisogna aumentare la potenza verso la zona di cambiamento di fase, i parametri su cui agire sono:

1. aumento della conducibilità termica del PCM
2. diminuzione della resistenza delle pareti, aumentandone la conducibilità e diminuendo lo spessore
3. aumento dell'area di contatto acqua-PCM e/o diminuzione dello spessore del PCM.

Per il punto 1, si è notato che l'aumento ottenuto con le schiume conduttive non è ancora sufficiente. Il punto 2 si è dimostrato importante sostituendo la plastica con il metallo, ma ulteriori miglioramenti intervenendo sul tipo di metallo e sullo spessore diventano trascurabili, essendo a questo punto tutta la resistenza concentrata nel PCM.

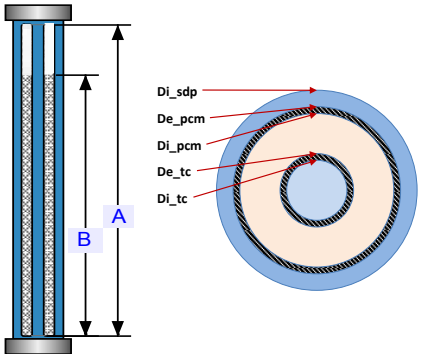


Figura 402. Schema con contenitore anulare e ottimizzazione dei volumi (A=vessel; B=PCM solido); e sezione della nuova configurazione

Gli unici parametri su cui intervenire rimangono quindi quelli del punto 3, superficie e spessore, per cui una soluzione può essere quella di sostituire al contenitore cilindrico uno a sezione anulare ed ottimizzare la quantità di PCM in esso, come mostrato in Figura 402. L'aggiunta del passaggio dell'acqua anche al centro porta a un aumento della superficie di scambio e soprattutto a una notevole diminuzione dello spessore, senza però diminuire troppo la quantità di PCM. Inoltre rispetto ai contenitori attuali (Figura 401) il riempimento completo, lasciando solo il volume necessario all'espansione del liquido, porta ad un ulteriore aumento della superficie e compensa la diminuzione di massa di PCM dovuta al foro centrale. Un vantaggio aggiuntivo è la diminuzione delle perdite di carico dell'acqua.

Per valutare l'effetto modifiche geometriche sul contenitore di PCM, in aggiunta al modello CFD di Figura 401 ne sono state realizzate due varianti, una con la configurazione appena descritta ed una senza PCM e tutto il volume occupato dall'acqua, per avere un confronto diretto con il serbatoio di accumulo classico. Le tre configurazioni sono mostrate in Figura 403, dove è riportata anche la velocità dell'acqua essendo la portata in ingresso la stessa. In figura sono riportati anche i volumi di acqua e di PCM. Il terzo caso, con PCM anulare, è mostrato con riempimento di PCM uguale all'attuale (per un confronto diretto), ma è stato provato anche con riempimento completo.

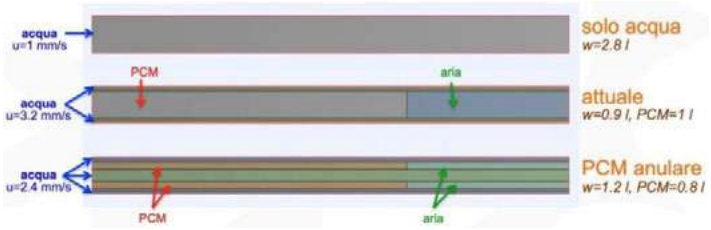


Figura 403. Schema delle tre configurazioni simulate

Nel caso anulare le dimensioni del sistema simulato sono le stesse di quello cilindrico, ma con un canale centrale di 20 mm. In Figura 404a sono mostrati gli andamenti delle temperature di uscita dell'acqua dopo un gradino in ingresso di 45°C. I tre casi confrontati sono relativi al tubo attuale ("PCM"), a quello anulare con riempimento parziale ("anul") e a quello con solo acqua ("vuoto"). Per i gradini in raffreddamento i risultati sono simili. Con il PCM anulare il tempo di cambiamento di fase diminuisce di oltre il 50%, migliorando la risposta per transitori dell'ordine dell'ora. Questo miglioramento è notevole, considerando che è analogo al risultato ottenuto in precedenza [rapporto RdS/PAR2013/156] con l'aumento di conducibilità a k=10 W/mK, mostrato in Figura 404b.

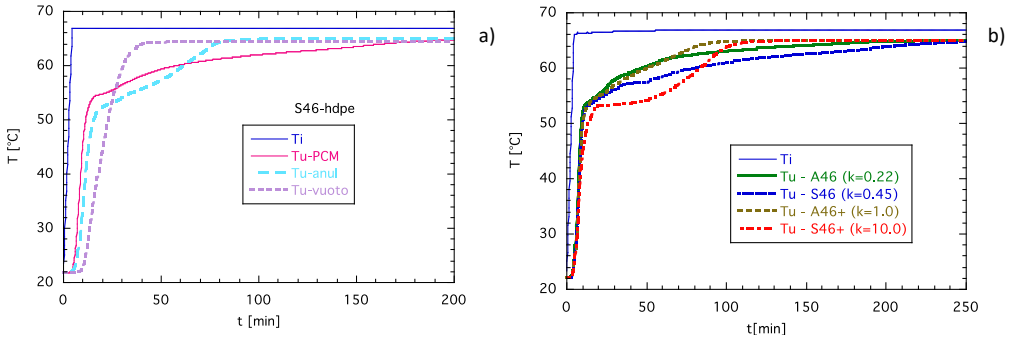


Figura 404. Confronto delle temperature in uscita a) per le tre configurazioni, b) per PCM simulati con diversa conducibilità

In Figura 405a il confronto tra il contenitore cilindrico e quello anulare viene mostrato in termini di potenza scambiata con l'acqua dopo il gradino. Si può vedere che nell'anulo il contributo della parete interna è poco meno della metà di quello dall'esterno nella prima fase, ma poi diventa equivalente permettendo di sfruttare rapidamente anche gli strati più interni del PCM, cosa che invece avviene in tempi molto lunghi con il cilindro pieno. Con le pareti di alluminio, Figura 405b, la differenza è minore nei primi 15 min, mentre la fusione avviene molto vicino alla parete, quando ma poi cresce quando il fronte di cambiamento di fase si allontana e quindi il contributo della seconda parete diventa più importante. In entrambi i casi la potenza scambiata dall'anulo è sempre maggiore di quella del cilindro nella prima ora, per poi annullarsi rapidamente a fusione completata, mentre nel cilindro la fusione degli strati interni continua molto lentamente e con potenze sempre più ridotte a causa dela piccola massa dei cilindri con raggio piccolo.

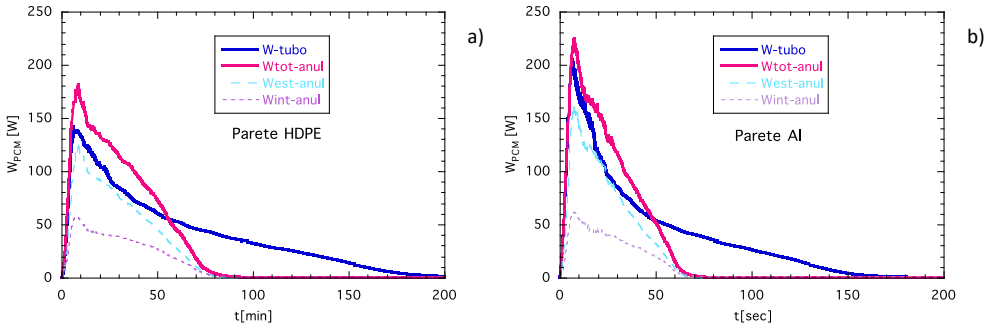


Figura 405. Potenza scambiata tra acqua e PCM nel caso attuale e in quello anulare, per il quale sono anche mostrate le frazioni sulla parete esterna e su quella interna

l riepilogo dei miglioramenti ottenuti con i successivi interventi (attuale contenitore cilindrico con parete di HDPE – contenitore anulare sempre di plastica-anulo con pareti di alluminio-anulo in alluminio riempito completamente) è mostrato in Figura 406a per le temperature in uscita. Il caso migliore, cioè l'anulo di alluminio completamente pieno di PCM, ha prestazioni molto migliori del contenitore attuale ("tubo_hdpe"), con la temperatura che tende effettivamente ad appiattirsi poco dopo il superamento della temperatura di cambiamento di fase del PCM. Questo è ancora più evidente in Figura 406b per le potenze scambiate tra acqua e PCM, dove si vede che la potenza massima viene quasi triplicata dagli interventi proposti, ed in generale la potenza, nei primi 30', aumenta notevolmente con la combinazione PCM anulare + parete di alluminio e soprattutto con il riempimento completo.

Per fornire una visione più immediata della differente evoluzione del transitorio, in Figura 407e 408 sono confrontate le "color map" delle temperature e della frazione di liquido ottenute dalle precedenti simulazioni dei due casi estremi (contenitore cilindrico in plastica con parte alta vuota, contenitore anulare in alluminio

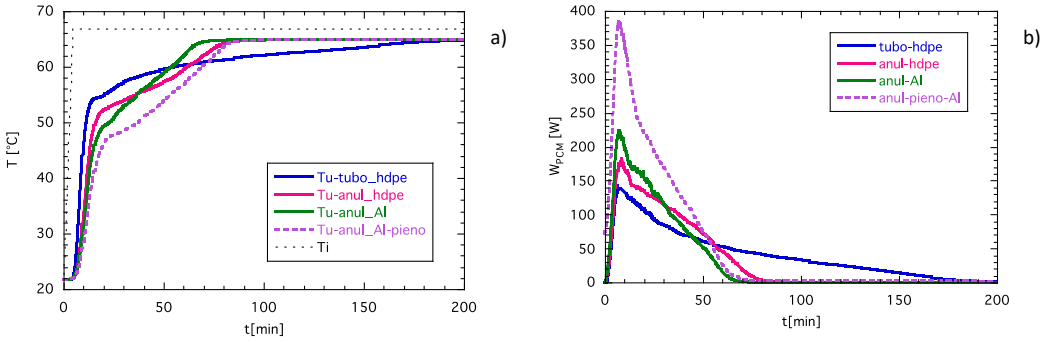


Figura 406. Confronto delle temperature in uscita e della potenza nel transitorio con salita passando dal caso attuale all'anulo di plastica, a quello di alluminio e infine al riempimento completo

completamente pieno), per due istanti (25, 50 min) dall'inizio del transitorio. In ogni figura le prime due immagini in alto sono relative alla temperatura, la prima per il tubo cilindrico e la seconda per quello anulare, le due in basso mostrano le corrispondenti frazioni di liquido. Si vede come la presenza del foro centrale, oltre alle pareti conduttive, porti al riscaldamento e alla fusione del PCM molto più rapidamente, mentre nel cilindro la zona centrale rimane solida per tempi molto più lunghi.

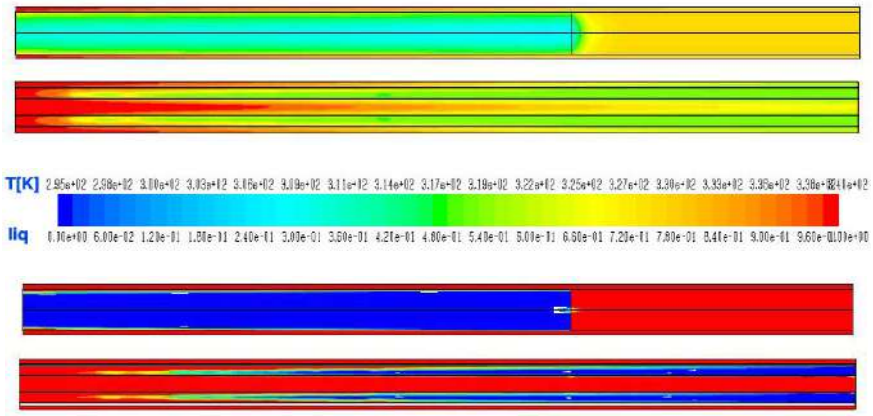


Figura 407. Riscaldamento, t=25 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio

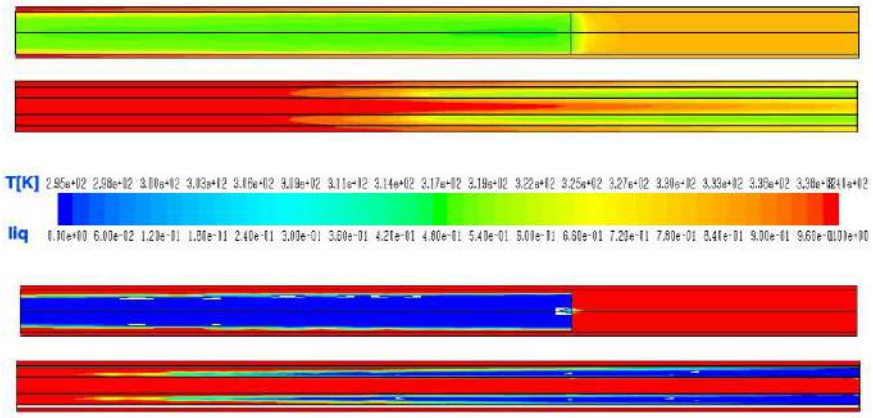


Figura 408. Riscaldamento, t=50 min: confronto delle temperature (in alto) e della frazione di liquido (in basso) tra il contenitore cilindrico in plastica e quello anulare in alluminio

Conclusioni

Le prove sperimentali e le relative simulazioni eseguite sul tubo di PCM reale hanno dimostrato che, a causa della bassa conducibilità, i tempi necessari per avere miglioramenti consistenti sull'accumulo di energia possono essere troppo lunghi, spesso molte ore.

Nel presente lavoro sono stati valutati numericamente e sperimentalmente metodi per la diminuzione del tempo di risposta, ed in particolare:

- l'aumento della conducibilità del materiale inserendolo in una matrice solida molto più conduttiva;
- la modifica dei contenitori di PCM per aumentarne lo scambio termico con il fluido primario.

Riguardo il primo punto la schiuma di carburo di silicio (SiC) in precedenti test aveva mostrato un buon aumento della conducibilità, ma non ancora sufficiente. Nel presente lavoro sono stati eseguite prove sperimentali con due nuove schiume di rame, una con porosità simile a quella del SiC e l'altra con pori molto più piccoli (ma stessa frazione di vuoto). È risultato che il rame migliora ulteriormente le prestazioni, ma ancora non abbastanza per rendere sicuramente conveniente il sistema. Dato che la riduzione della dimensione dei pori non ha portato a differenze apprezzabili, queste prove hanno permesso di verificare il limite superiore del miglioramento con le schiume, avendo il rame una conducibilità termica tra le più alte tra i materiali convenzionali utilizzabili come schiume solide.

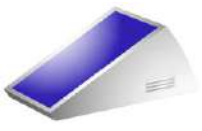
Sono stati allora valutati interventi sulla forma e sui materiali dei contenitori di PCM, fermo restando la filosofia generale di un facile utilizzo all'interno dei serbatoi esistenti, che era stata ottenuta con "candele" cilindriche verticali. Le modifiche proposte sono: l'adozione di un contenitore anulare (due tubi concentrici con passaggio dell'acqua anche all'interno); la sostituzione delle pareti di plastica con metallo (molto più conduttivo); l'ottimizzazione del riempimento (attualmente il 30% della candela è vuoto dopo la prima fusione). Ciascuno di questi tre interventi porta a un incremento delle prestazioni e il miglioramento ottenuto dal sistema completo supera abbondantemente quello massimo raggiungibile con le schiume, rendendo il sistema conveniente per transitori di temperatura con tempi minori di un'ora.

I risultati sono documentati e dettagliati nel rapporto RdS/PAR2014/229.

a.2 Test funzionali ed ottimizzazione delle performance di due prototipi di condizionatore d'aria compatti Solar DEC

Le attività di ricerca sono state finalizzate alla prosecuzione del monitoraggio dei due prototipi solar DEC compatti (PAR 2014) e nella individuazione delle soluzioni tecniche atte a migliorarne le prestazioni. I dati di funzionamento acquisiti nella precedente annualità avevano infatti evidenziato alcune inefficienze nei sottosistemi di raffrescamento evaporativo indiretto (lato aria e acqua) e nel canale di espulsione dell'aria secondaria in uscita dagli scambiatori evaporativi. Ulteriore margine di miglioramento dell'efficienza complessiva del sistema si sarebbe potuto ottenere da un upgrade di alcuni componenti del sistema di monitoraggio/controllo che porterebbe un incremento del rendimento di regolazione. E' stata inoltre effettuata una caratterizzazione delle macchine in modo da poterle confrontarle con macchine convenzionali con lo scopo di realizzare uno studio economico necessario a valutare il potenziale di diffusione sul mercato di questa nuova tecnologia.

Durante l'attività di ricerca sono stati testati due prototipi di solar DEC di taglia diversa e dedicati ad utenze di diversa destinazione d'uso (residenziale e terziario) le cui caratteristiche sono riportate di seguito.

Caratteristiche principali modello ***Freescoo* residential**	
Superficie collettori solari: 2,4 m^2 Dimensioni in pianta: 1,2 x 2 m^2 Portata d'aria immessa in ambiente: 500 m^3/h Portata d'aria di rinnovo: 250 m^3/h Potenza frigorifera max: 2,7 kW (T_{est} = 35°C x_{est} =14 g/kg) Potenza elettrica assorbita: 0,12 kW	
Caratteristiche principali modello *Freescoo* office	
Superficie collettori solari: 4,8 m^2 Dimensioni in pianta: 2,4 x 2 m^2 Portata d'aria immessa in ambiente: 1000 m^3/h Portata d'aria di rinnovo: 500 m^3/h Potenza frigorifera max: 5.5 kW (T_{est} = 35°C x_{est} =14 g/kg) Potenza elettrica assorbita: 0,25 kW	

Freescoo (acronimo di **FREE S**olar **COO**ling) è un innovativo e compatto sistema di climatizzazione alimentato ad energia solare, con funzioni di deumidificazione, raffreddamento ed integrazione al riscaldamento, per applicazione nel settore della climatizzazione degli edifici in ambito residenziale e commerciale. Il sistema ha la caratteristica di essere compatto ovvero tutti i componenti utilizzati nel ciclo termodinamico sono alloggiati all'interno della macchina.

DEIM che ha curato il monitoraggio e l'ottimizzazione del sistema *Freescoo residential*, alimentato ad energia solare e dedicato ad applicazioni di tipo residenziale. ENEA ha realizzato un impianto sperimentale presso il C.R. ENEA di Casaccia al fine di testare e quindi sperimentare il sistema *Freescoo office*, alimentato ad energia solare e dedicato ad applicazioni tipo uffici. Il sistema, infatti, è pensato per effettuare il ricambio e il trattamento dell'aria a costo energetico nullo.

Le differenze principali tra le macchine installate sono legate essenzialmente alla diversa taglia e configurazione interna. In particolare, per ciò che concerne la configurazione dei componenti, l'unità *Freescoo* office si presenta suddivisa in due moduli diversi. Uno è relativo alla parte di ciclo che realizza la deumidificazione dell'aria, l'altro è relativo al raffreddamento dell'aria trattata. L'unità *Freescoo* residential è costituita invece da un unico modulo in cui si realizza l'intero ciclo termodinamico. L'unità office ha una portata d'aria nominale doppia e pari a 1000 m^3/h rispetto all'unità residential che invece ha una portata d'aria di 500 m^3/h.

Freescoo Residential

Nell'ambito di questo lavoro di ricerca è stata svolta un'estesa campagna di monitoraggio per il sistema Solar DEC *Freescoo* residential (Figura 409), installato nell'estate del 2014, presso il DEIM dell'Università di Palermo.

L'unità si presenta a prima vista come un collettore solare piano per il riscaldamento di acqua sanitaria, nel cui volume sottostante è presente la macchina di trattamento dell'aria funzionante con tecnologia DEC. Il sistema è progettato per attuare un trattamento dell'aria a partire dal solo calore fornito dal sole. Il refrigerante utilizzato all'interno della macchina è l'acqua.



Figura 409. Prototipo *Freescoo* residential installato presso il DEIM dell'Università di Palermo

In merito alla tutela della proprietà intellettuale, sull'idea alla base del sistema è stata depositata una domanda di brevetto per invenzione industriale alla quale è seguita l'estensione a livello internazionale sotto forma di PCT.

In una prima fase dello studio sono state svolte delle prove preliminari volte ad identificare problematiche al funzionamento di alcuni dei componenti interni. In particolare è stata posta attenzione al miglioramento del funzionamento dello scambiatore evaporativo e dei componenti coinvolti nel processo di deumidificazione dell'aria. E' stato aggiornato il sistema di monitoraggio e migliorata la logica di controllo dei letti adsorbenti. Relativamente alle prestazioni energetiche possono essere tratte le seguenti conclusioni:

- complessivamente il sistema presenta un'elevata efficienza energetica. Il coefficiente EER della macchina è risultato di 12,8 come valore medio sul periodo considerato. Se si considera invece la autoproduzione da PV, il valore sale a 50,7. L'elettricità consumata dagli utilizzatori interni alla macchina è stata infatti prelevata dalla rete solo per il 25% del totale, mentre il restante 75% è stato generato dal sistema PV. Ad esempio, il consumo di energia elettrica causato da un utilizzo esteso per tutta la stagione estiva (90 giorni, 12 ore al giorno), stimato a partire dai valori di efficienza misurati, ammonterebbe a circa 40 kWh corrispondenti al consumo di circa due giorni di funzionamento continuativo di un comune climatizzatore domestico alla massima potenza. Dalle considerazioni fatte si evince che l'efficienza elettrica dell'unità esaminata è nettamente superiore a quella di un sistema di climatizzazione tradizionale;
- in termini di potenza di raffreddamento, sono stati registrati invece valori minori rispetto a quelli nominali. La causa principale risiede nel fatto che la capacità di deumidificazione dei letti adsorbenti e la potenza di raffreddamento dello scambiatore evaporativo non hanno mai raggiunto i valori nominali. Il massimo della potenza di raffreddamento raggiunto è stato di 1,8 contro 2,7 kW. Il sistema presenta dunque margini di miglioramento sia sul fronte della capacità di raffreddamento sensibile che su quello della deumidificazione dell'aria;
- si è notato un miglioramento delle prestazioni a seguito delle modifiche apportate rispetto ai valori mediamente raggiunti durante le prove fatte nel 2014;
- i dati di monitoraggio relativi alla stagione invernale mostrano che il sistema può fornire un importante

contributo al riscaldamento e alla ventilazione dell'ambiente a cui è connesso a costi energetici praticamente nulli.

Inoltre, nell'ambito di questo studio, è stata svolta un'analisi di ciclo di vita dell'unità in esame al fine di determinarne le prestazioni energetiche ed ambientali complessive, confrontandole con quelle di un sistema convenzionale di riferimento. I principali risultati di quest'analisi possono essere così riassunti:

- la fase di costruzione presenta impatti considerevolmente maggiori rispetto a quella di utilizzo (tra 87-89% del totale)
- il consumo globale di energia primaria dell'unità *Freescoo*, dovuto sia alla fase di costruzione che a quella di utilizzo corrisponde a circa metà dell'energia primaria consumata dall'unità di condizionamento dell'aria convenzionale nella sola fase di utilizzo.
- il consumo globale di acqua dovuto all'utilizzo dell'unità *Freescoo* è nettamente maggiore di quello dell'unità convenzionale di riferimento se si considera il consumo d'acqua dovuto alla produzione di elettricità utilizzata da entrambi i sistemi.

Gli obiettivi della presente ricerca hanno riguardato principalmente l'analisi delle cause di inefficienza individuate alla luce dei dati di monitoraggio, l'individuazione delle azioni migliorative delle prestazioni energetiche, il miglioramento del sistema di monitoraggio e controllo, l'analisi delle prestazioni energetiche e confronto con quelle di un sistema convenzionale. Infine ci si è proposti di svolgere l'analisi di ciclo di vita dell'unità.

Analisi iniziale del comportamento di alcuni componenti

Dall'esame dei dati di monitoraggio relativi alla stagione estiva 2014 e dai test funzionali svolti all'inizio della campagna di monitoraggio iniziata a fine Giugno 2015, sono stati evidenziati i seguenti aspetti:

- necessità di miglioramento della logica di regolazione che gestisce lo scambio dei letti adsorbenti. I dati registrati hanno mostrato infatti che l'umidità dell'aria in uscita dai letti adsorbenti non ha raggiunto spesso i valori adeguati per un buon funzionamento della sezione di raffreddamento evaporativo (9-11 g/kg);
- rispetto allo scambiatore di calore utilizzato nella macchina *Freescoo* office installata presso ENEA (configurazione 2014) sono state evidenziate prestazioni migliori imputabili essenzialmente alla migliore distribuzione dell'acqua grazie ad un diverso sistema di ugelli spruzzatori, ad una diversa geometria del componente (con sviluppo più in lunghezza) e ad un diverso rapporto tra le portate d'aria nei canali secondari e primari dello scambiatore. Si è proceduto comunque all'ottimizzazione del funzionamento del componente come descritto di seguito.

Descrizione delle modifiche apportate

Uno degli aspetti su cui ci si è concentrati ha riguardato l'ottimizzazione della logica di controllo dei letti adsorbenti. In particolare si è notato che risulta di fondamentale importanza il raggiungimento di un certo grado di rigenerazione del materiale adsorbente prima di procedere allo scambio dei letti, indipendentemente dal raggiungimento delle condizioni di umidità nell'ambiente climatizzato. Infatti la logica di controllo precedente attuava lo scambio dei letti adsorbenti solo sulla base delle condizioni di umidità interne all'edificio senza fare riferimento alle reali condizioni di saturazione del materiale adsorbente nei letti. A tal fine sono state provate diverse logiche di regolazione tramite il software di gestione Labview e si è giunti infine ad implementarne una che tiene conto dell'andamento delle temperature dell'aria in uscita dai letti adsorbenti rispetto alla reale disponibilità di calore solare. Purtroppo il processo di ottimizzazione ha necessitato diversi fermi all'impianto.. Durante le prove è stata verificata inoltre la tenuta all'aria della valvola di scambio giungendo alla conclusione che le miscelazioni tra i flussi d'aria di rigenerazione e di processo sono bassi e comunque tollerabili. Si fa notare però che nonostante gli interventi fatti, il sistema ha mostrato dei limiti nel raggiungimento delle condizioni termoigrometriche desiderate in ambiente. Ciò è imputabile probabilmente alle basse temperature di rigenerazione disponibili in alcuni momenti delle giornate esaminate e alle elevate portate dell'aria di rinnovo.

Per ciò che concerne invece lo scambiatore evaporativo, si è visto che il grado di bagnabilità delle superfici di scambio risulta notevolmente migliorato se l'acqua spruzzata viene additivata con piccole quantità di fluido tensioattivo. Inoltre al fine di ottimizzare l'efficienza di scambio termico, è risultato necessario eseguire alcune prove al variare dei tempi di accensione e spegnimento della pompa di ricircolo nei cicli di spruzzamento dell'acqua. Ciò ha permesso di ottenere efficienze medie di raffreddamento dell'ordine di 70 -75% calcolate sulla base della temperatura di bulbo umido dell'aria in ingresso.

Analisi delle prestazioni nella configurazione attuale

L'analisi delle prestazioni energetiche sulla base dei dati di monitoraggio raccolti ha costituito il centro del lavoro di ricerca svolto. Il monitoraggio del sistema è stato eseguito sia durante il funzionamento invernale che estivo. Di seguito si riportano i risultati ottenuti per circa due settimane di funzionamento a cavallo tra Gennaio e Febbraio 2015 rappresentative del funzionamento invernale (Figure 410 e 411) . E' possibile notare come il sistema possa fornire un importante contributo al riscaldamento dell'ambiente e come esso presenti efficienze elettriche e termiche molto elevate. I valori di energia mostrati nei grafici sono relativi a 11 ore di funzionamento dell'impianto.

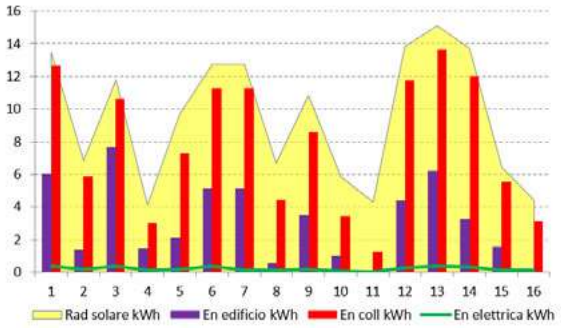


Figura 410. Andamento delle prestazioni energetiche per alcuni giorni di funzionamento nel periodo invernale

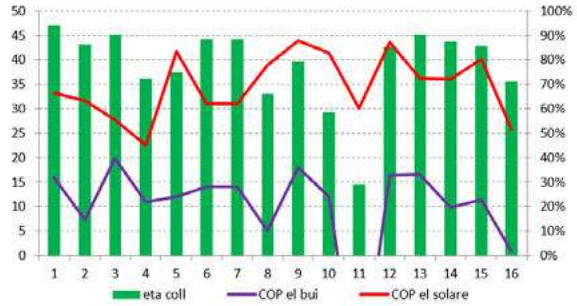


Figura 411. Andamento dell'efficienza termica ed elettrica

Il monitoraggio estivo è iniziato alla fine di Giugno 2015 dopo alcuni giorni di test mirati al miglioramento delle prestazioni dei componenti interni ed è proseguito fino alla seconda metà del mese di agosto con alcuni fermi di impianto dovuti alle azioni di upgrade della logica di controllo e a blocchi del PC al quale la macchina è connessa. In totale vengono presentati nei grafici seguenti le prestazioni energetiche del sistema per 40 giorni, per un totale di 479 ore di funzionamento. Dopo il fermo dell'impianto avvenuto alla terza settimana di luglio, è stato sostituito inoltre un misuratore di portata posto sulla mandata che risultava non più funzionante.

Come è possibile notare dalla Figura 412, il sistema ha fornito un'energia frigorifera media giornaliera variabile da 11 a 17 kWh su 12 con un EER variabili da 12 a 15. Si sottolinea che il l'EER presentato è stato calcolato sula base del totale dell'energia elettrica utilizzata dai componenti elettrici interni, non tenendo conto della autoproduzione da fotovoltaico che comunque copre circa i tre quarti del fabbisogno totale di elettricità della macchina.

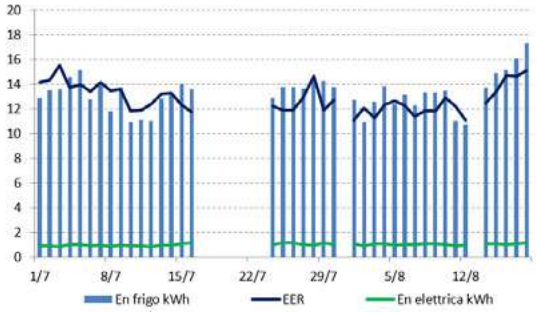


Figura 412. Andamento delle prestazioni energetiche globale nel periodo luglio - agosto 2015

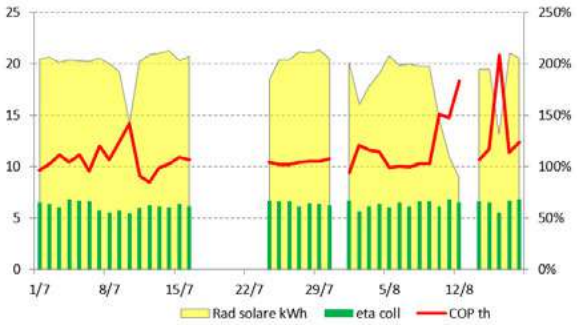


Figura 413. Andamento delle prestazioni energetiche del sistema solare nel periodo luglio - agosto 2015

In Figura 413 sono rappresentate le prestazioni del collettore solare. Come si vede l'efficienza termica del collettore solare risulta mediamente elevata, grazie al fatto che il collettore lavora con aria esterna e dunque ad efficienza massima. Inoltre è da considerare anche il contributo di preriscaldamento dovuto all'involucro esterno della macchina.

Descrizione e risultati dell'analisi di ciclo di vita (LCA)

Un'altra importante fase del lavoro di ricerca ha riguardato la valutazione delle prestazioni ambientali dell'unità *Freescoo* residential in esame tramite la metodologia LCA (ISO 14040, 2006).

I risultati dell'analisi condotta fanno riferimento ad una serie di indicatori attraverso i quali è possibile quantificare le prestazioni energetiche ed ambientali del sistema. Nell'analisi del ciclo di vita svolta si è tenuto conto dell'utilizzo delle materie prime e delle risorse energetiche necessarie per la produzione del prodotto stesso, e del consumo durante la fase di utilizzo del prodotto. Non sono state invece considerate le fasi di manutenzione e dismissione.

Per realizzare l'analisi di ciclo di vita del prodotto, e per riassumere i dati inventariati, sono stati selezionati i seguenti indici energetici ed ambientali:

- Global energy requirement, (GER);
- Non-renewable energy requirement, (NRE);
- Renewable energy requirement, (RE);
- Global warming potential, (GWP);
- Ozone depletion potential, (ODP);
- Photohemical ozone formation, (POF);
- Acidificazione, (AC);
- Terrestrial eutrophication, (TE).

Per calcolare il consumo di energia primaria totale del prodotto analizzato è stato utilizzato il fabbisogno di energia globale, rinnovabile e non. L'analisi di impatto ambientale è stata realizzata invece utilizzando il metodo ILCD 2011 Midpoint, elaborato da Prè (2012) coerentemente con le indicazioni della Commissione Europea (2012).

In accordo con la procedura riportata nella ISO 14040(2006) e ISO 14044(2006), l'analisi di inventario è stata condotta quantificando il numero di ingressi e di uscite dal sistema *Freescoo*, attraverso la quale è possibile effettuare i bilanci energetici e di massa.

Questo step inoltre ha permesso la stima del consumo di risorse primarie; aria; acqua; suolo; emissioni; produzione di rifiuti, durante il ciclo di vita del sistema,. Gli eco-profili dei materiali e delle risorse energetiche si riferiscono principalmente al database ECOINVENT.

Relativamente alla fase di costruzione sono stati individuati consumi di energia primaria pari a 27,2 GJ, di cui 3,15 GJ (11,6%) di provenienza da fonti rinnovabili. I componenti del sistema che hanno mostrato le incidenze maggiori sul consumo di energia primaria (Figura 414), relativamente alla fase di costruzione, sono in ordine: collettori solare termico/fotovoltaico; sistema batterie fotovoltaico; scambiatore di calore evaporativo; letto adsorbente



Figura 414. Incidenza di ciascun componente sul consumo di energia primaria

Gli altri componenti (filtri aria, strutture metalliche portanti e di rivestimento; valvole; tubazioni; pompe; etc…) hanno invece una incidenza inferiore al 7%.

L'incidenza di ciascun componente impiantistico sul computo totale del GWP assume valori simili a quelli riscontrati nell'analisi del consumo di energia primaria: le batterie fotovoltaiche danno il contributo maggiore in termini di impatti ambientali, ad eccezione del consumo di suolo, che è principalmente imputabile ai letti adsorbenti, e per l'ODP che è principalmente causato dal collettori solare termico/fotovoltaico.

Terminata l'analisi della fase di costruzione, la stessa procedura in termini di consumo di energia primaria e di impatto ambientale è stata utilizzata per la stima nella fase di utilizzo del sistema. Si precisa che a tal fine si è fatto riferimento al solo utilizzo nella stagione estiva, mentre non si è tenuto conto delle prestazioni e dei relativi consumi per la stagione invernale. In particolare, i calcoli effettuati si basano sui risultati derivanti dalla fase di monitoraggio durante i mesi di luglio e agosto 2015 per l'unità installata al dipartimento DEIM dell'Università degli Studi di Palermo. In particolare i dati di monitoraggio si riferiscono al periodo di 40 giorni già esaminato, con 12 ore di funzionamento al giorno. Le principali caratteristiche derivanti dall'analisi dei dati monitorati durante questo periodo sono riassunti in Tabella 124.

Tabella 124. Prestazioni energetiche dell'unità *Freescoo* - luglio e agosto 2015

Indicatore energetico	
Energia frigorifera fornita, kWh	533
Elettricità utilizzata dai componenti interni, kWh	41
EER	12,8
EER_{rete}	50,7
Consumo d'acqua, L	1151
Ore di funzionamento, h	479

Nella tabella gli indicatori EER e EER_{grid} si riferiscono all'Energy Efficiency Ratio calcolato rispettivamente sulla base dell'elettricità consumata dai componenti interni attivi (ventilatori, pompe, attuatori, etc…) e l'elettricità realmente prelevata dalla rete. In quest'ultimo caso viene quindi considerata l'autoproduzione elettrica da fotovoltaico. Questo valore è quello effettivamente utilizzato nell'analisi.

Le prestazioni risultanti dalla fase di monitoraggio come l'energia media di raffreddamento; EER; consumo di acqua ed altri, sono stati utilizzati per estrapolare delle prestazioni su un periodo di funzionamento stagionale nominale pari a 90 giorni, con 12 ore di funzionamento al giorno. Nei calcoli è stato assunto un periodo di vita di 15 anni.

Nella Tabella 125 vengono riportati gli indicatori di impatto sia per la fase di costruzione che per quella di utilizzo dell'unità. Questo permette di evidenziare come la fase di costruzione abbia un impatto considerevolmente maggiore rispetto a quella di utilizzo (tra 87-89% del totale).

Tabella 125. Impatti ambientali dell'unità *Freescoo*

Indicatore di impatto	Totale	Costruzione	Utilizzo
Climate change, kg $CO_{2\,eq}$	1828	1595	233
Ozone depletion, kg CFC-11 eq	0	0	0
Photochemical ozone formation, kg NMVOC eq	6	5	1
Acidification, molc H^+ eq	13	11	1
Terrestrial eutrophication molc N eq	19	17	2

Come mostrato nella Tabella 126, anche in termini di consumi di energia primaria si nota un comportamento simile a quello degli impatti ambientali.

Dal confronto delle prestazioni energetiche relativamente alla fase di utilizzo tra l'unità *Freescoo* e un generico sistema di condizionamento dell'aria (si è assunto convenzionalmente un valore di EER pari a 3), ne risulta che quest'ultimo ha un consumo di energia primaria circa 16 volte maggiore. Valori simili sono riscontrabili dal medesimo confronto fatto sugli indicatori di impatto ambientale.

Tabella 126. Consumi di energia primaria

Categoria di impatto	Totale MJ	Costruzione MJ	Utilizzo MJ
Non rinnovabile, fossile	23333	20192	3141
Non rinnovabile, nucleare	4349	3879	470
Non rinnovabile, biomassa	0	0	0
Rinnovabile, biomassa	287	258	28
Rinnovabile, vento, solare, geotermico	54	43	11
Rinnovabile, idroelettrico	3149	2858	291
Totale	31171	27230	3941

Inoltre considerando l'intero consumo di energia primaria, sia nella fase di costruzione che in quella di utilizzo, e assumendo un tempo di vita del sistema *Freescoo* pari a 15 anni, questo risulta pari a 31171 MJ corrispondente a metà dell'energia primaria consumata dall'unità di condizionamento dell'aria convenzionale nella sola fase di utilizzo.

Conclusioni

Nell'ambito di questo lavoro sono state effettuate diverse analisi al fine di valutale le prestazioni energetiche ed ambientali del sistema di condizionamento dell'aria solare *Freescoo* DEC e di ottimizzarne il funzionamento. In particolare è stata effettuata una valutazione delle prestazioni energetiche sulla base di diversi mesi di monitoraggio e dei relativi impatti ambientali applicando le metodologie della LCA, sia per ciò che concerne la fase di costruzione che quella di utilizzo del sistema. Da un esame dei risultati si evince che il sistema *Freescoo* presenta notevoli vantaggi sia in termini energetici che ambientali rispetto ad un sistema di climatizzazione convenzionale, anche soltanto facendo riferimento alle prestazioni del ciclo estivo. I dati esaminati mostrano anche che il sistema può comunque essere efficacemente utilizzato nella stagione invernale per dare un contributo al riscaldamento dell'ambiente.

Va considerato che, seppure il sistema presenta un'elevata efficienza elettrica, nella sua configurazione attuale mostra dei limiti di potenza di raffreddamento che fanno sì che non possano essere raggiunte sempre le condizioni desiderate in immissione. Uno dei limiti riscontrati è legato al calore solare a disposizione che può essere fornito in certe situazioni per la rigenerazione del materiale essiccante e di conseguenza per la deumidificazione dell'aria.

Freescoo Office

L'attività sperimentale è stata condotta utilizzando un locale di prova appositamente strumentato. Il locale è servito dall'impianto AI.CO.WA. con pompa di calore a CO_2 e fan coil quali terminali d'impianto. L'impianto AI.CO.WA. ha lo scopo di mantenere la temperatura del locale a 28 °C mentre l'impianto *Freescoo* realizza il ricambio d'aria dell'ufficio secondo la UNI 10339, immettendo in ambiente aria con determinate caratteristiche di temperatura, umidità e purezza (aria neutra).

L'impianto Solar DEC realizza, attraverso l'utilizzo della radiazione solare e dell'acqua, la deumidificazione ed il ricambio dell'aria degli ambienti in accordo con gli obiettivi di risparmio energetico individuati dall'Unione Europea, di sviluppo sostenibile e di basso impatto ambientale. Il sistema è reso completamente autonomo dalla rete elettrica mediante l'integrazione di un sistema fotovoltaico per la fornitura dell'energia elettrica necessaria al funzionamento dei componenti costituenti la macchina. Il sistema *Freescoo* è dotato di due batterie per lo stoccaggio dell'energia elettrica prodotta dal collettore solare fotovoltaico.

Le attività di ricerca svolte sull'unità *office* si sono concentrate soprattutto sui seguenti aspetti:

1. Assistenza durante i lavori di modifica eseguiti sull'impianto dalla ditta Solarinvent che hanno riguardato:
   - sostituzione, rispetto alla configurazione della macchina del 2014, dello scambiatore evaporativo a pacco; eliminazione della pompa dello scambiatore evaporativo e sostituzione con due elettrovalvole alimentate direttamente dalla pressione di rete.
   - sostituzione della valvola di commutazione dei due letti adsorbenti.
   - sostituzione del ventilatore solare.
2. Aggiornamento dell'intero sistema di monitoraggio.
3. Installazione di quattro sonde di velocità per il calcolo puntuale delle portate di aria in mandata, in uscita dal letto adsorbente, nel circuito del collettore solare e di ritorno dall'edificio.

4. Caratterizzazione delle prestazioni del nuovo scambiatore evaporativo rispetto a quello sostituito. Nell'analisi svolta nel 2014 infatti lo scambiatore di calore ha riportato una non sufficiente potenza di raffreddamento a causa della non perfetta bagnabilità delle sue pareti. Il nuovo scambiatore presenta pareti rivestite con la tecnica della floccatura per una migliore bagnabilità.
5. Confronto tra le potenze frigorifere e delle efficienze di scambio termico nelle due configurazioni.
6. Analisi dei dati di monitoraggio in termini di prestazioni istantanee, giornaliere e mensili.

Il climatizzatore *Freescoo office* (Figura 415) è stato progettato per essere compatto e svolgere funzioni di ventilazione, deumidificazione e raffreddamento (successivamente verrà studiato anche in funzione di riscaldamento invernale) utilizzando solamente il calore fornito dal sole. Il sistema è essenzialmente composto da un involucro in alluminio che comprende collettori solari di tipo termico e fotovoltaico, e diversi componenti che permettono il funzionamento della macchina:



Figura 415. Prototipo *Freescoo* Office installato presso C.R. ENEA Casaccia

- due letti adsorbimenti;
- una torre di raffreddamento integrata;
- due scambiatori di calore evaporativi a pacco;
- un ventilatore solare;
- un ventilatore principale;
- altri dispositivi ausiliari per il processo di trattamento dell'aria.

Il prototipo si basa su una particolare sequenza di trattamenti dell'aria tali da permettere il controllo della temperatura e dell'umidità dell'ambiente servito.

Descrizione delle modifiche del sistema FREESCOO office

La modifica più importante apportata nel 2015 riguarda lo scambiatore evaporativo a pacco. Le prestazioni di questo elemento misurate nella compagna estiva 2014 sono risultate inferiori rispetto a quelle attese. Le principali cause di riduzione della prestazione dello scambiatore rispetto ai risultati attesi sono state essenzialmente imputate alla bassa bagnabilità della superficie del secondario dello scambiatore. Si è riscontrato, infatti, che lo strato di rivestimento anticorrosivo utilizzato, in resina epossidica, riduce notevolmente la bagnabilità della superficie rispetto ad una finitura in alluminio naturale. Dalla letteratura infatti si evince che l'angolo di contatto dell'acqua su superfici di materiale polimerico è maggiore di 90° dando luogo ad un comportamento idrofobo. E' possibile affermare dunque che il rivestimento in resina epossidica delle superfici dello scambiatore, pur garantendo una buona protezione alla corrosione e conseguentemente una maggiore durabilità del componente stesso, non risulta però una scelta vantaggiosa dal punto di vista della bagnabilità delle pareti dello scambiatore diretto; questo ha determinato una minore sottrazione di calore per evaporazione e un conseguente minor raffreddamento sia dell'aria primaria che di quella secondaria. Nella Figura 416 si nota come le gocce di acqua rimangano sferiche e non bagnino la superficie dello scambiatore.



Figura 416. Particolare dello scambiatore evaporativo a pacco con rivestimento in resina epossidica (configurazione 2014)

Per questo motivo nel giugno 2015 lo scambiatore evaporativo a pacco è stato sostituito con uno le cui pareti sono rivestite di floccato. Tale materiale migliora la bagnabilità delle pareti. Essendo l'efficienza di scambio termico dell'intero scambiatore di calore fortemente influenzata da questo parametro, sono state svolte diverse indagini nella campagna di misure 2015 al fine di valutare la distribuzione dell'acqua sulle superfici di scambio.

Il processo di floccatura elettrostatica si ottiene orientando e proiettando fibre di poliestere di dimensioni dell'ordine del decimo di millimetro che si attaccano alla superficie per mezzo di un collante. L'energia per orientare ed accelerare la fibra viene fornita da un campo elettrostatico applicato fra dosatore di fibra e superficie da floccare. Macroscopicamente il rivestimento presenta una finitura superficiale simile ad un velluto sintetico in grado di assorbire l'acqua che lo bagna; microscopicamente il rivestimento si presenta come una superficie ricoperta di fibre dritte ed ortogonali alla stessa.

Anche il sistema di bagnatura dello scambiatore è stato modificato; infatti, nella configurazione 2014, il flusso d'aria secondario confluiva direttamente verso l'alto, dove incontrava ed investiva l'acqua spruzzata tramite degli ugelli, in modo da ottenere l'effetto di evaporazione. L'acqua veniva quindi raccolta in un recipiente posto nella parte inferiore dello scambiatore e successivamente rimandata agli ugelli, tramite una pompa di ricircolo. L'acqua veniva prelevata dalla rete e il suo consumo massimo è stato di 15 L/h. La modifica ha permesso l'eliminazione della pompa, sostituita da due elettrovalvole (Figura 417), con una conseguente riduzione della potenza elettrica richiesta dagli organi ausiliari.



Figura 417. Scambiatore evaporativo

Per quanto concerne lo scambiatore evaporativo, una volta installato il componente, sono state eseguite delle prove preliminari al fine di ottimizzarne il funzionamento. In particolare sono state eseguite delle misure di velocità dell'aria in diversi punti della bocca di uscita dello scambiatore evaporativo (sezione di mandata all'edificio). Ciò ha evidenziato una sua distribuzione non omogenea delle velocità; in particolare è stata notevole la differenza di velocità registrata tra i punti più vicini all'asse della sezione e quelli alla periferia della stessa (Figura 418). In particolare, facendo una prova a portata massima si è riscontrata una velocità dell'aria di circa 0,45 m/s nel punto 1 e di circa 0,9 m/s nel punto 2. Ciò ha evidenziato una distribuzione dell'aria non uniforme nei canali primari dello scambiatore a causa della "zona d'ombra" causata dal ventilatore centrifugo posto nella parte centrale dello scambiatore (sezione di ingresso). Si è visto che la diminuzione dell'efficienza di scambio termico nelle zone laterali è causata da un diverso rapporto tra la velocità dell'aria nei canali primari e quelli secondari. Infatti durante le prove tra i due punti è stata misurata una notevole differenza di temperatura dell'aria passante. Se nel punto (1) sono state registrate temperature intorno ai 20 °C, nel punto (2) queste hanno mostrato valori anche superiori 26 °C.

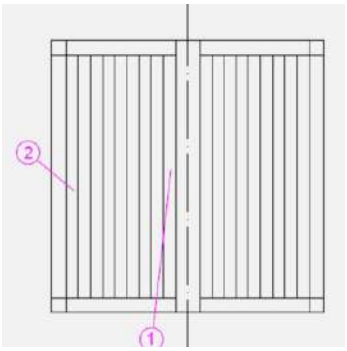


Figura 418. Sezione di mandata dello scambiatore a pacco

Per ridurre questo effetto, a valle della sezione di mandata, sono stati inseriti due deflettori convergenti in modo tale da guidare l'aria verso il centro dello scambiatore, evitare una portata d'aria eccessiva alla periferia dello stesso, e in generale rendere omogenea la temperatura dell'aria primaria. In più è da sottolineare che il flusso principale attraversa condotti orizzontali più corti i quali offrono una minore resistenza al passaggio dell'aria rispetto a quelli percorsi dal flusso secondario, più lunghi e diretti prima verso il basso e poi verso l'alto.

La presenza dei due deflettori ha permesso quindi anche un riequilibrio delle portate d'aria primaria e secondaria. Il rapporto tra le portate d'aria nei canali secondari e primari è, infatti, un parametro molto importante che influenza notevolmente l'evaporazione dell'acqua e in definitiva il raffreddamento del flusso d'aria primario.

Altra importante variazione è stata l'introduzione dei trasduttori di velocità al fine di una puntuale e continua misura delle portate di aria in gioco. Infatti nel 2014 le portate d'aria sono state calcolate attraverso la misura delle velocità eseguite con un anemometro ad elica secondo la norma EN 16211 utilizzando il solo metodo di misura a griglia su più punti. Il valore delle portate di aria non poteva pertanto essere rilevato con continuità. Durante la fase di revisione del sistema di monitoraggio, è stata integrata una sonda voltamperometrica per la misura del consumo elettrico, ed introdotto un misuratore di portata per la stima del consumo di acqua di rete.

Infine è stato sostituito il ventilatore solare in seguito ad un guasto che ne ha determinato il fermo, a causa di temperature dell'aria nel circuito solare che hanno raggiunto e superato i 60°C e sono state causa dell'avaria dell'elettronica. E' stata inserita pertanto una sonda di temperatura sul ventilatore solare al fine di monitorare se la stessa raggiunga valori pericolosi, nel caso di bassa portata di aria nel circuito solare. In questo modo è possibile salvaguardare l'elettronica di controllo attraverso il software di gestione che provvede ad aumentare la velocità del ventilatore e al limite a spegnerlo nel caso le temperature siano troppo elevate(la temperatura di stoccaggio del ventilatore e dell'elettronica a bordo dello stesso presenta un limite superiore a 80°C).

Analisi dei risultati sperimentali

Sono stati svolti diversi test funzionali e analisi dei dati finalizzate alla verifica del miglioramento delle prestazioni e dell'efficienza rispetto ai risultati ottenuti in precedenza. La campagna di misura è iniziata in maniera continuativa il 13 luglio 2015.

Particolare attenzione è stata posta nella valutazione della nuova configurazione dello scambiatore evaporativo sia in termini di caratteristiche di funzionamento sia in termini di prestazioni.

Il floccato per il tipo di finitura che lo caratterizza presenta microscopicamente fibre ortogonali alla superficie che ricopre. Nel caso dello scambiatore in esame le pareti di scambio termico sono verticali e le fibre orizzontali; nel primo periodo di prova è stato riscontrato come, a causa di vie preferenziali date dalla presenza delle bacchette di separazione tra i singoli canali secondari, tale configurazione generi rivoli di acqua verso il basso. Non essendo poi l'acqua ricircolata, questa viene persa, determinando l'aumento del suo consumo. Nella prima fase di taratura del sistema di apertura delle elettrovalvole dello scambiatore, sono stati adottati cicli di bagnatura della durata di 30 s con pause di 300 s.

Dopo un primo periodo di prova caratterizzato da queste condizioni, è stato introdotto nell'acqua prelevata dalla rete un fluido tensioattivo in quantità limitata a 10 g/m^3 di acqua, ma tale da migliorare ulteriormente la bagnabilità e ridurre l'acqua utilizzata. Mantenendo lo stesso ciclo di 300 s descritto è stato possibile in questo modo limitare il tempo di apertura delle elettrovalvole a 12 s. Ciò ha permesso di ridurre il consumo di acqua di rete da 220-230 a 120-130 L/giorno.

Alla luce dei dati di funzionamento analizzati, si è proceduto a modificare ulteriormente la logica di apertura delle elettrovalvole che controllano l'acqua che viene spruzzata al fine di ridurre ulterirmente il consumo di acqua. In particolare è stata introdotta una logica di dosaggio dell'acqua proporzionale alle reali esigenze ovvero sulla base delle condizioni termoigrometriche e di portata dell'aria in ingresso allo scambiatore. Ciò ha permesso di ridurre a valori ancora più bassi il consumo di acqua giornaliero medio (45 L).

È stato Inoltre revisionato completamente il sistema di monitoraggio della macchina.

Di seguito vengono mostrati alcuni risultati relativi alle prestazioni istantanee e giornaliere dell'unità per una giornata di riferimento. Come giornata TIPO è stata scelta quella del 30 agosto in quanto presentava valori di temperatura e umidità medie simili a quelli registrati dalla giornata TIPO analizzata nell'annualità 2014. Il periodo di funzionamento impostato è 08:00 - 18:00.

Nella Figura 419 sono riportati gli andamenti delle umidità specifiche durante il periodo di funzionamento della macchina. Analizzando l'andamento delle umidità specifiche si nota come l'umidità specifica esterna sia prossima

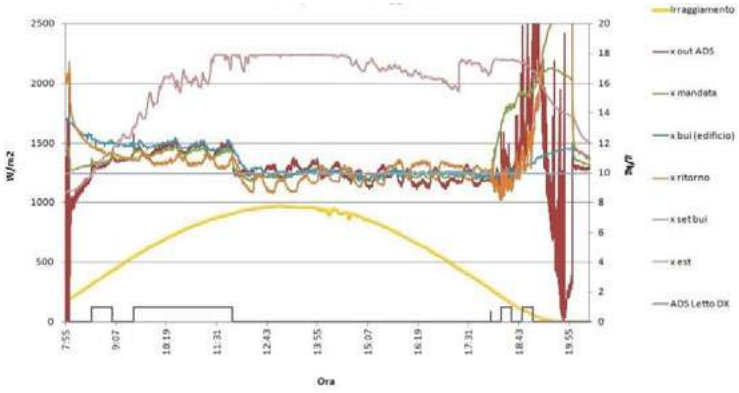


Figura 419. Umidità specifiche e irraggiamento misurate il 30 Agosto 2015

ai 15 g/kg. Gli andamenti delle altre umidità, in particolare la $x_{mandata}$, la x_{bui} e la $x_{ritorno}$ hanno valori molto simili tra loro e oscillanti intorno al valore di 10 11 g/kg. Si nota come alle ore 11:45 l'entrata in funzione del letto adsorbente sinistro (completamente rigenerato) permetta un brusco calo di $x_{out\ ADS}$ e delle altre umidità specifiche considerate. Il picco superiore di $x_{out\ ADS}$, in corrispondenza dell'entrata in funzione del letto destro, è indice dello spostamento della valvola di commutazione dei letti.

La Figura 420, che si riferisce al letto di sinistra, sottolinea questo fatto: l'umidità specifica in uscita dai letti adsorbenti presenta un calo in corrispondenza dell'entrata in funzione del letto di sinistra (quando il segnale $ADS_{letto\ sx}$ è 1). Le $x_{in/out\ Letto\ sx}$ e $T_{in/out\ letto\ sx}$ descrivono bene la fase di rigenerazione che il letto destro subisce prima della sua entrata in funzione.

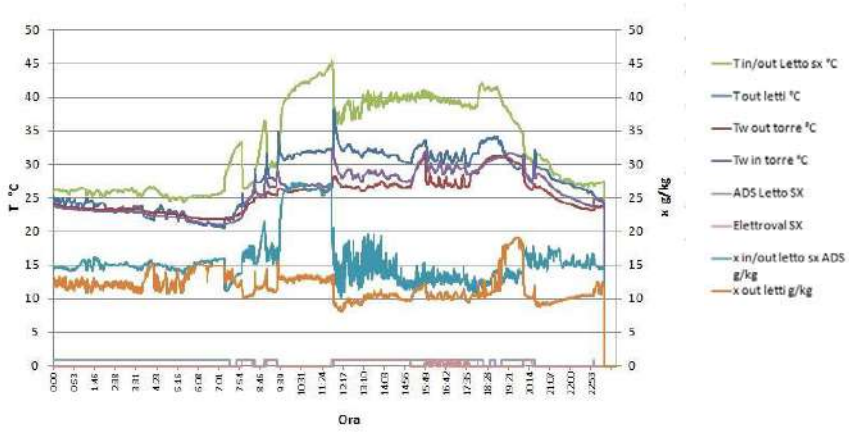


Figura 420. ADS letto sinistro

Nella stessa figura sono riportate anche le temperature dell'aria in ingresso e in uscita dal letto adsorbente. Quando il letto è in funzione esso opera un raffreddamento dell'aria di processo dell'ordine dei quasi 10 °C e ciò a riprova dell'effetto di raffreddamento nei letti adsorbenti.

La Figura 421 mostra l'andamento delle temperature esterna (in verde), dell'edificio (in blu) della mandata (in rosso), il set point dell'edificio (in viola) e la posizione della valvola di commutazione dei letti (in azzurro) che se pari a 1 indica il funzionamento del letto destro (e la rigenerazione del letto sinistro). A fronte di temperature dell'aria in entrata nei letti che superano anche i 40°C il prototipo *FRESCOO* offre una temperatura di mandata che oscilla intorno ai 23 e i 24°C con un raffreddamento medio di 16 °C.

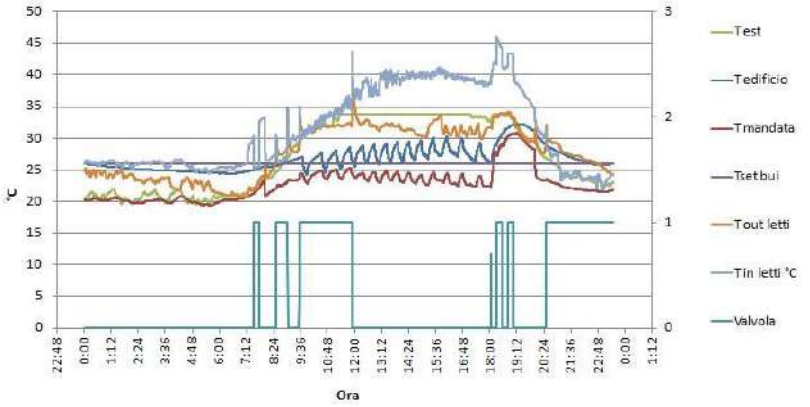


Figura 421. Temperature

Le potenze elettriche assorbite dai componenti del sistema *FREESCOO* sono riportate in Figura 422. Con P_{altro} si intende potenza assorbita dai motori delle elettrovalvole e dal motore della serranda dei letti adsorbenti.

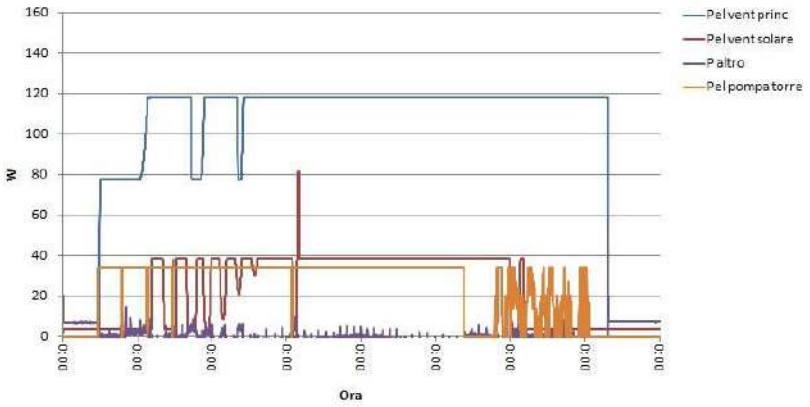


Figura 422. Potenze elettriche assorbite dai componenti del sistema

Da questi andamenti si evince come il ventilatore solare venga mantenuto intorno al 50% della velocità di rotazione salvo picchi dovuti al sistema di controllo che ne aumenta il valore nel caso la temperatura dell'aria proveniente dai collettori solari salga oltre la soglia di pericolosità (60 °C). La potenza totale assorbita (Figura 423) si attesta a valori sempre inferiori a 200 W salvo i picchi di potenza che corrispondono all'incremento di potenza richiesta dal ventilatore solare.

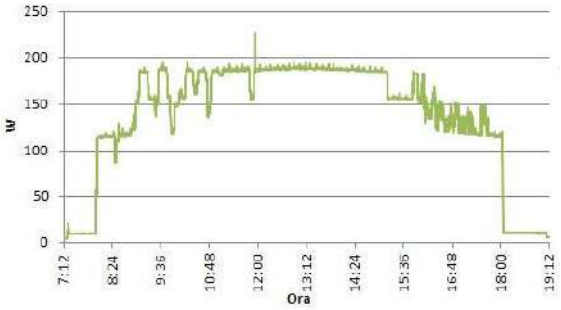


Figura 423. Potenza elettrica totale assorbita

La potenza di raffreddamento e l'EER istantaneo sono riportati nella Figura 424. A fronte di una potenza di raffreddamento totale, data dalla somma delle potenze dei letti adsorbenti e dello scambiatore evaporativo, che oscilla intorno a valori di 3,3 kW, si ha un buon rapporto EER che si attesta sempre superiore a 15 con picchi di oltre 20. Il calcolo dell'EER è stato ottenuto considerando l'energia elettrica utilizzata dai componenti interni senza distinguere se essa sia stata autoprodotta dal sistema fotovoltaico o prelevata dalla rete. Questo dimostra che, a prescindere dell'autoproduzione di energia elettrica, il sistema presenta una notevole efficienza.

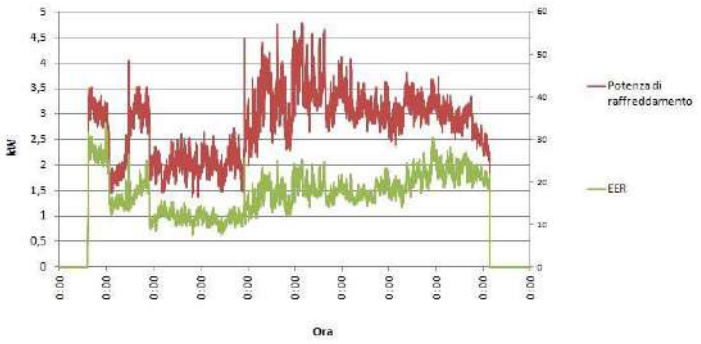


Figura 424. Potenza di raffreddamento e EER

Nella Figura 425 sono rappresentate le temperature dell'aria in entrata nello scambiatore (in verde) e di uscita (in viola), la temperatura di bulbo umido (in rosso) e l'efficienza dello scambiatore (in blu). Dall'analisi della figura si vede come la diminuzione di temperatura dell'aria trattata sia dell'ordine dei 8 – 9 °C a cui corrisponde un salto entalpico specifico di 552 kJ/kg a fronte di uno disponibile di 823 kJ/kg.

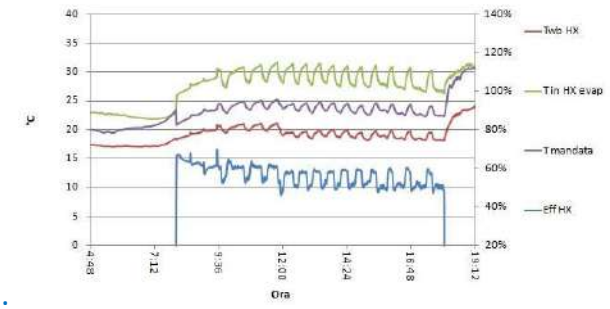


Figura 425. Temperature dello scambiatore evaporativo ed efficienza

Conclusioni

La giornata TIPO 2015, può essere messa a confronto con i risultati ottenuti nel 2014 [rapporto RdS/PAR2014/160]. Nelle Tabelle 127 e 128 sono riportate rispettivamente le condizioni ambientali medie nei due

giorni e sono messe a confronto le prestazioni. Entrambe si riferiscono alle sole ore funzionamento della macchina (ad eccezione dell'energia specifica solare media e dell'energia elettrica consumata che sono riferite all'intero giorno).

Tabella 127. Condizioni ambientali nelle due giornate TIPO

	Energia solare specifica media kWh/m^2	T est media °C	Umidità est media g/kg	T edificio °C	Umidità edificio g/kg
2015	7,4	32	16,1	27,3	10,7
2014	6,3	29,5	17,7	25,7	11

Tabella 128. Prestazioni registrate nelle due giornate TIPO

	P HX media kW	P raffreddamento globale media kW	EER medio	EFF HX media	En elettrica consumata kWh
2015	2,4	2,6	17,1	57%	1,6
2014	1,1	1,4	9,1	42%	1,9

In riferimento ai valori riportati in Tabella 127 è da sottolineare che il sistema di trattamento dell'aria Freescoo è affiancato dall'impianto a fan coil e pompa di calore a CO_2 AI.CO.WA: nell'anno 2014 questo provvedeva a mantenere la temperatura dell'edificio a 25 °C contribuendo parzialmente alla deumidificazione dello stesso con una temperatura di mandata ai fan coil di 7 °C. Nel 2015, si è scelto di utilizzarlo per il mantenimento della temperatura dell'edificio a 27 °C, cercando di minimizzare il suo contributo alla deumidificazione. Questo è stato ottenuto inviando ai fan coil acqua alla temperatura di 14 °C. A fronte di irraggiamento superiore per la giornata di prova 2015, le condizioni ambientali presentano differenze non eccessive, ma testimoniano il fatto che l'estate 2015 è risultata particolarmente calda a differenza dell'estate 2014 più fredda e umida. I risultati mostrano che:

- l'energia elettrica consumata dalla macchina è diminuita grazie anche alla eliminazione della pompa di circolazione dello scambiatore evaporativo avvenuta nel 2015 e all'utilizzo di due elettrovalvole in diretta connessione con la pressione di rete;
- la potenza di raffreddamento dello scambiatore evaporativo, a seguito della sostituzione dello stesso e dell'aggiunta del fluido tensioattivo nell'acqua proveniente dalla rete, ha subito un incremento notevole con un conseguente aumento della sua efficienza media e della potenza di raffreddamento globale della macchina;
- l'EER (*Energy Efficiency Ratio*) ottenuto, senza distinguere tra energia prelevata dalla rete o autoprodotta, ha subito un incremento del 48%.
- il consumo di acqua medio del primo periodo di prova pari a 224 L/g (21,5 L/h) è stato ridotto a 119,5 L/g (12,6 L/h) dopo l'introduzione del fluido tensioattivo e successivamente a valori di circa 45 L/g dopo le ultime modifiche nella logica di controllo delle elettrovalvole.

Nell'arco del periodo 13 luglio - 13 agosto sono stati registrati i valori riportati in Tabella 129.

I picchi di potenza del ventilatore solare hanno messo in luce come il sistema di protezione funzioni adeguatamente e ne garantisca l'integrità.

Tabella 129. Risultati relativi al periodo 13 luglio-13 agosto 2015

	Energia solare incidente kWh/m^2	Energia coll kWh	Energia HX kWh	Energia ADS kWh	Energia raffreddamento kWh	Energia edificio kWh	Energia elettrica globale consumata kWh	Energia elettrica prelevata da rete kWh	Consumo acqua L
Totale	223,3	636,8	706,7	990,1	1059,7	251,4	59,1	16,2	5,5*10^3
Medie giornaliere	7,2	20,5	22,8	31,9	34,2	8,1	1,9	0,5	171,8

I risultati delle attività svolte sono documentati e dettagliati nei rapporti RdS/PAR2014/230 e RdS/PAR2014/231.

b. Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura

Obiettivo generale di questa linea di attività è l'analisi sperimentale e la qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura da destinarsi ai settori della climatizzazione residenziale, commerciale e terziaria, alla produzione di freddo in ambito industriale ed alla produzione di calore per alimentare processi co-generativi ad uso industriale.

b.1 Caratterizzazione e sperimentazione di ricevitori ottimizzati per applicazioni solari termiche a media temperatura

Nella passata annualità sono stati sviluppati e validati sperimentalmente diversi modelli matematici per la simulazione di ricevitori a geometria cilindrica relativi a concentratori parabolici lineari o del tipo Linear-Fresnel operanti a media temperatura. I modelli sviluppati hanno permesso di stimare con buona accuratezza il comportamento energetico delle diverse tipologie di concentratori solari termici in tutte le condizioni possibili di funzionamento. Dato l'elevato grado di accuratezza riscontrato, tali strumenti software potranno essere utilizzati a supporto della progettazione ottimizzata di componenti innovativi sia per quanto riguarda la parte ottica sia per quanto riguarda la parte termo-fluidodinamica. Più in dettaglio, sia per ricevitori da utilizzare in collettori parabolici lineari sia per ricevitori da utilizzare in sistemi Linear-Fresnel, potranno essere esaminate diverse geometrie innovative con l'obiettivo, rispetto allo stato attuale dell'arte, sia di ottenere rese ottiche migliorative sia di massimizzare i flussi termici lato fluido-termovettore e nel contempo minimizzare le perdite termiche.

Nella scorsa annualità sono stati sviluppati modelli bidimensionali semplificati (bidimensionale piano e bidimensionale assial-simmetrico) allo scopo di effettuare calcoli abbastanza accurati del campo termico e fluidodinamico all'interno dei ricevitori a geometria cilindrica utilizzati nei collettori a concentrazione sopra citati. Le principali ipotesi semplificative, adottate nei modelli bidimensionali, sono state le seguenti:

- effetti trascurabili della gravità sul campo delle velocità di flusso e sul campo termico dell'olio nel tubo ricevitore e dell'aria nell'intercapedine tra tubo e vetro di copertura;
- flusso termico complessivo ceduto al fluido termo-vettore dipendente soltanto dal valore complessivo di irraggiamento sul tubo in acciaio, assumendo trascurabili le disuniformità di tale grandezza sulla circonferenza esterna del tubo ricevitore;
- effetti di bordo all'ingresso e all'uscita trascurabili rispetto al campo di moto e termico asintotici;
- assial-simmetria del campo termo-fluidodinamico.

La verifica della validità delle suddette ipotesi ha richiesto una serie di simulazioni 3D che è stata effettuata rimuovendo le condizioni semplificative esposte. A tal fine, nella precedente annualità, tale verifica era stata inizialmente effettuata utilizzando il programma FLUENT che si basa sul metodo di discretizzazione del continuo, detto dei volumi finiti, diverso dal metodo degli elementi finiti su cui è basato il COMSOL. Tutto ciò in modo da poter confrontare i risultati ottenibili con metodi numerici differenti. Si è però riscontrato che con tale metodo di analisi è molto complicato imporre la continuità dei flusso termico tra il fluido termovettore ed il tubo ricevitore, soprattutto se si vogliono considerare nei calcoli gli effetti radiativi, per altro rilevanti alle alte temperature. Inoltre, a differenza del programma FLUENT che tratta il moto turbolento nei fluidi ricorrendo soltanto al modello k-ε, il programma COMSOL permette di utilizzare il modello Low-Reynolds k-ε, le cui equazioni rimangono valide anche negli strati laminari a ridosso della parete interna del tubo ricevitore e nelle eventuali zone di transizione, senza la necessità dell'uso delle funzioni di parete che produrrebbero delle discontinuità nei campi termo-fluidodinamici in quanto i calcoli, in tale caso, sono svolti solo nel nocciolo turbolento, mentre le grandezze termo-fluidodinamiche sono raccordate tra inizio dello strato laminare e parete del tubo mediante tali funzioni.

Ciò premesso, in figura 426 sono riportati alcuni dei risultati ottenuti utilizzando il modello *Low Reynolds k-ε* in 3D e relativi ad una temperatura di ingresso dell'olio diatermico di 250 °C. In particolare, le tre immagini raffigurate rappresentano, rispettivamente:

a. il campo termico relativo a una sezione ortogonale all'asse del tubo ricevitore
b. il campo termico riferito ad una vista 3D relativa ad una porzione di tubo di lunghezza significativa;
c. il campo termico relativo a un piano meridiano disposto verticalmente.

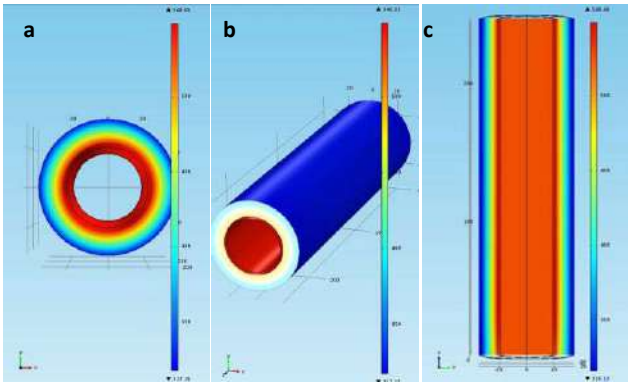


Figura 426. Risultati simulazioni 3D

La figura 427 mostra invece le distribuzioni della temperatura e della velocità nella sezione di uscita del tubo ricevitore, da cui si nota l'appiattimento della velocità in vicinanza all'asse di simmetria, come era già stato evidenziato dalle simulazioni assial-simmetriche in 2D.

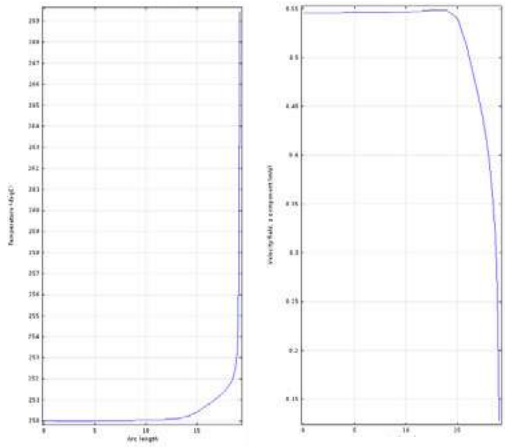


Figura 427. Risultati simulazioni 3D - a) Distribuzione della temperatura nella sezione di uscita del tubo ricevitore; b) Distribuzione di velocità all'uscita del tubo ricevitore

Nella tabella di Figura 428 è riportato il flusso termico che arriva al fluido termovettore per unità di lunghezza al variare della temperatura media del fluido (simulazione 3D). L'andamento di q', calcolato con il software COMSOL in 3D è stato fittato con un polinomio di secondo grado, ottenendo la curva riportata in figura.

Flusso termico per unità di lunghezza

T [°C]	q' 3D [W/m]
100	1554,6
125	1534,3
150	1516,0
175	1495,0
200	1473,6
225	1451,0
250	1397,8

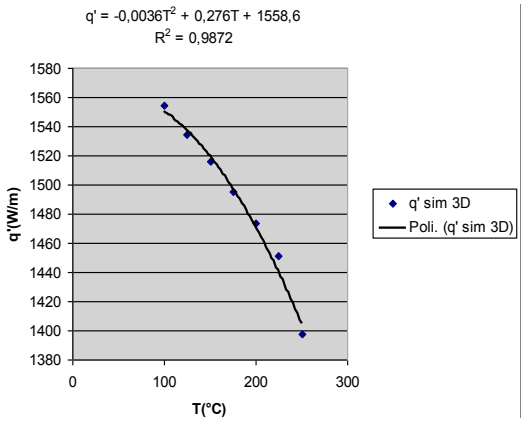


Figura 428. Valori tabellari del flusso termico per unità di lunghezza in funzione della temperatura del fluido termo-vettore e andamento di q' in funzione di T

Dai dati relativi al flusso termico per unità di lunghezza di cui sopra, attraverso un opportuno script di Matlab che suddivide la lunghezza del ricevitore in spezzoni di uguale lunghezza, è stato calcola l'andamento della temperatura lungo l'asse del tubo e la potenza totale assorbita discretizzando l'equazione differenziale alle derivate parziali che definisce la temperatura lungo l'asse del ricevitore (asse z), ottenendo la seguente equazione alle differenze in avanti:

$$T_{f,i+1} = T_{f,i} + \frac{q'(T_{f,i})}{\Gamma c_p(T_{f,i})}\Delta z_i$$

Essa, note che siano la temperatura media massica all'ingresso del tubo ricevitore $T_{f,0}$ e la funzione $q'(T_{f,i})$, permette di calcolare le temperature per ogni tratto Δz_i e quindi anche la temperatura media massica in uscita $T_{f,u}$.

Il calcolo è stato ripetuto per sette temperature di ingresso $T_{f,0}$ variabili tra 100 e 250 °C con passo di 25 °C. Per ognuna delle temperature in ingresso si è calcolata iterativamente la relativa efficienza:

$$\eta = \frac{\Gamma c_{p,m}(T_{f,u} - T_{f,0})}{A_a G}$$

dove il calore specifico del fluido termo-vettore è stato valutato come segue:

$$c_{p,m=} \frac{\int_{T_{f,0}}^{T_{f,u}} c_p\,(T)\,dT}{T_{f,u} - T_{f,0}}$$

Parametrizzando la curva di efficienza in funzione della temperatura ridotta T^* e fittando i dati alle relative temperature ridotte con una retta, si sono ottenuti, posto $\eta = \eta_{0\,-} a_1 T^*$, i seguenti valori per l'efficienza ottica e per il coefficiente di perdita: $\eta_0 = 0{,}7253$ $a_1 = 0{,}4018$.

Nella figura 429 sono riportati sia i valori tabellari dell'efficienza termica in funzione della temperatura ridotta sia il relativo grafico.

Valori dell'efficienza termica in funzione della temperatura ridotta

T* [°C/(W/m²)]	η [-]
0,080	0,693156
0,105	0,683111
0,130	0,673066
0,155	0,663021
0,180	0,652976
0,205	0,642931
0,230	0,632886

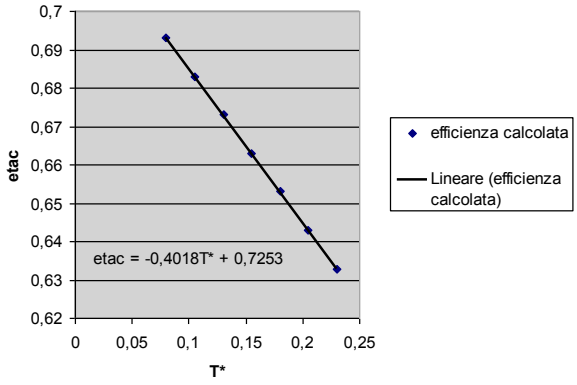


Figura 429. Valori tabellari dell'efficienza in funzione della temperatura ridotta e curva di efficienza stimata con le simulazioni 3D

Come si evince dai risultati ottenuti, il calcolo delle grandezze termo-fluidodinamiche mediante un'analisi in 3D permette di ottenere risultati molto accurati perché elimina le ipotesi semplificative che sono alla base dei modelli bidimensionali precedentemente utilizzati. Inoltre, l'analisi con il software COMSOL agli elementi finiti è risultata migliore di quella ottenuta con il software FLUENT, in quanto COMSOL dispone di metodi di calcolo ("Low Reynolds *k-ε*") che permettono di eliminare i problemi di discontinuità delle grandezze termo-fluidodinamiche in corrispondenza delle pareti di separazione tra fluido e solido. Il prezzo da pagare per l'utilizzo della simulazione in 3D rispetto a quella 2D è l'aumento esorbitante dei gradi di libertà del sistema e quindi delle risorse, sia in termini di CPU che di memoria, necessarie.

I risultati qui sintetizzati sono documentati e dettagliati nel rapporto RdS/PAR2014/232.

b.2 Sviluppo e sperimentazione di dispositivi per la misura diretta del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura

Come già evidenziato nella passata annualità, la stima delle prestazioni termiche di un collettore a concentrazione passa attraverso la soluzione delle equazioni di bilancio termico e di massa del tubo ricevitore che necessitano per essere risolte della conoscenza della densità e della distribuzione angolare di potenza radiante sul tubo ricevitore. Tale dato, non essendo noto a priori come risultato di misure sperimentali, lo si deve stimare attraverso l'utilizzo di software di analisi ottica che consentono in prevedere la distribuzione e l'intensità della radiazione solare concentrata, note che siano le caratteristiche ottiche e fisiche dei materiali che compongono sia il sistema di concentrazione che il ricevitore. Nonostante l'elevata precisione ed attendibilità di tali strumenti di analisi ottica, la possibilità di poter misurare direttamente il flusso solare concentrato sul ricevitore rappresenta un obiettivo di importanza rilevante nella messa a punto di metodiche per la stima e l'ottimizzazione delle performance ottiche e termiche di un collettore a concentrazione. Ciò premesso, in continuità con quanto già fatto nella precedente annualità, sono state completate le attività di sviluppo, progettazione e realizzazione di dispositivi prototipali per la mappatura sperimentalmente del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura, caratterizzati sia da ricevitori a geometria cilindrica sia da ricevitori a geometria piana.

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, che ha curato la parte inerente la misura diretta della radiazione solare concentrata su superfici piane.In particolare sono stati analizzati e sviluppati gli aspetti di seguito riassunti.

Misura diretta del flusso solare concentrato su ricevitori a geometria cilindrica

Nel presente lavoro sono state affrontate le tematiche della misura diretta della radiazione solare concentrata in sistemi a concentrazione per applicazioni a media temperatura nei settori sia residenziale per la produzione di

calore per la climatizzazione estiva degli edifici sia industriale per la produzione di calore di processo a temperature fino a 250°C.

La misura del flusso solare concentrato è di primaria importanza qualora si voglia risolvere le equazioni di bilancio energetico in corrispondenza del ricevitore solare. Attualmente per poter scrivere tali equazioni di bilancio di massa ed energia è necessario stimare il flusso solare concentrato attraverso modelli di calcolo che, sebbene molto sofisticati e capaci di tenere presente tutti chi aspetti che caratterizzano i fenomeni ottici che si realizzano sul concentratore solare, non danno la certezza della correttezza delle valutazioni effettuate. Per superare tale ostacolo e disporre di dati sperimentali che consentano sia di scrivere equazioni di bilancio energetico realistiche sia di validare i diversi strumenti di calcolo ottico disponibili sul mercato, sono stati messi a punto dei dispositivi per la misura diretta della radiazione solare concentrata.

Nel presente lavoro sono state analizzate le problematiche connesse alla misura diretta del flusso solare concentrato in sistemi a concentrazione del tipo Linear-Focusing (ossia sistemi parabolici lineari o sistemi a specchi lineari di Fresnel). In particolare sono state affrontate le problematiche connesse alla misura in campo del flusso solare concentrato su un ricevitore a geometria cilindrica per il quale, non potendosi misurare la distribuzione di flusso angolare e longitudinale direttamente sul piano focale (corrispondente alla superfice esterna del tubo assorbitore che è racchiuso all'interno del tubo in vetro), è stato necessario mettere a punto una metodica sperimentale di analisi che, attraverso la misura del flusso solare effettuata ad una certa distanza dal piano focale, consenta di risalire a quella che effettivamente raggiunge il ricevitore.

A supporto della definizione della metodica di misura sperimentale elaborata, sono state condotte delle prove preliminari anche su un sistema del tipo Point-Focusing (ossia sistemi a disco di piccole dimensioni per applicazioni solo termiche o ibride, quali i sistemi Dish/Stirling) al fine di valutare preliminarmente la bontà delle scelte operate.

Riguardo la misura diretta del flusso concentrato su sistemi Linear-Focusing, sono state analizzate e definite le specifiche tecniche per la realizzazione e messa a punto di un radiometro totalmente automatizzato per la misura della radiazione concentrata su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica. Tale sistema consente di mappare radialmente e longitudinalmente la distribuzione del flusso concentrato su tali tipologie di sistemi a concentrazione.

Risultati delle prove preliminari per la messa a punto della metodica sperimentale di analisi

Relativamente ai sistemi Point-Focusing è stato messo a punto un sistema prototipale di misura della radiazione solare concentrata basato su un sensore a termopila (Figura 430) in grado di misurare gli elevati flussi di radiazione ottenibili in concentratori quali i sistemi Dish/Stirling nei quali è possibile raggiungere flussi sul fuoco dell'ordine di alcune centinaia di kW per m².

In particolare, è stato utilizzato un sensore della OPHIR - mod. 1000W-BB - raffreddato ad acqua e tipicamente utilizzato in applicazioni laser per la misura della potenza termica in un range compreso tra 5W a 1000W, con densità di flusso massime pari a circa 6 kW/cm². Tale sensore è stato dapprima caratterizzato in laboratorio, mediante l'utilizzo di una SolarBox, per determinarne la curva di calibrazione necessaria a stimare il flusso concentrato a partire dalla misura della tensione generata dalla termopila. La curva di calibrazione stimata in laboratorio è stata poi utilizzata per determinare il flusso solare concentrato durante una serie di prove preliminari condotte sul ricevitore di un sistema Dish/Stirling che è stato equipaggiato con una guida (posta ad una distanza di 30 cm dal piano focale) su cui è stato fatto scorrere il sensore di misura.



Figura 430. Sensore a termopila per la misura della radiazione

La Figura 431 seguente mostra i risultati delle prove preliminari, mettendo a confronto la distribuzione attesa del flusso solare concentrato sul ricevitore e i dati sperimentali ottenuti con il sistema di misura descritto precedentemente. In particolare nel grafico di Figura 431a è riportata la variazione di flusso concentrato in funzione della distanza dal piano focale, a cui idealmente corrisponderebbe una concentrazione infinita in assenza di imperfezioni ottiche e con una sorgente di raggi solari a divergenza nulla. Essa è stata determinata in prima approssimazione mediante la relazione seguente, che lega il flusso medio ad una qualsiasi distanza intermedia tra il piano focale e il piano di apertura del sistema ottico primario:

$$P = P_0 \left(\frac{L}{x}\right)^2$$

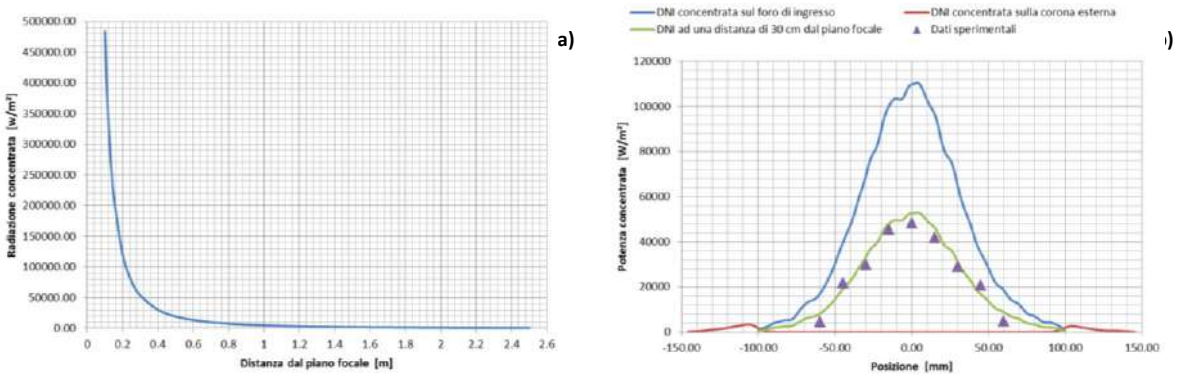


Figura 431. a) Andamento della radiazione concentrata in finzione della distanza dal piano focale; b) Confronto tra la distribuzione attesa del flusso solare concentrato sul ricevitore e i dati sperimentali ottenuti

dove *Po* è il flusso indicente sul piano di apertura (nel nostro caso 815 W/m²), *L* è la distanza focale e *x* è la coordinata che rappresenta la distanza dal piano focale nella direzione dell'asse del paraboloide. Dal grafico emerge subito che le variazioni più consistenti si hanno nei primi 20-30 cm di distanziamento dal piano focale ideale.

Nel grafico di Figura 431b sono invece presentati gli esiti delle valutazioni teorico-sperimentali effettuate, in particolare:

- la curva di colore blu mostra l'andamento della radiazione solare concentrata su una sezione orizzontale del ricevitore Stirling in corrispondenza sul foro di apertura, così come ottenuta a seguito delle simulazioni ottiche eseguite con il software di ray-tracing TRACEPRO, in corrispondenza delle condizioni effettive di funzionamento nel giorno delle misure, ossia: DNI=815 W/m² e divergenza angolare del fascio solare di 11 mrad (corrispondente all'allargamento stimato del fascio solare in conseguenza delle imperfezioni del sistema ottico utilizzato);
- la curva di colore rosso riporta invece la distribuzione teorica del flusso solare concentrato sulla corona esterna del ricevitore;
- poiché non è stato possibile, a causa degli ingombri del dispositivo di misura, effettuare le misure sperimentali in corrispondenza del piano focale considerato per le analisi teoriche (corrispondente alla posizione del foro di ingresso del ricevitore Stirling), i valori di radiazione concentrata (curva di colore verde) sono stati ricalcolati in corrispondenza del piano di misura effettivo, posto a 30 cm dal piano focale;
- i punti di colore viola corrispondono ai dati sperimentali, ottenute mediante 9 rilevazioni simmetriche rispetto al centro del ricevitore ed equi-spaziate di circa 15 mm l'una dall'altra.

Dal confronto tra i dati ottenuti mediante le simulazioni ottiche e i dati sperimentali rilevati durante la giornata di prova, emerge un sostanziale accordo a favore della validità dell'approccio sperimentale adottato che ha permesso di mettere a punto una tecnica che consente di misurare la radiazione solare concentrata sul ricevitore di un sistema del tipo Dish/Stirling di piccola taglia. Tale tecnica ha permesso di verificare, nei limiti delle approssimazioni del metodo di test utilizzato, che le assunzioni effettuate per via teorica sulla distribuzione di flusso concentrato si sono rivelate molto vicine al caso reale, confermando le stime modellistiche della producibilità elettrica e termica per tale tipologia di sistemi cogenerativi destinati ad applicazioni distribuite di piccola taglia per il settore residenziale.

Radiometro ENEA per la misura del flusso solare concentrato in collettori parabolici lineari

In continuità con l'attività svolta nella precedente annualità, presso il Laboratorio solare del Centro Ricerche ENEA di Trisaia, è stato messo a punto un dispositivo totalmente automatizzato per la misura della distribuzione angolare e longitudinale della radiazione solare concentrata sul tubo ricevitore di un collettore parabolico lineare per applicazioni a media temperatura. Le principali caratteristiche del dispositivo sono le seguenti:

- struttura portante realizzata in lega leggera costituita da diversi sottosistemi elettro-meccanici necessari per il montaggio e la movimentazione del dispositivo quali: il sistema di serraggio autocentrante per l'adattamento ai diversi diametri del tubo ricevitore; il sistema di trasmissione del moto lineare ed il sistema di rotazione del sensore;
- azionamenti di precisione realizzati con riduttori epicicloidali del tipo a stepper;

- interfaccia hardware, realizzata su piattaforma Arduino con interfaccia Xbee per la trasmissione a distanza, utilizzata per l'acquisizione dei segnali provenienti dal sensore HFM per la misura della radiazione solare concentrata e per il controllo degli azionamenti da trasmettere via *wi-fi* ad un computer remoto;
- controllore logico con relativo firmware *customizzato* installato a bordo del dispositivo;
- sistema di alimentazione a batteria con relativo circuito di ricarica;
- software dedicato per la gestione remota del dispositivo che consente, attraverso un PC portatile, il controllo completo di tutte le fasi operative del dispositivo.

La Figura 432 mostra il sistema nel suo complesso con alcuni dettagli relativi alle meccaniche di precisione messa a punto per garantire i movimenti rotazionali e traslatori con le precisioni richieste (posizionamento angolare con precisione inferiore ad 1/10 di grado e velocità di rotazione dell'ordine di 1 rad/s; posizionamento longitudinale con precisione inferiore ad 1 mm e spostamenti programmabili).

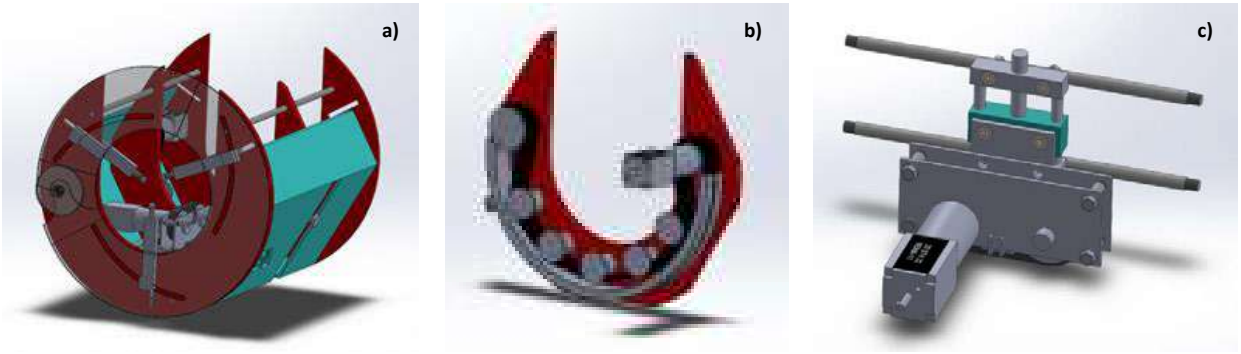


Figura 432. a) Immagine del dispositivo nel suo complesso; b) Dettaglio della meccanica per l'azionamento rotatorio del micro-sensore di misura; c) Dettaglio della meccanica per l'azionamento traslatorio del dispositivo

Il dispositivo è infine equipaggiato con un micro-sensore Vatell HFM-7E/L con sonda RTD per la misura del flusso solare concentrato (Figura 433).



Sensore HFM (Heat Flux Microsensor)
- Tempo di risposta: 17 µs
- Sensibilità minima: 150 µV/(W/cm²)
- Massima temperatura superficiale: 350 °C
- Materiale sensore: nichel-cromo/costantana
- Misura della temperature superficiale: mediante RTD integrata
- Accuratezza: ±3%
- Ripetibilità: 2%
- Cassa di contenimento del sensore: rame / ottone
- Cavo: con rivestimento in Teflon per alte temperature

Figura 433. Sensore di flusso termico Vatell HFM-7E/L con sonda RTD per la misura della temperatura superficiale

<u>Misura diretta del flusso solare concentrato su superficie piana</u>

In continuità con l'attività svolta nella precedente annualità, presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova sono state condotte attività di ricerca per la progettazione e la realizzazione di un dispositivo per la mappatura del flusso solare concentrato in collettori solari dotati di ricevitori piani. In particolare, il tema centrale dell'attività di ricerca è stato la misura diretta della radiazione solare concentrata e la sua distribuzione su superfici a geometria piana.

Problematiche di misura del flusso solare concentrato

La caratterizzazione della distribuzione del flusso solare concentrato è un aspetto cruciale in tutte le tecnologie solari a concentrazione indipendentemente dal sistema di ricezione. I collettori solari termici o fotovoltaici a concentrazione sono costituiti da un sistema ottico di tipo riflettente e/o rifrangente detto propriamente concentratore atto a far convergere i raggi solari in una regione in cui viene installato un ricevitore che permette la conversione del flusso solare concentrato in potenza termica o elettrica. A seconda delle caratteristiche geometriche e ottiche del concentratore, si distinguono sistemi a concentrazione in cui la regione di concentrazione è idealmente costituita da un punto oppure da una linea. Nella pratica, la regione in cui viene

concentrata l'irradianza solare incidente sul concentratore è costituita da un'area in conseguenza di diversi fattori di non idealità dei collettori a concentrazione. In primo luogo, la superficie del concentratore differirà da una superficie ideale per la presenza di errori di forma geometrica e da errori ottici che accompagnano la riflessione e la trasmissione della radiazione solare diretta. In secondo luogo, saranno inevitabilmente da considerare errori nel posizionamento e nell'allineamento del ricevitore nella regione di concentrazione e le non idealità del processo di assorbimento della radiazione solare sulla sua superficie. Inoltre, ad eccezione dei collettori aventi un rapporto di concentrazione indicativamente inferiore a 3-4 che ne sono privi, un ulteriore fattore di non idealità è rappresentato dal sistema di inseguimento, che consente la movimentazione del concentratore (più raramente del ricevitore) per mantenere la zona di concentrazione al variare delle coordinate solari di azimuth e zenith. Infine, è necessario considerare che il disco solare ha una dimensione finita e che quindi i raggi che raggiungono l'area di apertura di un concentratore non sono paralleli. La modellizzazione del sole per lo studio delle prestazioni di un collettore solare a concentrazione è definita attraverso la forma solare (sunshape) che rappresenta la distribuzione angolare dell'intensità solare. La forma solare tiene conto non solo della dimensione del disco solare ma anche di una regione circumsolare ed ha una grande influenza sulle prestazioni del sistema a concentrazione.

In conseguenza di tutti questi fattori di non idealità, nella regione di concentrazione e quindi sul ricevitore, la distribuzione del flusso concentrato è molto lontana dall'essere uniforme. La misura del flusso totale concentrato incidente sulla superficie assorbente di un ricevitore assume una grande importanza per la valutazione delle prestazioni ottiche del concentratore e per monitorarne l'andamento nel tempo. Grazie a quest'analisi, prendendo ad esempio un collettore solare parabolico a concentrazione lineare, è possibile valutare la bontà del sistema di ancoraggio degli specchi riflettenti del concentratore sul sistema di sostegno, la durabilità nel tempo del coefficiente di riflessione degli stessi, la variazione di precisione del sistema di inseguimento e variazioni sul posizionamento del ricevitore.

La misura del flusso termico concentrato e della sua distribuzione nella regione di concentrazione è fondamentale per una progettazione accurata del ricevitore e per ottenere delle buone prestazioni. Una distribuzione fortemente non uniforme del flusso concentrato su un ricevitore fotovoltaico comporta, ad esempio, una penalizzazione del rendimento di conversione della radiazione solare in energia elettrica. Nei collettori solari termici, una distribuzione di flusso non uniforme è associata a gradienti di temperatura che possono dare luogo a stress termici e hot spots che, a loro volta, possono pregiudicare la stabilità meccanica dell'assorbitore, degradare il rivestimento selettivo dell'assorbitore e ridurre il rendimento del sistema. Infine, la misura del flusso concentrato e della sua distribuzione dà la possibilità di calcolare alcuni parametri per il confronto delle prestazioni di ricevitori diversi installati sullo stesso concentratore.

Obiettivo primario della ricerca è la definizione di una possibile metodologia sperimentale per determinare il fattore di intercettazione, la dimensione dell'immagine solare e il rendimento ottico di un concentratore, considerando una regione di concentrazione a geometria piana.

I requisiti generali che dovrebbero caratterizzare un sistema sperimentale per la misura del flusso concentrato sono la garanzia della massima sicurezza operativa e una stabilità adeguata alle temperature d'esercizio. Per realizzare un'analisi solida, è importante che i risultati ottenuti abbiano una bassa incertezza sperimentale di misura e che la tecnica di misura sia affidabile e facilmente adottabile ed implementabile almeno per lo stesso tipo di collettori solari a concentrazione studiati. Il sistema deve presentare una bassa sensibilità ai carichi operativi ed alle condizioni ambientali, come ad esempio la presenza di vento, polveri o l'esercizio in presenza di elevata umidità dell'aria. Da non trascurare sono gli aspetti economici: investimento iniziale, costi di manutenzione e esercizio dovranno essere il più possibile contenuti.

I metodi sperimentali per la misura del flusso concentrato si dividono principalmente in sistemi diretti e indiretti. Nella categoria dei metodi diretti, si fa uso di sensori di misura in grado di fornire un segnale elettrico di risposta direttamente associabile alla radiazione incidente sulla loro superficie, come radiometri e calorimetri. A seconda dell'area di apertura del dispositivo di misura, è possibile ottenere il flusso incidente sulla totale area di concentrazione oppure un valore pressoché puntuale del flusso concentrato all'interno della regione di concentrazione. Quest'ultimo caso è particolarmente interessante perché permette di ottenere la distribuzione del flusso concentrato sull'elemento assorbente. Le due principali metodologie prevedono l'utilizzo di più sensori distribuiti all'interno della regione di concentrazione o l'installazione di sensori in sistemi di movimentazione. Nel caso del sistema a più sensori distribuiti, si rende necessario un numero molto elevato di sensori per garantire un'accettabile accuratezza dei risultati. Questo comporta elevati costi di investimento iniziale. Con riferimento alla seconda, la progettazione del sistema di alimentazione deve essere adattata alle caratteristiche geometriche e funzionali del collettore a concentrazione considerato, ma, una volta ottenuto un sistema in grado di scorrere rapidamente l'intera regione di interesse in prossimità del fuoco, è possibile ottenere molti valori sperimentali del flusso concentrato ed abbassare l'incertezza della mappatura finale.

Nei metodi indiretti, sono generalmente impiegate camere ad accoppiamento di carica poste lontano rispetto alla regione di concentrazione e dotate di filtri adatti alla visualizzazione di immagini del profilo della flusso solare concentrato su obiettivi collocati nella regione focale. Molto spesso questi sistemi sono calibrati utilizzando un sistema diretto di misura del flusso. Infine, recentemente, è stata proposta una nuova metodologia per lo studio delle prestazioni ottiche del ricevitore e che consiste in un analisi numerica tramite software di raytracing validata attraverso misure sperimentali del flusso concentrato effettuate solo in piccole porzioni della regione di concentrazione che si intende analizzare.

Apparato sperimentale e risultati ottenuti

In questo lavoro, si analizzano le prestazioni ottiche di un concentratore parabolico asimmetrico a fuoco lineare installato presso il Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare (Figura 434) situato sul tetto del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova. L'area di apertura del concentratore è una porzione di cilindro parabolico che si estende dalla linea dei vertici fino al bordo degli specchi. La superficie riflettente del concentratore è costituita da quattro specchi a alto coefficiente di riflessione disposti su due file. Questa particolare geometria porta ad individuare una larghezza di apertura di 2,9 m, un angolo di bordo di 78,8° ed una lunghezza focale di 1,81 m. La lunghezza del concentratore è pari a 2,4 m, tuttavia nella presente analisi si considera lo studio del flusso concentrato da una sola fila di specchi e quindi si considera una lunghezza del concentratore di 1,2 m. Il concentratore è dotato di un sistema di inseguimento solare a due assi: questo garantisce che l'irradiazione normale diretta sia incidente in maniera normale rispetto all'area di apertura del concentratore. Il sistema di movimentazione dell'inseguitore è gestito da un algoritmo basato sulle equazioni per il calcolo della posizione solare per la fase di avvicinamento e da un sensore di luminosità con cui si raggiunge il posizionamento ottimale del sistema con il sole.



Figura 434. Concentratore e sistema di misurazione - Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare, Università di Padova

Il sistema di misura della radiazione solare comprende un pireliometro Kipp&Zonen CHP1 montato su un inseguitore solare ad elevata precisione ed è impiegato per la misura della radiazione solare diretta (DNI). La misurazione della DNI è fondamentale in quanto costituisce l'input energetico dei sistemi solari a concentrazione. Conoscendo il valore di DNI e area di apertura del concentratore, è possibile stabilire il valore di potenza termica dei raggi solari che incontrano la superficie riflettente.

Analizzate le problematiche inerenti all'applicazione oggetto dell'attività di ricerca, si è deciso di adottare un microsensore di flusso termico (HFM) per la misura diretta del flusso concentrato. I microsensori di flusso termico sono dotati di una termopila realizzata attraverso la tecnologia di sputtering di film sottili. La termopila in genere è realizzata utilizzando la coppia termoelettrica rame-costantana e viene utilizzata per misurare la differenza di temperatura attraverso un sottilissimo strato di monossido di silicio oppure di nitruro di alluminio, sempre realizzato tramite sputtering, che funge da resistenza termica. Il sensore è in grado di misurare flussi termici trasmessi mediante tutti e tre i meccanismi (conduzione, convezione ed irraggiamento). Nelle applicazioni in concentratori solari, la faccia dello strumento esposta al flusso termico può essere dotata di un rivestimento ad elevato coefficiente di assorbimento. Nel complesso, l'intero sensore ha uno spessore di meno di 2 µm, pertanto la costante di tempo è molto bassa e pari a 300 µs per sensori dotati di rivestimento ad alto coefficiente di assorbimento. Questo implica che è possibile ottenere una mappatura del flusso solare concentrato in un intervallo di tempo molto breve, nella misura in cui si dispone di un sistema di acquisizione dati in grado di garantire una adeguata frequenza di campionamento. I microsensori di flusso termico possono lavorare con temperature sulla faccia frontale fino a 800 °C e senza sistema di raffreddamento. Il loro range di misura del flusso termico si estende a partire da 1 kWm^{-2} e, in pratica, non ha limite massimo. Dal momento che la conduttività termica dello strato che funge da resistenza termica varia in funzione della temperatura, nello strumento è integrato un sensore di misura della temperatura, che può essere una termocoppia o una termoresistenza a film sottile di platino. Dall'analisi sulle tecnologie disponibili è stato selezionato il microsensore Vatell HFM-7E/L dotato di termoresistenza al platino integrata con un'accuratezza dichiarata dal costruttore di ± 3%.

Il sensore è montato su un sistema di movimentazione progettato e realizzato un sistema ad hoc (Figura 435). Infatti, la particolare asimmetria dell'elemento ottico del concentratore implica che il piano di misura sia inclinato di 45° rispetto al piano contenente la linea focale e la normale all'area di apertura del concentratore. Il sistema di misura si compone pertanto di un impianto semiautomatico di movimentazione su due assi a velocità variabile sul quale è montato il sensore di flusso termico. L'asse orizzontale, disposto lungo la linea focale, è folle, mentre il

sensore viene spostato lungo il piano di misura inclinato di 45° attraverso un attuatore elettrico lineare, con una precisione di posizionamento di 0,1 mm.



Figura 435. Sistema di movimentazione del sensore e collegamenti del circuito di raffreddamento del sensore e particolare del sensore montato sulla testa dell'attuatore elettrico lineare

Per diminuire la dipendenza dalle condizioni termiche dell'ambiente esterno, il sensore HFM-7E/L è inserito in un corpo in rame raffreddato. L'utilizzo del corpo raffreddato è particolarmente indicato per applicazioni con lunghi tempi di misura o per sensori (a) interessati da flussi termici particolarmente intensi. Inoltre, se la temperatura del fluido di raffreddamento del sensore (acqua distillata) è prossima alla temperatura dell'aria dell'ambiente circostante, è possibile minimizzare gli effetti della convezione sulla misura del flusso solare concentrato, senza ricorrere a sensori dotati di copertura vetrata, che presentano un angolo di accettazione del flusso incidente molto limitato.

Una volta effettuata la scelta del sensore per la misura diretta del flusso solare concentrato e progettato il sistema di movimentazione lineare a due assi è stato possibile analizzare la distribuzione di flusso concentrato su una superficie piana. Acquisiti i dati sperimentali, si è valutata la dimensione dell'immagine solare prodotta a cavallo della linea focale. Utilizzando un opportuno metodo di interpolazione dei dati ed integrando la distribuzione di flusso così ottenuta sulla totale superficie del ricevitore piano, si è calcolata la potenza incidente sulla superficie piana di interesse.

La misura del flusso concentrato e della sua distribuzione dà la possibilità di calcolare alcuni parametri per il confronto delle prestazioni di diversi ricevitori installati sullo stesso concentratore. Nel caso di un concentratore parabolico lineare, il rendimento ottico di picco si riferisce alla condizione in cui i raggi solari incidenti sono normali rispetto all'area di apertura del concentratore ed è ottenuto dal prodotto tra coefficiente di riflessione degli specchi, fattore di intercettazione, coefficiente di assorbimento del rivestimento selettivo sul ricevitore e coefficiente di trasmissione della copertura vetrata del ricevitore qualora presente. Il fattore di intercettazione rappresenta il rapporto tra la potenza che raggiunge la superficie dell'assorbitore e la potenza riflessa dagli specchi. Questo parametro può essere determinato sperimentalmente misurando il flusso concentrato, noti il coefficiente di riflessione degli specchi e la irradiazione normale diretta sugli stessi, e tiene conto di tutte le cause di non idealità che si incontrano durante il reale utilizzo di un concentratore. Nel presente lavoro, i risultati sperimentali ottenuti sono stati confrontati con i risultati ottenuti tramite un software di ray-tracing basato sul metodo Monte Carlo.

Le attività condotte nella presente annualità hanno consentito di mettere a punto due diversi dispositivi per la mappatura del flusso solare concentrato in collettori solari a concentrazione dotati sia di ricevitori a geometria cilindrica sia di ricevitori piani. Tali dispositivi consentiranno di acquisire una serie di informazioni utili a caratterizzare sperimentalmente le efficienze ottiche di diverse tipologie di concentratori da utilizzarsi in applicazioni solari termiche a media temperatura nei settori civile ed industriale.

I risultati sono documentati e dettagliati nei rapporti RdS/PAR2014/233 e RdS/PAR2014/234.

c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione

L'attività prevede la progettazione, realizzazione, messa in funzione e quindi l'analisi sperimentale del funzionamento di pompe di calore elettriche di nuova generazione, che utilizzano fluidi refrigeranti a basso impatto ambientale.

c.1 Test in camera climatica di un prototipo di PDC ad R744 reversibile (caldo/freddo) dotato di un eiettore per il recupero dell'energia di espansione: potenzialità 30 kW

La presente attività di ricerca ha avuto come obiettivo la realizzazione e l'analisi di test di una pompa di calore reversibile con eiettore di taglia 30 kW operante con fluido refrigerante R744 al fine di determinarne le prestazioni al variare delle condizioni al contorno (temperatura dell'ambiente, portata e temperature dell'acqua).

L'attività si è articolata nelle seguenti fasi:

- predisposizione dell'impianto "Calorimetro ENEA", sito presso il C.E. ENEA Casaccia per l'esecuzione di test su una macchina di elevata potenza termica (30 kW) con ridotto salto termico allo scambiatore ad acqua;
- esecuzione della campagna sperimentale del prototipo, sia in regime invernale (modalità pompa di calore), sia in regime estivo (modalità macchina frigorifera);
- elaborazione dei dati sperimentali;
- analisi dei risultati per il calcolo dei parametri di prestazione a carico parziale e stagionale in accordo con le normative vigenti;
- interpretazione dei risultati al fine della valutazione dell'impatto ambientale diretto e indiretto nel caso di impiego di tali macchine nella climatizzazione residenziale.

La principale innovazione sulla macchina utilizzata per l'attività di ricerca riguarda l'impiego di un eiettore a geometria fissa come organo di laminazione. L'attività sperimentale ivi descritta è stata condotta a seguito di una fase di dimensionamento dell'eiettore e di progettazione sia dei componenti che dei sistemi di regolazione e controllo dei flussi termodinamici in modo da garantire il funzionamento della macchina in condizioni stazionarie. Nel seguito sono descritti, in particolare, il funzionamento dell'eiettore in un ciclo frigorifero transcritico a R744, l'impianto sperimentale "Calorimetro Enea", la metodologia di prova, i criteri con i quali si è definita la matrice di prova in accordo alle normative di riferimento ed infine sono mostrati i principali risultati sperimentali ottenuti.

Uso dell'eiettore nelle macchine frigorifere

Durante l'espansione di un refrigerante in un processo di laminazione possono verificarsi dissipazioni consistenti di energia per l'incremento degli attriti conseguenti all'aumento dell'energia cinetica del fluido. Tale incremento dell'energia cinetica dipende, in una macchina frigorifera, dalla differenza tra la pressione di condensazione e quella di evaporazione. Nei circuiti operanti con fluidi frigorigeni tradizionali tale differenza di pressione è limitata. Quindi si utilizzano degli organi di laminazione meccanicamente semplici e poco costosi, trascurando la piccola perdita energetica connessa con la trasformazione termodinamica di espansione.

Le macchine ad anidride carbonica invece operano con differenziali di pressione tra gas cooler ed evaporatore nettamente superiori a quelli di un impianto tradizionale, in quanto, a causa delle caratteristiche termodinamiche di questo fluido (bassa temperatura critica, 31 °C, ed elevata pressione critica, 73,8 bar) la CO_2 supercritica viene espansa allo stato subcritico.
Questo comporta un'elevata perdita energetica durante la laminazione; si presenta quindi la necessità di ridurre le perdite di laminazione, in particolare in macchine di elevata potenzialità termica. Tra le possibili soluzioni proposte (per esempio espansione in più stadi, recupero del lavoro di espansione con componenti dotati di organi in movimento, ecc.) l'impiego di un eiettore come organo di laminazione rappresenta una interessante possibilità, in virtù del basso costo e dell'assenza di parti in movimento.

Struttura e funzionamento di un eiettore

L'eiettore (Figura 436) è una speciale pompa che sfrutta l'effetto Venturi (caso particolare del principio di Bernoulli) prodotto da un ugello convergente - divergente per convertire l'energia posseduta da un fluido motore ad elevata pressione in energia cinetica.
Il fluido motore viene introdotto in un condotto convergente nel quale riduce la sua pressione a valori più bassi di quelli del fluido secondario e acquista energia cinetica. Ciò crea una zona di depressione che aspira il fluido secondario. Superata la zona della gola dell'eiettore e una zona di mescolamento a sezione costante, il fluido subisce una espansione nel tratto divergente del diffusore e la sua velocità si riduce, comportando un aumento della pressione della miscela in accordo con il principio di Bernoulli. Tale miscela viene poi avviata al compressore che lavora dunque con una pressione di aspirazione più elevata e quindi con un rapporto di compressione più basso.

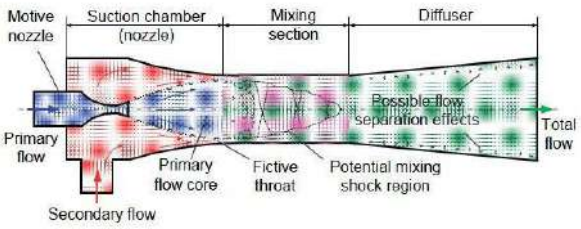


Figura 436. Rappresentazione schematica di un tipico eiettore a due fasi

L'eiettore si presenta come un unico componente suddiviso in tre zone particolari: zona di aspirazione; zona di miscelamento; zona di diffusione o diffusore. In ciascuna zona si identifica un certo effetto dovuto alla presenza di un ugello motore all'ingresso dell'eiettore e alla struttura del dispositivo stesso. Nella camera di aspirazione, infatti, s'identifica una sezione convergente, nella sezione di miscelamento il diametro della conduttura rimane costante e nel diffusore la sezione del condotto tende ad aumentare. Ciò permette di ottenere il processo molto complesso per cui due fluidi di alta e bassa pressione si miscelano e si portano ad una pressione intermedia.
Il funzionamento di base è il seguente:

1. il fluido guida (primary flow, in Figura 436) entra all'interno dell'ugello (motive nozzle) dove viene accelerato grazie alla sua particolare forma convergente e, in accordo all'effetto Venturi e al principio di Bernoulli, diminuisce la propria pressione.
2. una volta accelerato, il fluido (che ha diminuito la propria pressione) è immesso nella camera di aspirazione (suction chamber) di forma convergente e, grazie all'effetto Venturi, rende possibile il trascinamento del fluido secondario (secondary flow);
3. all'interno della zona di miscelamento (mixing section) a sezione costante i due fluidi si miscelano e scambiano fra loro una certa quantità di energia, permettendo di conseguenza al fluido secondario di essere accelerato grazie all'elevata quantità di moto di cui è caratterizzato il fluido primario.
4. la miscela entra, quindi, all'interno del diffusore (diffuser) di forma divergente, che permette di ridurre la velocità del fluido in uscita dall'eiettore e di aumentare in modo sensibile la pressione (in accordo con l'equazione di Bernoulli).

Solitamente per operare una regolazione della quantità di fluido motore da immettere all'interno dell'eiettore si posiziona un otturatore presso l'ugello di ingresso.

Un eiettore a due fasi è utilizzato in molti sistemi per il recupero dell'energia derivante dal lavoro di espansione, possibilità non sfruttata nei cicli frigoriferi nel momento in cui si impiegano le tradizionali valvole di laminazione. Per l'utilizzo dell'anidride carbonica con sistemi di questo tipo viene preso come riferimento il ciclo di Figura 437.

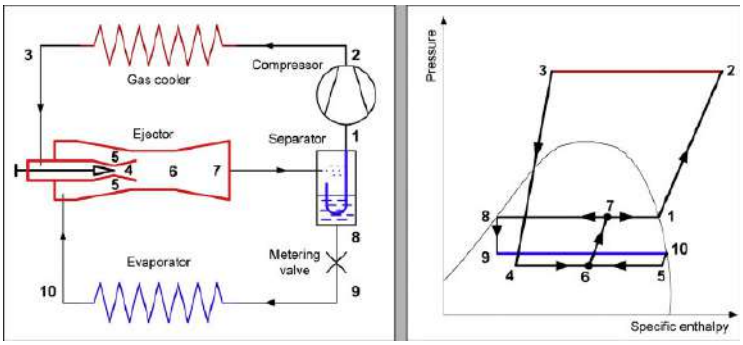


Figura 437. Ciclo transcritico per R744 che utilizza un eiettore a due fasi per il recupero del lavoro di espansione

Il ciclo frigorifero ideale è caratterizzato dal fatto che il vapore saturo, raccolto all'interno del separatore di liquido del circuito, viene spillato dal compressore e isoentropicamente compresso fino a pressione transcritica. All'interno del gas cooler, quindi, vi è uno scambio di calore che permette di raffreddare l'anidride carbonica, la quale entra nell'eiettore attraverso l'ugello convergente - divergente, che permette un aumento di velocità e successivamente un incremento di pressione al fluido: in questo modo per effetto Venturi l'espansione del fluido motore aspira all'interno dell'eiettore l'anidride carbonica in uscita dall'evaporatore. Anche in questo caso è possibile impiegare un ugello convergente che permette al fluido aspirato di essere pre-accelerato prima di miscelarsi con il fluido motore ad alta pressione. Nel momento in cui il fluido, derivante dal miscelamento del fluido motore e di quello aspirato, supera la linea di saturazione del liquido, inizia l'evaporazione e il cambio di stato all'interno dell'eiettore. Si ottiene, quindi, una portata a due fasi.

A seconda della geometria dell'eiettore è possibile il miscelamento a pressione costante o all'interno di una zona a sezione costante.

All'interno del diffusore il fluido a doppia fase viene espanso con un aumento della sua pressione. Si svolge, quindi, una conversione dell'energia cinetica in energia di pressione, la quale causa una compressione isoentropica della portata delle due fasi prima che essa entri nel separatore di liquido.

All'interno di questo dispositivo una frazione di fluido ritorna al compressore, mentre la parte rimanente allo stato liquido viene espansa isoentalpicamente con una riduzione della pressione da parte di una valvola di controllo, in modo che all'interno dell'evaporatore possa fluire una corretta portata di liquido.

L'evaporatore permette all'anidride carbonica in fase liquida di acquisire calore fornendo un certo effetto frigorifero.

Risultati dell'attività

Per la realizzazione di questa attività si è proceduto all'adeguamento dell' impianto sperimentale denominato "Calorimetro ENEA", per poter effettuare i test sperimentali su una pompa di calore di elevata potenza termica con bassi ΔT lato acqua secondo le normative di riferimento (UNI EN 14511-parte 2 e parte 3 e UNI EN 14825). Sono stati condotti test su un prototipo, funzionante con R744 (CO_2), in differenti condizioni di funzionamento, sia in regime invernale (modalità pompa di calore) che in regime estivo (modalità macchina frigorifera). Per ognuna delle singole prove sperimentali, sono stati elaborati e ridotti i dati, successivamente utilizzati per la stima delle prestazioni stagionali durante la climatizzazione estiva e invernale.

L'impianto "Calorimetro ENEA" allestito presso l'edificio F40 del C.R. ENEA Casaccia (Figura 438) consente di testare pompe di calore aria/acqua in accordo alla norma UNI-EN 14511 del novembre 2011. Tali test sperimentali, eseguiti secondo le condizioni di prova richieste dalla norma, permettono di valutare le prestazioni in una specifica condizione (COP per le pompe di calore ed EER per i refrigeratori di liquido) per poi calcolare gli indici stagionali SCOP e SEER, nonché rilasciarne la certificazione energetica.

Per il test di pompe di calore si deve poter disporre di condizioni al contorno stabili. Per l'ottenimento delle condizioni richieste sull'acqua, sono state realizzate opportune modifiche al preesistente circuito che produce e rende disponibile un idoneo flusso d'acqua a temperatura controllata.

Invece, per controllare la temperatura e l'umidità dell'aria avviata all'evaporatore ci si è avvalsi di una camera climatica (Tabella 130) all'interno della quale fosse possibile alloggiare i prototipi da testare.



Figura 438. Impianto Calorimetro ENEA e prototipo macchina a CO2 con eiettore in allestimento

Tabella 130. Principali caratteristiche della camera climatica

Calorimetro ENEA	
Produttore	Angelantoni
Dimensioni Interne	4,70 m [L] x 5,50 m [P] x 4,60 m [H]
Superficie utile	26 m^2
Volume utile	120 m^3
Temperatura di esercizio	-15°C ÷ 35°C
Umidità Relativa	10% ÷ 95% (controllata da 10°C a 35°C)
Velocità aria	< 1 m/s (UNI EN 14511-3:2011 Appendice A –A.1.2)
Potenza elettrica massima assorbita	80 kW
Potenza frigorifera massima smaltibile	50 kW

L'intero sistema della camera climatica è controllato da un sistema PLC implementato, creato e programmato dal produttore in modo che il tutto sia gestito in modo totalmente automatico.

L'impianto idronico consente di controllare e misurare la portata e la temperatura dell'acqua elaborata per mezzo di un apposito loop di cui si riporta lo schema d'impianto (Figura 439). I principali componenti dell'anello nella sua configurazione originale sono:

- serbatoio d'accumulo da 1000 litri dotato di resistenze elettriche da 7.5 kW ciascuna;
- gruppo Frigo Climaveneta da 8 kW frigoriferi con inverter a bordo;
- dry-Cooler Alpha-Laval da 60 kW termici con inverter a bordo;
- valvola miscelatrice a tre vie.

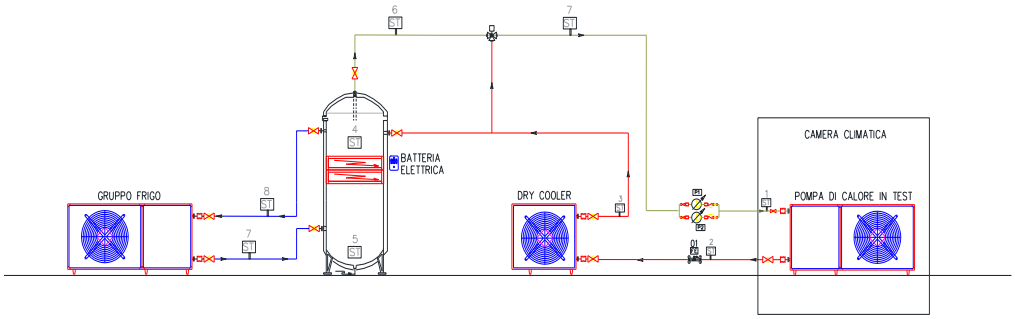


Figura 439. Schema dell'impianto idronico del"Calorimetro ENEA"

La preparazione dell'acqua in ingresso alla macchina in prova richiede la disponibilità di due sorgenti termiche, una calda ed una fredda. Per incrementare la flessibilità operativa del loop, gestito da un sistema di controllo completamente automatico si è progettato l'impianto in modo che la funzione di sorgente calda e di sorgente fredda possa essere svolta indifferentemente dal serbatoio d'accumulo e dall'acqua uscente dal dry-cooler. La valvola miscelatrice a tre vie provvede poi a miscelare opportunamente i flussi termici caldi e freddi.

Le principali modifiche apportate all'impianto idronico per consentire l'esecuzione dei test su un prototipo da 30 kW riguardano il montaggio di una seconda pompa di circolazione in parallelo a quella già installata in modo da poter contare su portate d'acqua maggiori, necessarie per l'esecuzione dei test con ΔT di 5°C. E' stata inoltre installata una valvola a due vie per regolare in maniera fine la portata, attraverso un ramo di ritorno al serbatoio di accumulo. Infine si è proceduti all'installazione di sistemi di miscelamento dell'acqua accumulata nel serbatoio in modo da avere una maggiore disponibilità nel tempo di un flusso di acqua a temperatura ancora più stabile e controllata.

La facility si avvale dei seguenti software:

- Ultrasite32, che consente di gestire l'anello idronico e di scegliere la modalità di funzionamento della macchina in prova (pompa di calore o macchina frigo), la velocità di rotazione del compressore della macchina in prova (qualora esso sia dotato di inverter), la fase di defrost della macchina in prova;
- Winkratos, che consente di gestire i valori di temperatura ed umidità relativa dell'aria in camera climatica. La camera può inoltre essere totalmente gestita anche tramite il pannello touch screen presente sul quadro elettrico;
- Labview attraverso il quale, una volta avviata la pompa di calore in prova, è possibile registrare i dati sperimentali con un programma realizzato su misura per ogni macchina in prova.

Per quanto riguarda la strumentazione, in accordo a quanto richiesto dalla norma UNI EN 14511-parte 3 si è provveduto all'utilizzo di termocoppie di tipo K e di tipo J e misuratori di pressione caratterizzati da un'elevata accuratezza, posizionandoli all'ingresso e all'uscita di ogni componente e di un misuratore di portata volumetrica lato acqua per il calcolo delle varie grandezze dirette ed indirette.

Modalità di esecuzione delle prove sperimentali

La matrice di prova è stata determinata in accordo alle normative di riferimento per il test di pompe di calore (UNI EN 14511-parte 3 e UNI EN 14825:2013). In particolare, i singoli test sono stati condotti seguendo le prescrizioni della normativa UNI EN 14511-parte 3, che prevede l'esecuzione delle seguenti fasi:

- Periodo di condizionamento, nel quale l'apparecchiatura di ricondizionamento della camera di prova e la pompa di calore sottoposta a prova devono essere azionate sino a ottenere le tolleranze di prova specificate nel prospetto 4 della norma per almeno 10 minuti;
- Periodo di equilibrio, che segue immediatamente il condizionamento e un periodo di recupero di 10 minuti che conclude il condizionamento;
- Periodo di raccolta dati, nel quale i dati sono stati campionati ogni 0,5 s.

Ogni prova è stata considerata stabile quando tutte le grandezze misurate si sono mantenute entro gli scostamenti ammissibili dai valori impostati, riportati nel prospetto 4 della stessa normativa.

Per il prototipo in esame, sono state testate condizioni di funzionamento in regime invernale, con $T_{in,w}$ comprese tra 30 e 40 °C, $T_{out,w}$ comprese tra 35 e 45 °C, per differenti temperature della camera climatica, T_{cc}, comprese tra -15 e 12 °C.

In modalità macchina frigorifera, invece, le diverse condizioni di funzionamento sono state con $T_{in,w}$ comprese tra 12 e 23 °C, $T_{out,w}$ comprese tra 7 e 18 °C, per differenti temperature della camera climatica, T_{cc}, comprese tra 20 e 35 °C.

Matrice di prova secondo le normative UNI-EN 14511 parte seconda e UNI-EN 14825

La matrice di prova è stata determinata in accordo alle normative di riferimento per il test di pompe di calore (UNI EN 14511-parte seconda e UNI EN 14825:2013). La norma UNI EN 14511-parte seconda definisce le condizioni di prova per il test di refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento degli ambienti. Per le nostre macchine aria-acqua, si è fatto riferimento ai prospetti 12 e 13 (test in modalità riscaldamento a bassa e media temperatura) e al prospetto 16 (test in modalità raffreddamento).

I tre prospetti indicati sono riportati sinteticamente nelle Tabelle 131-133.

Tabella 131. Test in accordo alla norma UNI-EN 14511-2 Unità aria/acqua. Modalità di riscaldamento (basse temperature)

	Scambiatore di calore esterno	Scambiatore di calore interno Applicazioni a bassa temperatura	
	Aria esterna - Temperatura di bulbo secco d'ingresso [°C]	*Temperatura d'ingresso [°C]*	*Temperatura d'uscita [°C]*
Condizioni di valutazione normalizzate	7	30	35
Condizioni di valutazione dell'applicazione	2	a)	35
	-7	a)	35
	-15	a)	35
	12	a)	35

a) Prova effettuata alla portata ottenuta durante la prova alle condizioni normalizzate

Tabella 132. Test in accordo alla norma UNI-EN 14511-2 Unità aria/acqua. Modalità di riscaldamento (medie temperature)

	Scambiatore di calore esterno	Scambiatore di calore interno Applicazioni a media temperatura	
	Aria esterna - Temperatura di bulbo secco d'ingresso [°C]	*Temperatura d'ingresso [°C]*	*Temperatura d'uscita [°C]*
Condizioni di valutazione normalizzate	7	40	45
Condizioni di valutazione dell'applicazione	2	a)	45
	-7	a)	45
	-15	a)	45
	12	a)	45

a) Prova effettuata alla portata ottenuta durante la prova alle condizioni normalizzate

Sulla macchina in prova si è provveduto inoltre ad eseguire i test in modalità di riscaldamento alta temperatura, ossia con temperatura dell'acqua in ingresso di 47°C ed in uscita di 55°C.

Tabella 133. Test in accordo alla norma UNI-EN 14511-2 Unità aria/acqua - Modalità di raffrescamento

	Scambiatore di calore esterno	Scambiatore di calore interno	
	Aria esterna - Temperatura di bulbo secco d'ingresso [°C]	Temperatura d'ingresso [°C]	Temperatura d'uscita[°C]
Condizioni di valutazione normalizzate	35	12	7
	35	23	18
Condizioni di valutazione dell'applicazione	27	a)	7
	27	a)	18

La norma UNI EN 14825 definisce le condizioni di prova per la valutazione delle prestazioni a carico parziale e per il calcolo del rendimento stagionale.

Per la valutazione dello SCOP in macchine aria-acqua, si deve far riferimento alle Tabelle 12-17 riportate nella norma. I test in condizioni "fixed outlet" riportati in queste tabelle corrispondono comunque a quelli condotti in accordo alla norma 14511 parte seconda, per cui non sono stati realizzati altri test.

Per la valutazione del SEER sono invece richiesti i test riportati nella tabella 4 della norma stessa. La Tabella 134 è una sintesi della tabella 4 della norma.

Tabella 134. Test per la valutazione del SEER in accordo alla tabella 4 della norma UNI-EN 14825

	Part load ratio %	Outdoor heat exchanger	Indoor heat exchanger	
		Air dry bulb temperature °C	Fan coil application Inlet/outlet water temperatures	
			Fixed outlet	Variable outlet
(35-16)/(Tdesignc-16)	100	35	12/7	12/7
(30-16)/(Tdesignc-16)	74	30	a/7	a/8.5
(25-16)/(Tdesignc-16)	47	25	a/7	a/10
(20-16)/(Tdesignc-16)	21	20	a/7	a/11,5

a. I test "fixed outlet" sono eseguiti alla portata definita nel test a carico totale, quelli "variable outlet" sono eseguiti a ΔT

Nella Tabella 135 si riportano alcuni dei risultati ottenuti durante i test richiesti dalla normativa per la determinazione delle prestazioni stagionali in modalità riscaldamento.

Tabella 135. Risultati dei test di riferimento per la valutazione dello SCOP - Modalità di riscaldamento

N	Nome test	T_{oCP} °C	T_{oEEV} °C	$T_{in,w}$ °C	$T_{out,w}$ °C	T_{amb} °C	p_{ev} bar	p_{iCP} bar	p_{oCP} bar	L_{el} kW	Q_w m3/h	COP -	Q_{GC} kW
1	Tin_30_Tout_35_Tcc7	94,3	-8,2	29,98	35,8	6,96	27,8	29,9	75,74	9,4	3,73	2,7	25,3
2	Tin_40_ Tout_45_Tcc7	110,9	-6,5	40,0	45,9	6,8	29,1	33,4	94,6	11,2	3,75	2,27	25,5
3	Tin_47_ Tout_55_Tcc7	109,4	-4,2	46,9	54,97	6,96	31,05	37,2	100,0	11,2	2,34	1,94	21,8

I dati mostrano come la pressione di aspirazione al compressore (p_{iCP} in tabella) risulti considerevolmente superiore alla pressione di evaporazione p_{ev} (da 2 a 6 bar circa di differenza). Questo conferma che l'utilizzo dell'eiettore consente al compressore di lavorare con un rapporto di compressione più basso e quindi con efficienze superiori. Ciò nonostante le prestazioni globali della macchina in termini di SCOP, riepilogati nella Tabella seguente, non sembrano raggiungere i valori attesi, probabilmente a causa di settaggi non ottimali di alcuni parametri di gestione del ciclo termodinamico, che influenzano negativamente le prestazioni degli altri componenti del circuito. Per esempio, con il set di eiettori utilizzati, la pressione di lavoro al gas-cooler non ha sempre corrisposto a quella necessaria al corretto funzionamento di questo componente.

Tabella 136. SCOPon e SCOPnet per i vari climi di riferimento per la pompa di calore con Tw,in=30°C, Tw,out=35°C (low temperature application), avendo indicato con "cp" il caso in cui si considerando i consumi del solo compressore e del carter e con "hp" il caso in cui vengono presi in considerazione i consumi totali (compressore, carter, ventilatori, pompa, quadro elettrico)

Low Temperature Application	Colder		Average		Warmer	
	cp	hp	cp	hp	cp	hp
SCOPon	1,91	1,91	2,14	1,96	2,76	2,48
SCOPnet	2,06	2,06	2,52	2,25	2,98	2,65

Tabella 137. SCOPon e SCOPnet per i vari climi di riferimento per la pompa di calore con Tw,in=40°C, Tw,out=45°C (medium temperature application), avendo indicato con "cp" il caso in cui si considerando i consumi del solo compressore e del carter e con "hp" il caso in cui vengono presi in considerazione i consumi totali (compressore, carter, ventilatori, pompa, quadro elettrico)

Medium Temperature Application	Colder		Average		Warmer	
	cp	hp	cp	hp	cp	hp
SCOPon	1,72	1,57	1,90	1,76	2,29	2,10
SCOPnet	1,81	1,63	2,16	1,95	2,42	2,19

Nella Tabella 138 invece sono mostrati alcuni dei risultati ottenuti nelle prove di riferimento per il calcolo del SEER.

Tabella 138. Risultati dei test di riferimento per la valutazione dello SCOP - Modalità di raffrescamento

N	Nome test	T_{oCP} °C	T_{oEEV} °C	$T_{in,w}$ °C	$T_{out,w}$ °C	T_{amb} °C	p_{ev} bar	p_{iCP} bar	p_{oCP} bar	L_{el} kW	Q_w m^3/h	COP -	Q_{EV} kW
1	Tin_12_Tout_7_Tcc35	97,1	1,2	12,16	7,0	34,8	36,0	40,8	93,7	8,3	2,37	1,7	14,0
2	Tin_23_Tout_18_Tcc35	84,3	12,0	22,95	18,0	35,1	47,5	52,5	100,4	8,76	3,28	2,15	18,93

Conclusioni

L'attività ha riguardato il test di un prototipo di macchina reversibile a CO_2, dotata di un complesso di eiettori come organo di espansione. La matrice di prova è stata determinata in accordo alla normativa vigente sui test per le pompe di calore e per le macchine per la refrigerazione di liquido (UNI EN 14511 parte 2 e UNI EN 14825:2013). L'elaborazione dei dati ha consentito di calcolare gli indici prestazionali stagionali (SCOP e SEER). La macchina provata presenta un alto grado di innovazione ed in particolare è stato dimensionato un gruppo eiettori che deve essere in grado di realizzare l'espansione del refrigerante in maniera ottimale sia nel funzionamento estivo che in quello invernale. Inoltre anche il surriscaldamento in aspirazione al compressore è stato gestito in maniera automatizzata dal controllore della macchina stessa. L'elevato numero di parametri da controllare ha reso però difficoltoso raggiungere il punto di funzionamento ottimale, causando così l'ottenimento di valori di SCOP e SEER non corrispondenti ai valori attesi. Si ritiene comunque che tali risultati siano da ritenersi altamente preliminari e che potranno essere migliorati considerevolmente anche senza modifiche strutturali alla macchina, ma semplicemente settando al meglio alcuni fondamentali parametri di funzionamento, quali ad esempio il surriscaldamento all'uscita dell'evaporatore oppure regolando in maniera ottimale la carica di refrigerante del circuito.

I risultati sono documentati e dettagliati nei rapporti RdS/PAR2014/235 e RdS/PAR2014/236.

d. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati

Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

L'ENEA durante questa annualità ha assicurato la partecipazione, quali rappresentanti italiani nell'ambito IEA, ai lavori dell'Implementing Agreement "Solar Heating and Cooling", in particolare alle TASK 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration" (attività nell'ambito della WGB-Numerical Modelling Session), Task 48 " Quality assurance and support measures for Solar Cooling", Task 51 "Solar energy and urban planning" e Task 53 "New Generation Solar Cooling & Heating Systems (PV or solar thermally driven systems)".

IEA SHC Task 48 "Quality assurance and support measures for Solar Cooling"

I lavori del task 48 si sono conclusi ad Aprile 2015. Il meeting finale si è svolto il 23-25 Marzo 2015 presso Sino-Italian Green Energy Lab (GEL) nel campus della Shanghai Jiao Tong University

Il lavoro ha riguardato prevalentemente lo svolgimento delle attività del Subtask A2 "Life cycle analysis at component level" e Subtask B3 "Life cycle analysis at system level", di cui l'Università di Palermo è stato leader.

La Subtask A2 ha avuto come obiettivo l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) per la valutazione delle prestazioni energetico-ambientali di componenti dei sistemi di *solar heating and cooling*. In dettaglio, nel corso dell'intero task, è stato svolto uno studio di LCA per il chiller Pink PC19 e sono stati aggiornati gli inventari di ciclo di vita, già realizzati nell'ambito della Task 38 dell'IEA, di due chiller ad assorbimento (PINK PSC-10 con H_20/NH_3 e SorTech AG ACS 08 con H_20/Silica Gel) e di altri componenti dell'impianto di *solar heating and cooling* (ad es. collettori solari termici, pompe, caldaia a gas, ecc.). I risultati ottenuti sono stati utilizzati per la compilazione di schede di sintesi che hanno consentito di realizzare un database di inventari di ciclo di vita e di impatti energetico-ambientali di materiali e componenti dei sistemi di *solar heating and cooling*.

La Subtask B ha avuto come obiettivo lo sviluppo di uno strumento di calcolo per LCA da utilizzare per la stima delle prestazioni energetico-ambientali e di indici di payback energetico-ambientali di differenti sistemi di *solar heating and cooling*.

Il tool, sviluppato in formato Excel, contiene i risultati degli studi di LCA realizzati nell'ambito della Task 38 e della Task 48 - Subtask A2 e rappresenta uno strumento utile e di semplice utilizzo per lo sviluppo di studi di LCA semplificati applicati ad impianti di *solar heating and cooling* localizzati in differenti contesti geografici.

In particolare, il tool consente di calcolare i seguenti indici di prestazione energetico-ambientale e di payback:

- Global warming potential (GWP);
- Primary energy consumption (PE);
- Energy payback time (EPT);
- GWP payback time (GWP-PT);
- Energy return ratio (ERR).

Inoltre, è possibile valutare:

- le fasi del ciclo di vita del sistema di *solar heating and cooling* responsabili dei maggiori impatti energetico-ambientali;
- per la fase di produzione del sistema, i componenti responsabili dei maggiori impatti energetico-ambientali;
- gli impatti energetico-ambientali di un sistema convenzionale che svolge la stessa funzione del sistema di *solar heating and cooling*;
- l'impatto evitato grazie all'utilizzo del sistema di *solar heating and cooling* in sostituzione di un sistema convenzionale.

Il tool è disponibile online sul sito del Task 48 (http://task48.iea-shc.org/tools), insieme a quattro esempi di applicazione. Esso è corredato di una dichiarazione di limitazione di responsabilità sul suo utilizzo, e può essere utilizzato sia da utenti esperti nel campo della LCA sia da utenti non esperti.

Il tool LCA è stato presentato al meeting del Task 48 tenutosi a Shanghai (Cina) dal 23 al 27 marzo 2015. Inoltre, al fine di divulgare il tool, è stato redatto un articolo che è stato pubblicato sugli atti della Solar Air Conditioning Conference tenuta a Roma il 24 e 25 settembre 2015, ed è stato inviato un abstract a SHC 2015 - International Conference on Solar Heating and Cooling for Buldings and Industry che si terrà a Istanbul (Turchia) dal 2 al 4 dicembre 2015.

IEA SHC Task 53 "New generation solar cooling & heating systems"

I risultati del IEA SHC Task 38 "Solar Air-Conditioning and Refrigeration" e dell'attuale IEA SHC Task 48 "Quality Assurance and Support Measures for Solar Cooling Systems" hanno mostrato un grande potenziale della tecnologia per il condizionamento degli edifici, specie nelle regioni calde e soleggiate e confermato che è necessario ulteriore lavoro per raggiungere una competitività economica usando non solo la fonte solare termica ma anche quella fotovoltaica. Un forte interesse verso una nuova generazione di sistemi di solar cooling associati alla generazione da fotovoltaico deriva dalla notevole espansione di quest'ultima tecnologia. L'accoppiamento della tecnologia PV a quella delle macchine frigo a compressione potrebbe portare a significative riduzioni dei costi dei sistemi di solar cooling. Tuttavia questa reale integrazione è ancora ai primi passi. Sono inoltre di particolare interesse i sistemi cosiddetti ibridi in cui la fonte solare è utilizzata sia termicamente che elettricamente.

Il task ha quindi lo scopo di:

- analizzare l'interesse verso una nuova generazione di solar cooling and heating "concepts" (sia PV, che termici che ibridi), selezionare le migliori soluzioni che portino a sistemi altamente affidabili, durevoli, efficienti e robusti
- contribuire all'ingresso nel mercato di una nuova generazione di sistemi e di identificare i mercati più promettenti in termini di competitività del costo dell'energia elettrica.

Il gruppo DEIM dell'Università di Palermo ha in carico la leadership dell'attività A5: LCA and techno-eco comparison between reference and new systems. Questa attività si concentra sul confronto tecnico-economico e ambientale fra tutti i sistemi studiati nell'ambito del subtask A e dei sistemi di riferimento.

Con riferimento al confronto ambientale, questo sarà effettuato con l'applicazione della metodologia LCA. In dettaglio, qualora vi sarà la disponibilità di dati, saranno effettuati degli studi dei sistemi di *solar heating and cooling* esaminati nell'ambito del sub task A. Al fine di collezionare i dati necessari ad effettuare la LCA è stato predisposto un format di raccolta dati in accordo alle norme UNI EN ISO 14040, UNI EN ISO 14044, e UNI EN ISO 15804.

Allo stato attuale, sono in corso di svolgimento gli studi di LCA di un'unità di trattamento aria e del sistema FREESCOO, che un sistema innovativo e compatto sistema di climatizzazione alimentato ad energia solare, con funzioni di deumidificazione, raffreddamento ed integrazione al riscaldamento, per applicazione nel settore della climatizzazione degli edifici in ambito residenziale e commerciale.

Gli studi sviluppati saranno utilizzati per aggiornare il tool LCA realizzato nell'ambito del Task 48. Inoltre, sarà sviluppata un'analisi di studi di letteratura sugli impianti di *solar heating and cooling*, che saranno sintetizzati

tramite l'utilizzo di un format già sviluppato nell'ambito del Task 38.

Nell'ambito del subtask A saranno definiti degli indicatori di prestazione dei sistemi in esame, che saranno calcolati e selezionati dalla letteratura e dalla esperienza pratica degli esperti del Task e dai players industriali.

Un primo milestone **report "**M-A5 LCA and techno-eco comparison between reference and new systems**"** è stato pubblicato e approvato.

Attualmente è in corso di svolgimento un'analisi delle etichette ambientali che sono state sviluppate a livello europeo, al fine di individuare gli indicatori ambientali per la descrizione delle prestazioni dei sistemi in esame. Saranno inoltre definiti indicatori sia qualitativi che quantitativi che descrivano le caratteristiche tecniche, economiche ed energetiche dei suddetti sistemi. Al fine di individuare un set di indicatori anche in accordo ai tre pilastri della sostenibilità, saranno definiti degli indicatori di tipo sociale.

UNIPA sarà inoltre coinvolta nelle attività C2 "System description for field test and demo project" e C3 "Monitoring data analysis on technical issues & on performances".

IEA SHC Task 42-Annex 24 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration"

La partecipazione ha avuto come obiettivo lo sviluppo di algoritmi e strumenti per migliorare le prestazioni di pannelli fotovoltaici mediante l'utilizzo di sistemi di accumulo termico. Per tale ragione il gruppo di ricerca del DEIM ha partecipato a diversi Expert meeting della attività della TASK-42.

L'ultimo anno ha previsto lo studio e l'approfondimento di alcune soluzioni analitiche largamente impiegate nella bibliografia di settore al fine di migliorare le prestazioni dell'algoritmo alle differenze finite presentato nelle precedenti riunioni. L'algoritmo in oggetto è infatti capace di modellizzare il flusso termico dinamico attraverso una parete multistrato in presenza di materiale cambiamento di fase, sia mediante metodo implicito che mediante metodo esplicito ed è stato oggetto di numerose pubblicazioni scientifiche.

In generale, gli studi basati sull'utilizzo del PCM come sistema di accumulo termico nei componenti edilizi e nei sistemi fotovoltaici hanno comunque riscontrato basse prestazioni energetiche legate principalmente alla bassa conduttività termica propria dei PCM puri (es. la paraffina ha una conduttività di circa 0,2 W/mK).

Sempre nel campo dell'accumulo termico si è inoltre iniziato a studiare l'utilizzo di olio vegetale esausto come sistema di accumulo termico nei collettori solari termici. L'olio esausto, se disperso nell'ambiente, può essere molto inquinante ma se recuperato correttamente può essere fonte di vantaggi economici e ambientali e promuovere sistemi innovativi per produrre energia termica ed elettrica. Per tale ragione il gruppo del DEIM ha deciso di investigare un sistema di accumulo termico innovativo basato sull'utilizzo di olio vegetale esausto. L'idea prevede lo studio numerico del bilancio termico del sistema collettore solare-olio esausto e la progettazione di una test facility da installare presso il laboratorio solare del DEIM.

IEA SHC Task 51 "Solar energy and urban planning"

La International Energy Agency (IEA), nell'ambito del programma Solar Heating and Cooling (SHC), a maggio 2013 ha lanciato la Task 51 "Solar Energy in Urban Planning", che sarà operativa fino ad aprile 2017 (www.task51.iea.shc.org).

La Task 51 include lo studio di tematiche legate all'impiego delle tecnologie solare, in particolare in riferimento a: 1. *Sviluppo di nuove aree urbane*; 2. *Sviluppo di aree urbane esistenti*; 3. *Paesaggi sensibili o protetti (campi solari)*. In tutti e tre i campi appena menzionati, si farà riferimento sia al solare fotovoltaico che al solare termico.

Il lavoro è stato strutturato in quattro principali temi, analizzati in diversi sottogruppi di ricerca, chiamati subtasks:

A. *Quadro di riferimento normativo, barriere ed opportunità per l'impiego dell'energia solare*;
B. *Sviluppo di processi, metodi e strumenti*;
C. *Casi studio e ricerche attive (problematiche legate all'implementazione, metodi/strumenti/processi sperimentali, dimostratori (ad esempio Net ZEB, Net ZEC)*;
D. *Educazione e disseminazione*.

Il principale contributo fornito dall'ENEA si colloca sull'argomento 3 (Sensitive/protected landscapes - solar fields), in relazione alle attività della ST B, e della ST C.

Le principali attività del Subtask B (*Processes, methods and tools)*, sono: individuare tra processi e strumenti di supporto esistenti (conoscenza, metodi, strumenti) quei fattori che consentono processi decisionali per l'impiego dell'energia solare nella pianificazione urbana, e rendere chiari quali siano gli elementi di sviluppo; sviluppare nuovi processi di pianificazione urbana o migliorare quelli esistenti, per facilitare l'impiego di strategie solari

passive ed attive nelle strutture urbane, nel caso del nuovo, del preesistente e in paesaggi sensibili o protetti; sviluppare nuovi strumenti di supporto/migliorare quelli esistenti (conoscenza, metodi, strumenti) e mostrare come linee guida che riguardino l'impiego di tecnologie solari attive e passive possano essere integrate in nuovi o esistenti strumenti di supporto, individuando anche la adeguata fase del processo di pianificazione in cui il solare vada inserito.

Le principali attività del Subtask C *Case studies and action research* (la cui principale finalità è quella di favorire la replicabilità di pratiche di successo) sono: coordinare un archivio di casi studio, buone pratiche e casi di successo, trasversalmente ai vari argomenti trattati nel Subtask; lanciare e gestire azioni di ricerca in ciascuno dei paesi partecipanti; facilitare e documentare lo sviluppo e la sperimentazione di strumenti di supporto e modelli processuali almeno in una città in ciascuno dei paesi partecipanti, coordinando questa azione con i decisori locali.

La partecipazione dell'ENEA al Task 51 segue al lavoro svolto in altri contesti di ricerca nei quali l'ENEA è stata attiva negli scorsi anni, oltre che l'esperienza maturata grazie all'organizzazione di eventi scientifici e conferenze tematiche. In particolare, l'ENEA ha partecipato alla ricerca condotta in seno al gruppo IEA SHC Task 41 "Solar Energy and Architecture" (www.task41.iea.shc.org), e all'IEA SHC-EBC Task 40 "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" (www.task40.iea.shc.org). Inoltre, dal 2011, è responsabile, nell'ambito di un Memorandum of Understading con la European Commission, JRC, per l'organizzazione scientifica di un evento speciale della European Photovoltaic Solar Energy Conference, chiamato Photovoltaics | Forms | Landscapes, che affronta l'argomento del design del fotovoltaico alla scala del paesaggio (www.pv-landscapes.com).

Nel corso dell'anno è stato possibile strutturare un ristretto gruppo di studio interessato alle tematiche del paesaggio all'interno del Task 51. Si tratta di soggetti provenienti da organizzazioni scientifiche (Università de La Reunion, FR), e imprese private operanti nel campo del solare (Akuo Energy, FR, Green Power Labs, CA).

Nell'ambito di questo sottogruppo (di cui ENEA è leader) sono state previste le seguenti attività:

1. strutturazione di una matrice per raccogliere dati di progetto (sensitive landscape project data form), con l'obiettivo di raccogliere dati spaziali e progettuali di supporto alle decisioni ed alla valutazione, Tali dati comprendono: conformazione del paesaggio, caratteristiche del campo solare, connettività, considerazioni ambientali;
2. strutturazione di criteri che consentano a partire dalla matrice sopra descritta, di fissare obiettivi di qualità ambientale ed ecosistemica;
3. sviluppo di un sistema di informazioni di base finalizzato alla elaborazione di un sistema GIS per l'analisi di un certo paesaggio e la valutazione della sua propensione all'inserimento delle tecnologie solari. Tale strumento dovrebbe costituire un primo agile strumento di supporto alla progettazione.

Nel quadro del Task 51 tra l'ottobre 2014 ed il settembre 2015 sono stati analizzati diversi casi studio italiani, prendendo contatti con autorità e soggetti locali (ad es. CIPNES Gallura - Consorzio Industriale Provinciale Nord Est Sardegna - Gallura), organizzazioni varie, ed imprenditori (REM, Revolution Energy Maker). Per alcuni di questi è stato possibile selezionare informazioni approfondite ed adeguate alla presentazione nell'ambito del Task. Tali casi studio consentono di elaborare strategie e strumenti per il controllo del progetto ecologico degli impianti solari di grande scala. Sono stati presi contatti anche con l'università del Salento per condurre uno studio approfondito sul territorio leccese, da portare all'attenzione dei membri del Task.

Diffusione dei risultati

Per diffondere i risultati ottenuti in questa linea di ricerca e per rendere noti tutti gli impianti sperimentali realizzati in Casaccia, è stato costantemente aggiornato il sito internet dedicato ai "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili", che finora ha contato oltre 150.000 visite. Il portale è visitabile accedendo alla pagina web: http://climatizzazioneconfontirinnovabili.enea.it/ (Figura 440).

Dal sito è possibile accedere a varie sezioni. Quella dedicata ai "Laboratori e Impianti" consente di ottenere informazioni sugli impianti e sulle attività di ricerca condotti nei vari laboratori coinvolti nel progetto di Ricerca del sistema Elettrico. Il sito mette a disposizione due sezioni dedicate all'approfondimento delle tematiche relative alla ricerca di base ed alla ricerca applicata. Accedendo a queste pagine web è possibile avere informazioni dettagliate sulle tecnologie studiate e scaricare la documentazione completa relativa alle attività completate nell'ambito di questo programma di ricerca.

E' stata assicurata la partecipazione a vari convegni insieme alla pubblicazione delle principali attività di ricerca su diverse riviste del settore.



Figura 440. Home page del sito internet dedicato "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili"

E' stato organizzato il 04 maggio 2015 un workshop tematico presentando le attività svolte nel corso dei PAR precedenti. Il workshop è stata l'occasione per contestualizzare il progetto nell'ambito dello stato dell'arte scientifico ed industriale dei sistemi di climatizzazione assistiti da fonte rinnovabile ed ha visto la partecipazione di oltre 155 tecnici che da anni operano nel settore impiantistico.

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.

Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici

Il Dipartimento svolge attività di ricerca inerente a soluzioni innovative per la climatizzazione ambientale mediante l'impiego di fonti energetiche rinnovabili. Tale attività si svolge sia a livello di ricerca teorica (sviluppo di modelli matematici, simulazioni dinamiche, algoritmi di ottimizzazione) che sperimentale, in un laboratorio attrezzato per il test di sistemi e componenti di diverso tipo (chiller alimentati termicamente, processi di trattamento aria, collettori solari termici, fotovoltaici ed ibridi, sistemi di storage). L'attività di ricerca inerente la Subtask a.2 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Palermo, quet'ultma si è concentrata sull'analisi dei risultati sperimentali ottenuti dai test funzionali di un sistema compatto Solar DEC di piccola taglia a letti fissi raffreddati per applicazioni nel settore residenziale/piccolo terziario, al fine di valutare le migliorie apportate al prototipo in test.
L'Università di Palermo ha inoltre partecipato alle attività dei gruppi di lavoro IEA, seguendo in particolare le Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration", la Task 48 " Quality assurance and support measures for Solar Cooling" e la Task 53 "New Generation Solar Cooling & Heating Systems (PV or solar thermally driven systems)".

'Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Presso l'Università di Padova sono in corso attività di ricerca nel campo dell'energia solare, ed in particolare per la caratterizzazione di dispositivi per la conversione di energia solare in calore. Tale Laboratorio sta portando avanti una attività di ricerca sperimentale su collettori solari piani, a tubi evacuati ed a concentrazione. L'attività di ricerca del Laboratorio recentemente si è focalizzata su sistemi a concentrazione e dispone di un concentratore parabolico a fuoco lineare con inseguimento a due assi. Inoltre tale Laboratorio lavora in sinergia con il

Laboratorio di scambio termico con cambiamento di fase dello stesso Dipartimento per realizzare dispositivi che utilizzino il fenomeno della vaporizzazione in canali di piccolo diametro. Tale know-how sullo scambio termico bifase per sistemi a concentrazione risulta utilissimo per lo sviluppo di scambiatori di calore innovativi per applicazioni in sistemi ad alta densità di potenza e media temperatura. L'attività di ricerca inerente la Subtask b.2 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Padova: l'università si è concentrata sulla sperimentazione per lo sviluppo di un dispositivo di misura della radiazione solare concentrata su ricevitori piani.

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale – Laboratorio di tecnica del freddo.

Presso il Laboratorio sono in corso ricerche sulle macchine a compressione di vapore di piccola e media taglia e sullo studio di fluidi refrigeranti di nuova generazione. In particolare, il gruppo di ricerca si è occupato dello studio sperimentale delle prestazioni di fluidi refrigeranti HFC, puri e miscelati, e fluidi puri quali la CO_2, nonché le più recenti idro-olefine, tra cui l' R1234ze(E). Ha inoltre pubblicato diversi articoli riguardanti le prestazioni di macchine a compressione di vapore, analizzando teoricamente e sperimentalmente l'influenza dei parametri di controllo, del fluido refrigerante e della taglia dei singoli componenti. Più di recente ha prodotto anche modelli per la simulazione a regime stazionario e transitorio di tali sistemi. L'attività di ricerca inerente la Subtask c.1 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università degli Studi di Napoli Federico II: l'università si è concentrata sullo studio termodinamico, la progettazione dei componenti principali e la stima delle prestazioni energetiche in accordo con le normative vigenti per una pompa di calore con espansione tramite eiettore".

Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Lo sviluppo del mercato elettrico "plug-in" (elettrici ed ibridi plug-in) per i veicoli da trasporto sta imponendo una spinta verso la realizzazione di una rete di infrastrutture necessarie alla diffusione dell'elettromobilità. Infatti la realizzazione di una adeguata rete di ricarica diviene un imperativo per il pieno e completo sfruttamento della risorsa elettrica anche in ambito trasportistico. Il mercato dei veicoli elettrici a livello europeo si diversifica da paese a paese. Nel 2014, secondo i dati dell'AVERE, sono stati immatricolati 65.199 veicoli elettrici che rappresentano il 63% in più del venduto 2013. Ma a fronte di 12,1 milioni totali di auto vendute i veicoli elettrici non rappresentano più dello 0,5% del totale. In Norvegia si registra una forte percentuale di veicoli elettrici immatricolati nel 2014 con 18.649 unità che insieme alla Francia con 15.046 rappresentano la metà del mercato di veicoli elettrici. Ma ancora più significativo è il confronto in termini percentuali a livello nazionale dove la Norvegia raggiunge quasi l'8% degli autoveicoli venduti. Le previsioni per il 2015 fanno ipotizzare, sulla base del primo quadrimestre, il possibile superamento delle 120.000 unità elettriche (totalmente elettriche e ibride plug-in). In Italia la situazione è in evoluzione poiché a fronte di un mercato ristretto (1024 veicoli elettrici immatricolati nel 2014) pari ad un +27% rispetto al 2013 si evince un trend positivo. Tuttavia se confrontiamo con il totale immatricolato i veicoli elettrici toccano appena lo 0,1% del venduto annuale. Secondo indicazioni di analisti di settore la crescita del mercato dei veicoli elettrici dovrebbe assumere in Europa nel periodo 2020-2025 una quota tra il 6-8% facendo seguito sia al crescente impegno delle case automobilistiche nel produrre modelli interessanti che alla consistenza tecnologica.

Lo sviluppo del mercato per l'elettrico, grazie all'affidabilità ed all'economia di esercizio di alcuni modelli innovativi, sta quindi imponendo un passo più veloce anche allo sviluppo delle infrastrutture necessarie, a partire dalle colonnine di ricarica. Com'è noto, infatti, una reale mobilità ad "impatto-zero" non può basarsi esclusivamente sul veicolo, ma deve integrare anche il resto della "catena del valore" per la mobilità, che include:

- integrazione ottimizzata delle infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici all'interno delle reti elettriche urbane;
- incremento dell'efficienza energetica nelle aree urbane, con lo scopo di ridurre l'impatto sulla rete delle infrastrutture di ricarica;
- *smart-management* delle stazioni di ricarica per veicoli elettrici;
- sistemi ICT per l'integrazione dei servizi per la mobilità urbana.

Più in generale una gestione della distribuzione dell'energia attraverso l'approccio "smart-grid", anche per la mobilità elettrica grazie ad una rete intelligente ed interconnessa in termini d'informazione e potenza può portare a dei benefici reali.

Questo quadro viene ribadito nel "Piano infrastrutturale per i veicoli alimentati ad energia elettrica" (PNIRE) che recepisce le Strategie "Europa 2020" e "Trasporti 2050" insieme alla direttiva 2009/33/CE per la riduzione dei gas ad effetto serra, l'incremento delle fonti energetiche rinnovabili ed il miglioramento della qualità dell'aria ambiente unitamente ad un uso dell'energia elettrica per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica con priorità di provenienza da fonti rinnovabili.

Il PNIRE rappresenta il caposaldo delle iniziative che dovrebbero condurre in Italia alla realizzazione di un cospicuo numero di punti di ricarica di cui il 10% accessibile a tutti. Secondo le indicazioni si prevede di giungere ad oltre 125.000 punti entro il 2020.

Prendendo spunto dalle considerazioni contenute nel PNIRE, e seguendo le linee guide Europee, lo sviluppo della rete di infrastrutture di ricarica deve avvenire in modo armonico ed integrato nella realtà energetica nazionale. Facendo seguito a questi stimoli le principali linee di attività prese in considerazione ai fini dell'incremento dell'efficienza energetica della elettro-mobilità ed i relativi temi che si sono intesi sviluppare sono:

- Tecnologie di ricarica "contactless", che facilitano l'uso "corrente" dei veicoli elettrici ed ibridi plug-in anche attraverso la riduzione in entrambi i casi della taglia delle batterie necessarie.
- Tecnologie di gestione di reti elettriche in B.T., quali stazioni di servizio, depositi di autobus, parcheggi di interscambio, che, nell'ambito del sistema della mobilità urbana, integrino autoproduzione, accumuli elettrici ed "erogatori". L'obiettivo finale è quello di trasformare quello che viene ancora percepito come "un

problema per la rete" in una opportunità di gestione della stessa in ottica "*smart grid*". Il "prodotto" in questo caso sarà un dimostratore e le strategie di gestione sviluppate servendosi dello stesso.

- Prove vita di batterie basate su moduli Li-FePO4 realizzati e gestiti, per consentire forti riduzioni del peso dell'accumulo di energia a bordo di veicoli medio-pesanti. Nel caso del trasporto pubblico locale, dove la missione del veicolo è ben definita, la possibilità di ricaricarsi al capolinea a potenze elevate, 150-200 kW, e ad intervalli ravvicinati, consente di ridurre drasticamente la taglia del pacco batteria. Il comportamento della batteria, basata su una prova vita "accelerata", è fondamentale per l'introduzione di questa tecnologia e per la gestione dei profili di ricarica ad alta corrente.
- Metodologia di valutazione della numerosità e dislocazione utile delle aree di ricarica all'interno della rete stradale in un settore urbano significativo in relazione ai consumi energetici dei mezzi a trazione elettrica, in un'ottica di medio termine. Questa metodologia è sono necessaria per il gestore della rete elettrica per programmare gli interventi necessari per l'implementazione delle strutture (potenziamento delle linee, accumuli elettrici nelle sottostazioni etc.) con vantaggi all'utente finale che potrà avere garanzia di rifornimento.
- Gestione intelligente della ricarica dei veicoli elettrici in prospettiva *vehicle-to-grid* (V2G) attraverso l'utilizzo di un modello energetico sviluppato in ambiente Matlab/Simulink® per la determinazione delle perdite e dei rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare interattivo con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione e validazione, per mezzo di prove di laboratorio, dello strumento di calcolo sviluppato. In particolare, le misure sperimentali permettono la validazione del modello energetico di sistema sulla base di simulazioni di casi di studio con profili di carico di rete reali.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività sviluppate nell'ambito del progetto sono finalizzate al superamento di alcuni degli ostacoli che rallentano lo sviluppo dei veicoli elettrici stradali, sia delle persone che delle merci, quali il costo elevato sia delle batterie, cui si può porre un parziale rimedio con la diffusione della ricarica rapida, che delle infrastrutture di ricarica; il costo "per veicolo servito" di queste ultime può ridursi drasticamente, se le stesse sono opportunamente localizzate ed integrate nella rete.

Si è pone poi particolare attenzione al problema dell'incremento dell'efficienza elettrica delle strutture di alimentazione collegate alla rete, tanto in termini di efficienza energetica che di affidabilità/disponibilità.

In questo ambito, nel corso del terzo anno le attività relative alla ricarica senza contatto si concludono con la l'automazione del sistema, mentre quelle relative alla ricarica veloce, già oggetto di sperimentazione nel corso del secondo anno di attività su di un veicolo di taglia media, una Nissan Leaf, proseguono con l'utilizzo di una nuova stazione di ricarica da 50 kW, con annesso "smart storage", che recepisce le soluzioni innovative nel software di gestione. A livello "accumulo elettrico", sia "on-board" che stazionario, l'obiettivo finale è la definizione del costo End-of-Life, risultato ottenibile attraverso le "prove vita accelerate" delle batterie.

L'attività prevede due obiettivi intermedi, più un obiettivo relativo alla comunicazione e diffusione dei risultati:

a. Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in corrente alternata ed in corrente continua
b. Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti
c. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi per la ricarica in c.a. ed in c.c.

La sviluppo delle linee di attività dell'annualità precedente hanno condotto alla realizzazione di prodotti di interesse per le azioni inerenti la ricarica dei veicoli elettrici sia per l'uso durante le soste che per la realizzazione di impianti di ricarica intesi come "stazioni di servizio". Infatti il sistema di ricarica "contactless" ha mostrato di poter erogare le potenze di progetto (600 W) per la ricarica di una microcar senza eccedere i limiti di campo E/M previsti dalle norme in prossimità del sistema. La piattaforma di progetto per impianti di ricarica rapida modulari ed integrati con fonti rinnovabili ha dato prova come in fase di progettazione, attraverso simulazioni a più livelli, sia possibile individuare il corretto bilanciamento tra accumulo stazionario, fonte rinnovabile e rete al fine di

approvvigionare di energia i veicoli elettrici con costi economici ed carichi di rete ottimizzati.

Le proposte di questa linea di ricerca sono quindi orientate alla finalizzazione delle attività della precedente annualità attraverso azioni di complemento al fine di ricavare prodotti di interesse per uno sviluppo pre-competitivo e per valutazione sulla sicurezza.

a.1. Ricarica rapida in c.a. contactless

La task in questione è composta da due diverse attività che si muovono a completamento delle azioni intraprese nell'ambito del PAR 2013. La prima ha inteso integrare la realizzazione di un sistema di ricarica contactless di tipo risonante ad 85 kHz attraverso l'automazione del processo di ricarica e la gestione delle interfacce di comunicazione e di adattamento ottimo del trasferimento di potenza. La seconda attività ha preso in esame il problema dell'esposizione umana ai campi E/M irradiati in prossimità dei sistemi contactless. In questo caso lo scenario è uno scenario reale realizzato attraverso un sistema di tipo "commerciale" da 3,7 kW installato su una Nissan Leaf.

Automazione di un caricabatteria contactless per city car

Il lavoro di ricerca ha avuto per oggetto l'automazione gestionale e funzionale di un caricabatteria contactless di tipo induttivo con topologia risonante. Il lavoro di ricerca svolto ha riguardato le seguenti attività:

a) sviluppo di un sistema di comunicazione per la gestione di un caricabatteria contactless;
b) sviluppo di una tecnica per il riconoscimento delle condizioni di non risonanza e il conseguente aggiustamento della frequenza di alimentazione;
c) sviluppo di algoritmi dedicati.

Riguardo il sistema di comunicazione per la gestione di un caricabatteria contactless, si sono innanzitutto esaminate le esigenze poste da un'effettiva operatività del caricabatteria, che sono la parametrizzazione e il monitoraggio in linea del suo funzionamento da parte del conduttore dell'impianto, e la comunicazione senza contatto e a distanza tra le ECU (unità elettronica di controllo) che gestiscono i due stadi (trasmittente e ricevente) o, per la precisione, tra i DSP (dispositivo digitale di segnali) delle due ECU. Per soddisfare queste esigenze è stata sviluppata un'apposita architettura per il sistema di comunicazione come mostrato in Figura 441 formata da :

- una rete seriale per la comunicazione tra il PC del conduttore dell'impianto e il DSP della ECU dello stadio trasmittente;
- una rete wireless per la comunicazione tra i DSP delle due ECU.

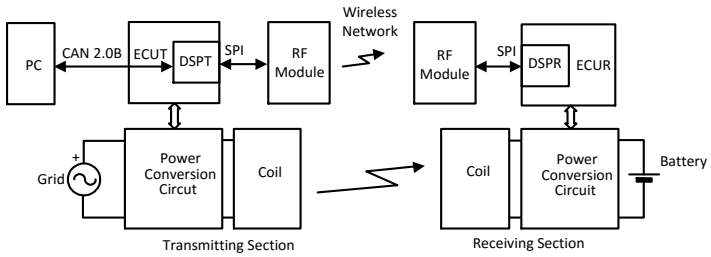


Figura 441. Sistema di comunicazione implementato nel prototipo di caricabatteria

Per la rete seriale è stata scelta una rete CAN con protocollo di trasmissione CAN 2.0B in quanto essa ha un'ampia diffusione e un basso costo dei dispositivi di interfaccia e, per di più, è supportata dai DSP industriali. E' stata anche studiata l'estensione virtuale della rete CAN al DSP della ECU dello stadio ricevente, ottenibile incapsulando i messaggi CAN all'interno del campo dati dei messaggi wireless che si scambiano i due DSP. Il DSPT, che è fisicamente collegato alla rete CAN, riconosce se il messaggio inviato dal PC è destinato ad esso, e in questo caso lo legge e genera il messaggio di risposta per il PC, oppure inoltra il messaggio tramite il canale RF all'altro DSP; da quest'ultimo riceve il messaggio di risposta tramite il canale RF e lo inoltra al PC tramite la rete CAN.

A completamento dell'attività riguardante il sistema di comunicazione tra il PC del conduttore e il DSP della ECU dello stadio trasmittente è stato ideato un protocollo applicativo per la trasmissione dei dati sulla piattaforma CAN 2.0B (Figura 442). Il protocollo permette il monitoraggio del funzionamento del caricabatteria durante

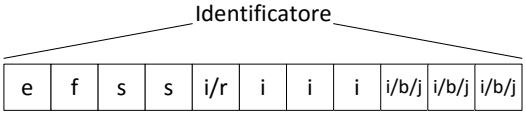


Figura 442. Suddivisione in campi dell'identificatore

le normali condizioni operative e la sua parametrizzazione durante le fasi di installazione; è stato inoltre previsto di impiegarlo durante lo sviluppo del firmware dei DSP e, all'uopo, è stato corredato di funzioni per la lettura e la scrittura delle variabili che i DSP elaborano durante l'esecuzione dei programmi.

Per la rete wireless si è partiti dal presupposto che i DSP industriali non posseggono porte per la comunicazione wireless. Pertanto si è ipotizzato di realizzare la rete wireless con moduli ricetrasmittenti a radiofrequenza (RF) interfacciati alle porte dei DSP e comunicanti tramite un canale RF. Per scegliere i moduli RF sono state analizzate le prestazioni dei protocolli wireless più comuni. E' risultato che il protocollo WiFi non solo garantisce la larghezza di banda necessaria per soddisfare le specifiche trasmissive ma lascia anche margini per futuri upgrade del sistema di comunicazione, che quindi potrebbero essere effettuati senza chiedere la riprogettazione del canale RF. E' stato infine proposto di implementare la rete wireless con moduli RF disponibili sul mercato, completi di antenna e di porta di comunicazione Serial Peripheral Interface (SPI) mediante la quale possono essere interfacciati con le omologhe porte dei DSP:

Riguardo al non soddisfacimento delle condizioni di risonanza, si sono dapprima richiamati i vantaggi che comporta il funzionamento in risonanza di un caricabatteria contactless. Essi derivano dal fatto che in condizioni di risonanza la componente reattiva della corrente è nulla in entrambi gli stadi con la conseguente massimizzazione dell'efficienza del caricabatteria e minimizzazione della potenza di dimensionamento dell'invertitore. Nella realtà le autoinduttanze delle bobine e le capacità dei condensatori di risonanza si scostano dai valori nominali a causa delle tolleranze costruttive, delle condizioni operative (i.e. posizionamento relativo delle bobine e temperatura) e dell'invecchiamento, portando il funzionamento del caricabatteria fuori dalle condizioni di risonanza. Ne consegue l'importanza di esaminare le prestazioni di un caricabatteria contactless in condizioni di non risonanza dovute agli scostamenti dei suoi parametri reattivi, di riconoscere la presenza di tali condizioni e di aggiustare la frequenza di alimentazione per ristabilire condizioni prossime alla risonanza.

Le prestazioni di un caricabatteria contactless a seguito di scostamenti dei suoi parametri reattivi sono state esaminate mediante analisi assistita da calcolatore in ambiente Matlab/Simulink, considerando gli scostamenti di un solo parametro per volta e valutandone gli effetti sull'efficienza e sul fattore di dimensionamento in potenza del caricabatteria. Si è riscontrato che l'efficienza non è influenzata dagli scostamenti dei parametri reattivi dello stadio trasmittente e che il fattore di dimensionamento in potenza dipende da essi in misura molto ridotta; entrambe le grandezze sono invece sensibilmente influenzate dagli scostamenti dei parametri dello stadio ricevente.

Sono stati quindi studiati tre approcci volti a compensare gli effetti degli scostamenti dei parametri reattivi. Essi operano aggiustando la frequenza di alimentazione in modo mantenere in risonanza: a) lo stadio trasmittente; b) la reattanza di carico equivalente dell'invertitore; c) lo stadio ricevente.

Lo studio ha mostrato che:

- la soluzione a) non porta a risultati apprezzabili ma anzi peggiora le prestazioni del caricabatteria in maniera sensibile;
- la soluzione b) fornisce invece buone prestazioni quando gli scostamenti parametrici concernono lo stadio ricevente mentre peggiora leggermente le prestazioni quando gli scostamenti parametrici concernono lo stadio trasmittente;
- la soluzione c) mostra le migliori prestazioni: compensa completamente gli scostamenti parametrici dello stadio ricevente ed è insensibile a quelli dello stadio trasmittente.

Sono state altresì identificate le relazioni che, se soddisfatte, indicano che il caricabatteria funziona in condizioni di risonanza. E' stata spiegata la non fattibilità del riconoscimento delle condizioni di non risonanza per lo stadio ricevente, come richiede l'implementazione della soluzione b). Si è quindi optato per implementare la soluzione c), che impone di mantenere la corrente della bobina trasmittente in fase con la componente fondamentale della tensione di alimentazione (i.e. la tensione all'uscita dell'invertitore). E' stato sviluppato un sistema di aggiustamento della frequenza di alimentazione basato su un circuito elettronico di rilevazione dell'errore di fase e su una elaborazione dell'errore che lo rende adoperabile dall'algoritmo di controllo della frequenza di funzionamento dell'invertitore affinché ne aggiusti opportunamente il valore. L'efficacia del sistema sviluppato è stata validata mediante simulazione al calcolatore.

Riguardo agli algoritmi dedicati, sono state inizialmente individuate le funzioni richieste dalle peculiarità operative di un caricabatteria contactless. Esse sono: automazione della sequenza di carica del pacco accumulatori e gestione di eventuali malfunzionamenti in modo da garantire la sicurezza dell'utente e l'integrità del caricabatteria. Si è poi passati allo sviluppo dei relativi algoritmi usufruendo delle risorse hardware e software tipicamente disponibili nelle ECU di un caricabatteria contactless.

Per l'automazione della sequenza di carica, sono state progettate due macchine a stati, una per ognuno dei due

DSP. I DSP sincronizzano i cambiamenti di stato e le attività all'interno di uno specifico stato mediante la trasmissione di messaggi sul canale RF. Si sono previsti quattro stati per le due macchine. Nello stato iniziale (IDLE) i convertitori statici di entrambi gli stadi sono disabilitati e non c'è trasferimento di potenza tra le bobine. Quando il DSP dello stadio trasmittente entra in comunicazione con il DSP di uno stadio ricevente, si entra in uno stato (SEEKING) durante il quale, per mezzo di un algoritmo sviluppato ad hoc, il DSP dello stadio trasmittente accerta che la distanza tra le due bobine sia all'interno del range previsto, eseguendo una stima del coefficiente di mutuo accoppiamento. Se l'accertamento è positivo, si accede allo stato successivo (PRECHARGING) durante il quale il DSP dello stadio trasmittente regola gradatamente la tensione del condensatore all'ingresso del chopper della sezione ricevente. Quando la tensione del condensatore raggiunge il valore nominale, si prosegue in uno stato (CHARGING) durante il quale si svolge il processo di carica. Al termine si rientra nello stato iniziale (IDLE).

Durante il funzionamento del caricabatteria contactless si possono verificare eventi indesiderati come guasti o malfunzionamenti sia negli stadi di potenza che nelle ECU di gestione. Per gli eventi indesiderati più comuni sono state predisposte procedure rispondenti alle esigenze sopramenzionate (i.e. garantire la sicurezza dell'utente e l'integrità del caricabatteria); inoltre, a seguito di questi eventi, viene inviato un messaggio con la descrizione dell'evento al PC del conduttore. Ad esempio, in caso di perdita della comunicazione sul canale RF, i due DSP sospendono le operazioni di carica disabilitando i rispettivi convertitori statici (i.e. invertitore e chopper) e si portano nello stato iniziale. La mancanza della tensione di rete o il verificarsi di una sovracorrente nella bobina dello stadio trasmittente sono gestite dal DSP dello stadio trasmittente sospendendo le operazioni di carica mediante disabilitazione dell'invertitore e comunicando l'evento al DSP dello stadio ricevente. Il verificarsi di una sovracorrente nella bobina ricevente non può essere gestita dal relativo DSP ma esso, tramite il canale RF, richiede al DSP dello stadio trasmittente di disabilitare l'invertitore. Il cortocircuito ai morsetti di uscita del caricabatteria viene gestito in sinergia tra i due DSP: il DSP della sezione ricevente, tramite l'anello di controllo della corrente di carica del pacco accumulatori, limita la corrente di uscita ad un valore di sicurezza e contemporaneamente avverte il DSP della sezione trasmittente di disabilitare l'invertitore.

Le attività svolte nell'ambito della collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, sono descritte nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/102.

Esposizione ai campi irradiati in prossimità di un sistema di ricarica contactless da 3,7 kW

Le attività di ricerca svolte hanno riguardato la valutazione sperimentale e numerica dei campi elettromagnetici (CEM) emessi da un sistema di ricarica senza contatto per veicoli elettrici disponibile sul mercato statunitense (Plugless™, Evatran Group Inc, Wytheville, VA, USA), acquistato e montato da ENEA su un autoveicolo elettrico modello Nissan Leaf in dotazione del laboratorio. Questo sistema è in grado di erogare una potenza di 3,3 kW, come un sistema di ricarica convenzionale di livello 2. In Figura 443 è mostrato il sistema formato da una bobina trasmittente (primario, anche detto *parking pad*) da posizionare a terra e collegata via cavo alla centralina di controllo, solitamente fissata al muro: essa fornisce l'alimentazione al primario nonché controlla il corretto allineamento del veicolo rispetto al *parking pad* e il processo di ricarica.

Il sistema è completato da una bobina ricevente (secondario), installata sul telaio nella porzione sottostante al vano portellone posteriore tramite un adattatore specifico per ciascun modello di autoveicolo, e collegata alle batterie dell'autoveicolo.



Figura 443. Sistema di ricarica senza contatto in cui sono evidenti la bobina trasmittente a terra, la bobina ricevente a bordo auto e la centralina di controllo

Questo sistema è in grado di effettuare una ricarica con una potenza pari a 3,3 kW e opera alla frequenza di 19,5 kHz. Questo tipo di sistemi, durante le operazioni di ricarica, emette dei CEM residui che potenzialmente possono eccedere i limiti normativi sull'esposizione umana recepiti dalla legislazione italiana sulla popolazione: nel DPCM 8 luglio 2003 si stabilisce che a tutela delle esposizioni a CEM a frequenze comprese tra 0 Hz e 100 kHz, generati da sorgenti non riconducibili agli elettrodotti, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.

Seguendo l'approccio previsto dalla normativa, in una prima fase si sono eseguite misure radiometriche dei CEM residui emessi dal sistema Plugless^{TM} in condizioni operative, secondo la norma tecnica IEC 61980-1:2015. Le misure di CEM devono essere eseguite in corrispondenza della posizione operativa ottimale, in cui l'autoveicolo è posizionato, in modo tale che le bobine trasmittente e bobina ricevente siano centrate, e in corrispondenza delle posizioni operative di massimo disallineamento consentito tra le due bobine tali da mantenere attivo il trasferimento di energia. Infine devono essere eseguite misure di CEM anche a bordo dell'autoveicolo.

Le misure di CEM sono state eseguite in sito aperto ed in Figura 444 sono illustrate le misure condotte all'esterno del veicolo. Per le misure è stato utilizzato un sensore isotropico di campo elettrico e magnetico con cui è possibile eseguire analisi selettive in frequenza e su larga banda (Narda EHP-200A, Narda Safety Test Solutions, Hauppauge, NY, USA). I risultati sono forniti corredati da un'incertezza espansa (K = 2) di tipo B, pari rispettivamente al 19,4% per il campo E e al 21,4% per il campo B. I valori misurati sono riportati come intensità efficace dei campi elettrico E (V/m), magnetico H (A/m) e di induzione magnetica B (μT), rispettivamente come valore di picco massimo (individuato alla frequenza di 19,5 kHz) e a larga banda (10 - 40 kHz).



Figura 444. Misure di campo elettrico e magnetico all'esterno del veicolo

I dati delle misure condotte all'esterno del veicolo con le bobine nella posizione operativa nominale sono riepilogati nella Tabella 139. Le coordinate dei punti di misura sono riferite a un sistema cartesiano la cui origine, relativamente alle coordinate X e Y, è nel centro geometrico della bobina trasmittente mentre la coordinata Z rappresenta l'altezza dal suolo.

Tabella 139. Misure (valori efficaci) all'esterno del veicolo con le bobine nella posizione operativa ottimale (sistema primario e sistema secondario centrati)

ID	X, Y, Z (cm)	E_{HP} (V/m)	E_{WB} (V/m)	H_{HP} (A/m)	H_{WB} (A/m)	B_{HP} (μT)	B_{WB} (μT)
P0	-80, 0, 16	21,7	22,0	12,4	12,5	15,6	15,7
P1	-80, 20, 16	16,4	16,5	11,5	11,5	15,0	15,2
P2	-80, -20, 16	22,9	23,0	11,5	11,6	14,3	14,4
P3	0, -110, 16	12,5	12,8	3,7	3,7	4,6	4,7
P4	-20, -110, 16	8,0	8,2	4,2	4,3	5,4	5,4
P5	20, -110, 16	12,2	12,7	2,8	2,8	3,5	3,5
P6	110, -110, 16	5,1	5,6	0,7	0,7	0,9	0,9
P7	0, 90, 16	4,7	5,2	5,3	5,3	6,7	6,7
P8	-40, 90, 16	4,2	4,7	5,6	5,8	7,1	7,2
P9	20, 90, 16	4,4	4,8	4,0	4,0	5,1	5,1
P10	130, 90, 16	7,0	7,4	1,2	1,3	1,5	1,6
P11	410, 0, 16	5,0	5,0	0,1	0,1	0,1	0,1
P12	-80, 0, 50	4,9	4,9	9,9	9,9	12,5	12,5
P13	-80, 20, 50	5,6	5,6	10,0	10,0	12,5	12,5
P14	-80, -20, 50	4,7	4,7	9,9	9,9	12,3	12,3

A bordo del veicolo i valori misurati risultano essere ai limiti della sensibilità dello strumento.

Riassumendo i risultati delle valutazioni radiometriche, in tutte le condizioni operative analizzate si può dire che in nessuno dei punti di misura considerati sono stati superati i livelli di riferimento per il campo E (pari a 87 V/m), mentre nella maggioranza dei punti di misura all'esterno dell'autoveicolo sono stati superati i livelli di riferimento per il campo H (pari a 5 A/m) e per il campo B (pari a 6,25 μT). In particolare, i livelli di riferimento per il campo H e

per il campo B sono stati sistematicamente superati nelle posizioni operative con disallineamento tra le bobine trasmittente e ricevente; i valori massimi misurati di campo H e di campo B sono stati riscontati in corrispondenza della condizione operativa limite con un disallineamento tra le bobine lungo l'asse X pari a + 16 cm.

I risultati sopra riportati hanno quindi reso necessario l'esecuzione di valutazioni dosimetriche finalizzate al confronto con i limiti di base, così come previsto dalla normativa. Per fare questo si è utilizzato un codice di calcolo commerciale (EMS2015) dotato di un solutore in bassa frequenza. La validità del codice nel simulare questo tipo di sorgenti, è stata verificata mediante la realizzazione del un modello del prototipo realizzato all'Università di Padova operante alla frequenza di 85 kHz, di cui erano note la geometria, le caratteristiche elettriche i valori di campo B in determinati punti. Si è eseguita quindi una prima valutazione dosimetrica utilizzando come modello di uomo il fantoccio definito nella norma tecnica CEI 62110: si tratta di un fantoccio ellissoidale aventi assi verticale e orizzontale rispettivamente di 1,5 m e di 0,35 m. Si è scelto di realizzarlo con muscolo equivalente le cui caratteristiche dielettriche a 85 kHz sono pari a ε_r = 8496,6 e σ = 0,36 S/m. L'ellissoide è stato posto a una distanza di 30 cm dal sistema e con l'asse maggiore perpendicolare al sistema stesso. Per la verifica della conformità ai limiti di base si è utilizzato come valore di riferimento il 99mo percentile di tutti i valori estratti, al fine di non tenere conto di eventuali artefatti numerici che possono presentarsi in corrispondenza delle celle di interfaccia tra il mezzo dissipativo e l'aria. Durante le misure radiometriche effettuate lo scorso anno sul prototipo realizzato all'Università di Padova, si era verificato che i valori del campo B misurati a 30 cm dal prototipo su una linea orizzontale, mediana al sistema, superavano il livello di riferimento stabilito dalla raccomandazione europea del 1999 per la popolazione. Lo studio dosimetrico ha tuttavia evidenziato la conformità ai limiti di base: infatti il valore simulato di densità di corrente indotta J (99mo percentile della distribuzione dei valori) è risultato pari a 145.8 mA/m^2, minore del limite di base riportato nella raccomandazione europea e pari a 170 mA/m^2 a 85 kHz. Questo conferma la validità dell'approccio a due fasi, in quanto permette di prevenire possibili sovrastime del rischio che limiterebbero l'utilizzo di determinate apparecchiature.

Si è poi passati a realizzare un modello numerico del sistema Plugless^{TM} la cui validità è stata verificata confrontando i valori di campo B simulati con i valori misurati durante le sessioni sperimentali. Anche in questo caso si è utilizzato il fantoccio ellissoidale definito nella norma tecnica CEI 62110 e costituito di materiale muscolo equivalente alla frequenza di 19,5 kHz (ε_r = 15763 e σ = 0,34 S/m).

L'ellissoide è stato posto in diverse posizioni (Figura 445) rispetto al sistema di ricarica:

- Posizione 1: ellissoide a 30 cm di distanza dal sistema, asse maggiore perpendicolare al sistema, asse minore coplanare al piano mediano del sistema. Questa posizione è stata scelta per un confronto diretto con le simulazioni fatte sul prototipo realizzato all'Università di Padova;
- Posizione 2: ellissoide a 30 cm di distanza dal sistema, ma posizionato in modo tale che la sua parte più inferiore si trova a z = +20 cm rispetto alla base del sistema di ricarica. Questa posizione è stata scelta per riprodurre una situazione in cui il sistema è posto a terra;
- Posizione 3: ellissoide posto a 80 cm dal centro del sistema, posizionato secondo l'asse z come nella posizione 2. Questa distanza è quella utilizzata nelle misure (punto P0, P1, P2), corrisponde a una distanza di 20 cm dalla parte posteriore dell'auto, rappresentativa di un caso realistico di esposizione peggiore.

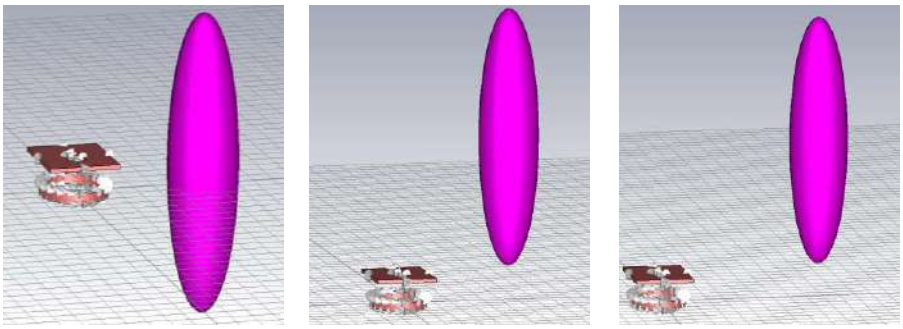


Figura 445. Modelli delle simulazioni finalizzate alla valutazione dosimetrica dell'esposizione: (a) Posizione 1, (b) Posizione 2, (c) Posizione 3

In Tabella 140 vengono riportati i valori di campo E indotto e di densità di corrente J indotta (99mo percentile della distribuzione dei valori) per le tre posizioni considerate.

Tabella 140. Risultati finali dello studio dosimetrico eseguito sul sistema Plugless™ in termini di campo elettrico e di densità di corrente indotti (valori efficaci)

Posizione	E [mV/m]	J [mA/m^2]
1	497	179,9
2	300	108
3	115	41,4

In tutti i casi simulati, il valore di corrente indotta J risulta non conforme al limite di base riportato nella raccomandazione europea e pari a 39 mA/m^2 a 19,5 kHz. E' da notare, però, che il sistema Plugless™ non è omologato per il mercato europeo ma, essendo commercializzato negli Stati Uniti d'America, è conforme ai limiti di esposizione recepiti dalla legislazione statunitense (IEEE Std C95.1:2005) che risultano essere superiori ai limiti della raccomandazione europea.

Con riferimento all'analisi dosimetrica è importante sottolineare che un fantoccio omogeneo a geometria semplificata, come quello ellissoidale utilizzato in questo lavoro, rappresenta una condizione di caso peggiore con riferimento all'accoppiamento del campo elettromagnetico esterno con il campo elettrico indotto. Per questo motivo negli ultimi anni c'è stata una grande evoluzione nella realizzazione di modelli anatomici realistici che però richiedono un elevato impegno di risorse computazionali, soprattutto in bassa frequenza. La disponibilità di risorse di calcolo ad alte prestazioni consentirebbe l'utilizzo di questi modelli per condurre valutazioni dosimetriche più accurate e realistiche.

Gli studi condotti hanno consentito di mettere a punto una metodologia numerico-sperimentale per la caratterizzazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici emessi dai sistemi di ricarica senza contatto: tale metodologia ha valenza generale e può essere adottata anche per casi espositivi più complessi (sistemi per ricarica rapida, sistemi dedicati a veicoli industriali o mezzi per il trasporto pubblico).

Le attività svolte sono descritte nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/103.

a.2 Convertitore per stazione di ricarica rapida in c.c. con accumulo elettrico stazionario, per l'integrazione nel sistema dei trasporti di E.E. da fonti rinnovabili non programmabili

Sulla base dei risultati della precedente attività, si è proposto un ulteriore sviluppo della tematica trattata ossia della integrazione di più sorgenti nella erogazione di energia per la ricarica di veicoli elettrici. Nel merito, si è proceduto con un up-grade della piattaforma di sistema attraverso l'introduzione di convertitori bidirezionali per applicazioni V2G che possano essere gestiti nell'ambito di una micro-grid ma anche ad integrare i due livelli della piattaforma di progetto in un unico ***layer*** in grado di modificare il funzionamento della stazione al variare delle condizioni di funzionamento. La validazione della piattaforma numerica è stata eseguita con l'espletamento di prove sperimentali condotte presso il Laboratorio di Automazione Industriale dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale.

La piattaforma numerica di simulazione

Nel corso degli ultimi anni diversi studi sono stati condotti dalla comunità scientifica e nell'ambito di diversi progetti a livello europeo e mondiale sull'impatto della mobilità elettrica sul sistema elettrico. I risultati di questi studi attestano che un'alta penetrazione di veicoli elettrici determinerebbe nei prossimi anni la necessità di grossi investimenti per il sistema elettrico per fronteggiare l'aumento dei picchi di potenza ed il peggioramento della *power quality*. Tutto ciò porterebbe ad un forte rallentamento della diffusione di punti di ricarica sul territorio e, in particolare, in aree in cui la rete elettrica presenta già criticità. E' riconosciuto, inoltre, che una della più importanti barriere all'adozione su vasta scala della mobilità elettrica, oltre all'assenza di infrastruttura di ricarica capillarmente distribuita, è rappresentata dalle lunghe attese necessarie per la ricarica delle auto elettriche con basse potenza (ricarica lenta @3-7 kW). Di conseguenza, è necessario sviluppare delle infrastrutture di ricarica che consentano di ricaricare velocemente le auto senza, tuttavia, impattare sul sistema elettrico. E' necessario, quindi, creare delle micro-reti, auspicabilmente integrate in sistemi di generazione da fonti rinnovabili, in grado di disaccoppiare sia in potenza che in energia l'infrastruttura di ricarica dalla rete elettrica. A tal fine, nella precedente annualità è stato sviluppato un sistema di conversione statico dell'energia multi-sorgente in grado di minimizzazione, attraverso l'utilizzo di un sistema di accumulo ibrido ed un generatore fotovoltaico, l'impatto delle ricariche sulla rete di alimentazione in termini di energia, potenza e di *power quality*. La soluzione tecnologica sviluppata alimenta una *micro-grid* in cui è possibile ricaricare a potenze superiori (ricariche rapide e veloci) a quelle disponibili al punto di allaccio. L'utilizzo della fonte rinnovabile riduce anche la richiesta di energia dalla rete, rendendo di fatto la mobilità elettrica realmente sostenibile secondo l'approccio "well to wheel".

Tuttavia, la fonte fotovoltaica è aleatoria e risulta necessario il supporto di un adeguato sistema di accumulo per immagazzinare l'energia prodotta in eccesso dal campo fotovoltaico e utilizzarla nelle ore notturne o in caso di scarsa produzione. Inoltre, il sistema di accumulo integrato consente di immagazzinare l'energia dalla rete nelle ore in cui il costo è minore, per poi utilizzarla nelle ore di picco. La progettazione del sistema ha richiesto lo sviluppo di un'opportuna piattaforma numerica, che fornisce, attraverso la risoluzione di una funzione di ottimo per possibili scenari di costo e utilizzo, come risultato il progetto di massima del convertitore ideale da utilizzare per quella specifica applicazione (in termini di singole unità di conversione, taglia, topologia, ecc..) e l'impostazione dei flussi di potenza del convertitore, utili ad ottenere il migliore piano di ammortamento dell'investimento iniziale dell'impianto. Diverse strutture per le unità di conversione e tecniche di controllo ad alte prestazioni sono state sviluppate ed integrate all'interno della piattaforma al fine di poter comparare le soluzioni classiche ad altre più innovative.

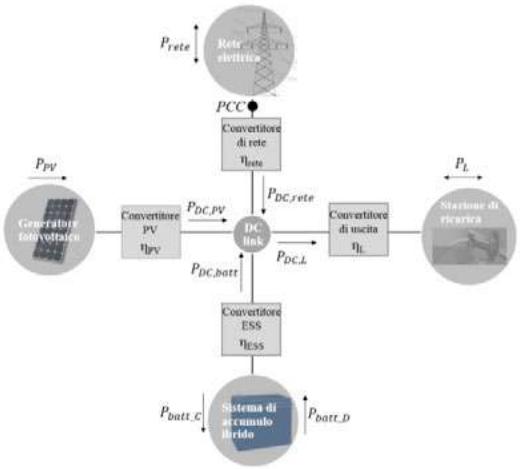


Figura 446. Struttura del convertitore modulare per infrastrutture di ricarica con accumulo integrato

Un ulteriore sviluppo della piattaforma numerica è stato conseguito durante le attività svolte per il progetto di ricerca. Come riportato nella figura 446, è stata modificata la struttura del sistema di conversione statica dell'energia elettrica in modo da poter implementare la modalità vehicle to grid (V2G) all'interno della soluzione proposta. Questa attività ha previsto lo sviluppo di opportuni convertitori di potenza e relative tecniche di controllo e di modulazione, che consentono un flusso bidirezionale di potenza lato infrastruttura di ricarica e lato rete di alimentazione. Questi nuovi componenti sono stati integrati nel di *layer dispositivo* e la nuova modalità V2G è stata considerata nel *layer di sistema* per la risoluzione del problema di ottimizzazione.

Il problema di *unit commitment*, alla base dell'esercizio del sistema, è stato risolto con un approccio non più solamente deterministico, ma anche stocastico. Nell'analisi dell'esercizio dell'infrastruttura sono state considerate l'aleatorietà di alcune variabili di ingresso come ad esempio la produzione del generatore fotovoltaico, la potenza richiesta dai veicoli nei processi di ricarica e la presenza di veicoli collegati e disponibili per la modalità V2G. Il ricorso a metodi probabilistici ha consentito di determinare le funzioni di densità di probabilità delle variabili di uscita del modello necessarie per definire l'esercizio giornaliero dell'infrastruttura di ricarica. In figura 447 sono riportati i risultati numerici dell'analisi probabilistica relativi all'esercizio giornaliero del mese di settembre della micro-grid considerando tutte le possibili modalità operative previste. È possibile notare che attraverso la soluzione stocastica del problema di ottimizzazione sono identificati gli intervalli temporali dove probabilmente il sistema di accumulo dell'infrastruttura e dei veicoli possono essere utilizzati ed il valore iniziale del SOC del sistema di accumulo integrato, che consente di ottenere l'esercizio ottimo dell'infrastruttura stessa. A partire dal SOC inziale, dalla distribuzione media di produzione fotovoltaica, di carico e presenza di veicoli in V2G, la piattaforma identifica in maniera deterministica l'esercizio ottimo previsto per il giorno (Figura 448). È possibile, quindi, identificare i diversi contributi forniti dall'impianto fotovoltaico, dall'acquisto da rete e dalla modalità *V2G*.

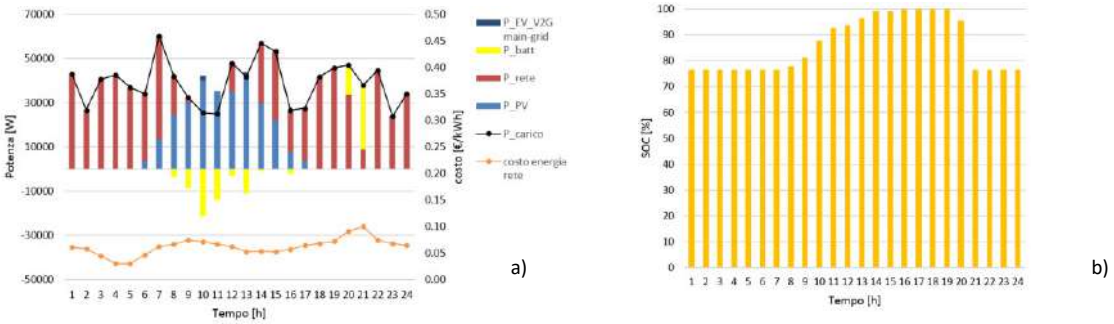


Figura 447. Analisi probabilistica per la previsione dell'esercizio giornaliero del mese di settembre: *(a)* distribuzione delle potenze medie delle sorgenti fornite al carico confrontata con il prezzo medio orario dell'energia prelevata dalla rete per il sistema in scala con impianto fotovoltaico da 120 kWp ed un sistema di accumulo da 275 kWh;

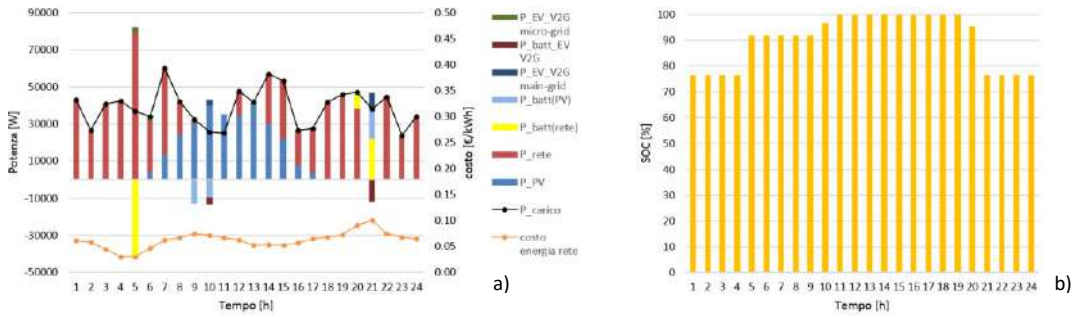


Figura 448. Esercizio *real time* dell'infrastruttura di un giorno di Settembre: *(a)* distribuzione delle potenze medie delle sorgenti fornite al carico confrontata con il prezzo medio orario dell'energia prelevata dalla rete per il sistema in scala con impianto fotovoltaico da 120 kWp ed un sistema di accumulo da 275 kWh; *(b)* SOC del sistema di accumulo integrato

Sulla base dei risultati ottenuti dalla piattaforma numerica per il dimensionamento del convertitore multi-sorgente si è proceduto ad una sperimentazione nella quale sono state valutate le prestazioni degli algoritmi di gestione e controllo dei flussi di potenza su un prototipo in scala presso il Laboratorio di Automazione Industriale (LAI) dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. In particolare, è stato utilizzato un prototipo di un convertitore multi-sorgente disponibile con le seguenti caratteristiche:

- ingresso fotovoltaico: due canali indipendenti MPPT da 6 kWp ognuno; tensione di ingresso 150-400 V;
- ingresso sistema di accumulo: 216 V, 12 kW;
- ingresso rete: 400 V (3F+N);
- uscita: 400 V (3F+N).



Figura 449. Sezione di potenza

Nella Figura 449 è riportata una foto dell'intera sezione di potenza. Due unità DSP sono utilizzate per il controllo delle due sezioni DC ed AC del convertitore. I DSP sono interfacciati ad un PC di supervisione che consente di controllare il sistema di conversione anche da remoto.

Per la verifica delle prestazioni degli algoritmi di controllo e dell'intero sistema si è proceduto all'allestimento di un set-up sperimentale. Il sistema di accumulo utilizzato per le attività sperimentali ha una capacità nominale pari a 28,8 kWh, per il generatore fotovoltaico è stato impiegato sia un simulatore da 10 kW che un generatore fotovoltaico da 3 kWp, installato sul tetto della palazzina della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. Per il controllo *real-time* del sistema di conversione statica dell'energia elettrica proposto è stato integrato il layer *di sistema* con il *layer di dispositivo* in un'unica piattaforma numerica. In tal modo è possibile utilizzare la piattaforma numerica per il *tuning* del sistema di controllo dell'intera *micro-grid* sulla base dello scostamento tra le previsioni effettuate e le reali condizioni operative dell'intero sistema. In particolare, a partire da una previsione dell'esercizio previsto per un giorno di settembre sulla base dell'analisi stocastica (Figura 450), il sistema di gestione e controllo, in base delle variazioni che si verificano rispetto alla previsione effettuata durante l'esercizio dell'infrastruttura ottimizza in *real time* i flussi di potenza nella *micro-grid* definendo i nuovi valori di potenza da prelevare dalle diverse sorgenti.

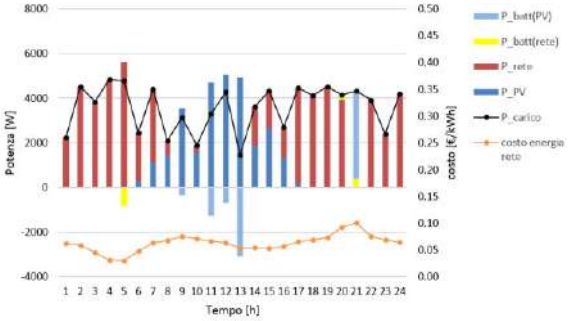


Figura 450. Previsione dell'esercizio giornaliero di Settembre: distribuzione delle potenze medie delle sorgenti fornite al carico confrontata con il prezzo medio orario dell'energia prelevata dalla rete per il sistema in scala con impianto fotovoltaico da 12 kWp ed un sistema di accumulo da 28,8 kWh

Nella Figura 451 è possibile notare come a seguito di un incremento della produzione dell'impianto fotovoltaico e di variazioni della potenza di carico a partire dalla ore 10.00 della mattina, il sistema di gestione e controllo decide di scaricare il sistema di accumulo integrato della quantità di energia acquistata dalla rete al prezzo minimo (ore 5.00) in modo da recuperare la produzione di energia dell'impianto fotovoltaico delle ore successive. In fase di programmazione dell'esercizio l'energia acquistata alle ore 5.00 era utilizzata alle ore 21.00 dove il prezzo dell'energia è il massimo.

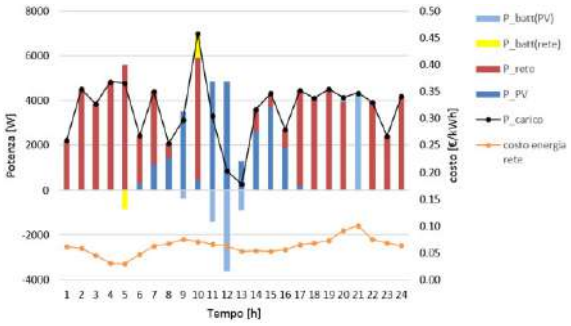


Figura 451. Esercizio *real time* dell'infrastruttura di un giorno di Settembre: distribuzione delle potenze medie delle sorgenti fornite al carico confrontata con il prezzo medio orario dell'energia prelevata dalla rete per il sistema in scala con impianto fotovoltaico da 12 kWp ed un sistema di accumulo da 28,8 kWh

Successivamente, in seguito all'incremento di produzione di energia dall'impianto fotovoltaico l'energia acquista è utilizzata alle ore 10.00, mentre alle ore 21.00 e 22.00, ore in cui il prezzo dell'energia è alto, il sistema di controllo decide di utilizzare l'energia accumulata dalla maggiore produzione di fotovoltaico per minimizzare il costo di esercizio giornaliero dell'infrastruttura di ricarica. Nella Figura 452 sono riportate le acquisizioni relative alle potenze erogate dalla diverse sorgenti del sistema e alla potenza richiesta dal carico durante l'esercizio giornaliero dell'infrastruttura.

L'attività svolta è documentata nel rapporto RdS/PAR2014/104.

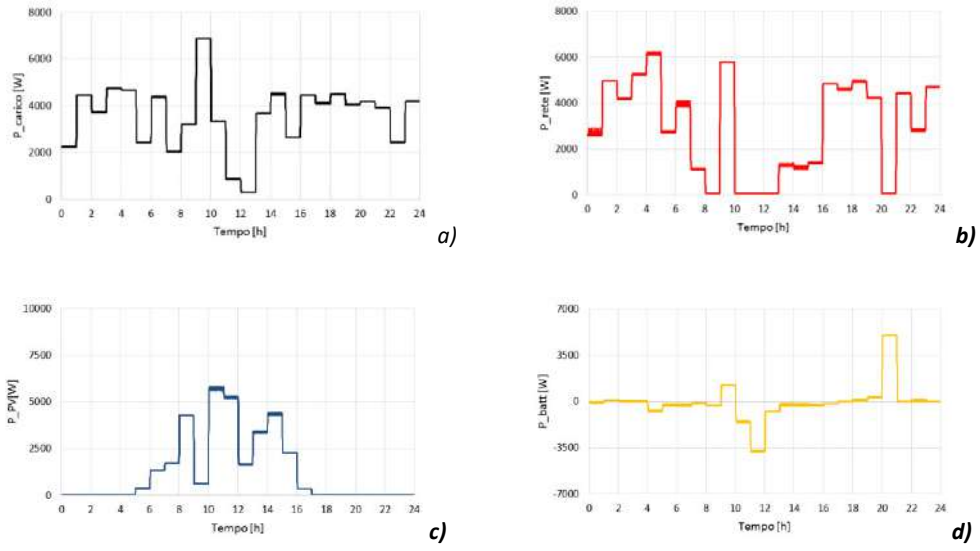


Figura 452. Risultati sperimentali relativi all'esercizio giornaliero di un giorno di Settembre per il sistema in scala: *(a)* potenza richiesta dal carico; *(b)* potenza di rete; *(c)* potenza di fotovoltaico; *(d)* potenza del sistema di accumulo integrato da 28,8 kWh

Sistemi multi sorgente ed elettromobilità urbana

Il PNIRE (Piano Nazionale per le Infrastrutture di Ricarica Elettrica) fornisce le linee guida per la costituzione di una rete di ricarica in grado di sostenere la diffusione della mobilità elettrica. Il Piano individua priorità di lavoro su cui

basare le scelte di campo per la crescita di un sistema nazionale competitivo e sostenibile per la mobilità elettrica. In esso sono contenute indicazioni di rilievo mirate anche all'attuazione di modalità diversificate di rifornimento energetico dei veicoli elettrici. Facendo riferimento ai contenuti del PNIRE ed in linea con la necessità di minimizzare gli impatti sulla rete in contesti urbani critici, l'adozione di metodiche multi sorgente capaci di integrare rete, fonti rinnovabili ed accumulo stazionario sono soluzione praticabili. La conoscenza delle reali esigenze di spostamento è vantaggioso per la determinazione di profili di carico che possono essere richiesti alle stazioni di ricarica. In questo ambito la determinazione dei profili reali di carico è stata la base di partenza per testare l'applicazione di sistemi di ricarica multi sorgente alla luce degli sviluppi prodotti nel lavoro dell'Università di Cassino [rapporto RdS/PAR2014/104].

Comprendere meglio le reali esigenze dei veicoli può aiutare a convincersi che in diversi casi l'autonomia del veicolo elettrico non è il principale un problema. La conoscenza delle esigenze di energia in relazione alle percorrenze ed alle modalità di ricarica influisce sulla rete di ricarica. Al fine di valutare concretamente il comportamento di un sistema multi sorgente si è operato in un primo tempo per la verificare l'impatto della potenza di ricarica sulle percorrenze reali in funzione della taglia di ricarica.

Nel database vi sono 29.867 veicoli e, per il presente lavoro, il si è utilizzato sottoinsieme di tutti quelli i cui proprietari risiedono nei punti interni al comune di Roma, rappresentati in Figura 453. In particolare si tratta di un totale di 16.543 veicoli, dei quali 12.172 (viola) risiedono entro il GRA (Grande Raccordo Anulare) e 4.371 (magenta) fuori. Nella Figura 454a è rappresentato l'andamento della percorrenza giornaliera media, calcolata come rapporto tra percorrenza complessiva di tutti i veicoli che si muovono in un giorno ed il loro numero. In figura 454b è riportata la distribuzione per classi di lunghezza.

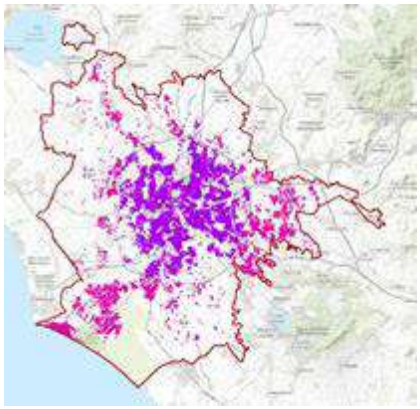


Figura 453. Residenze veicoli in esame

Per questo primo passo si sono valutati i consumi dei veicoli su percorrenze reali utilizzando un modello di consumo basato su un valor medio derivato da sperimentazioni stradali su un determinato veicolo elettrico (Tabella 141). Inoltre il modello di ricarica considerato imponeva la possibilità di attuare la ricarica se il SOC di batteria era inferiore al 70% e se la sosta era di durata superiore ad 1 h. Questi parametri sono stati utilizzati solo nelle ipotesi di potenza di ricarica di 2,2-3-6 kW mentre per ricariche veloci da 22 kW il limite temporale era una sosta di 0,5 h.

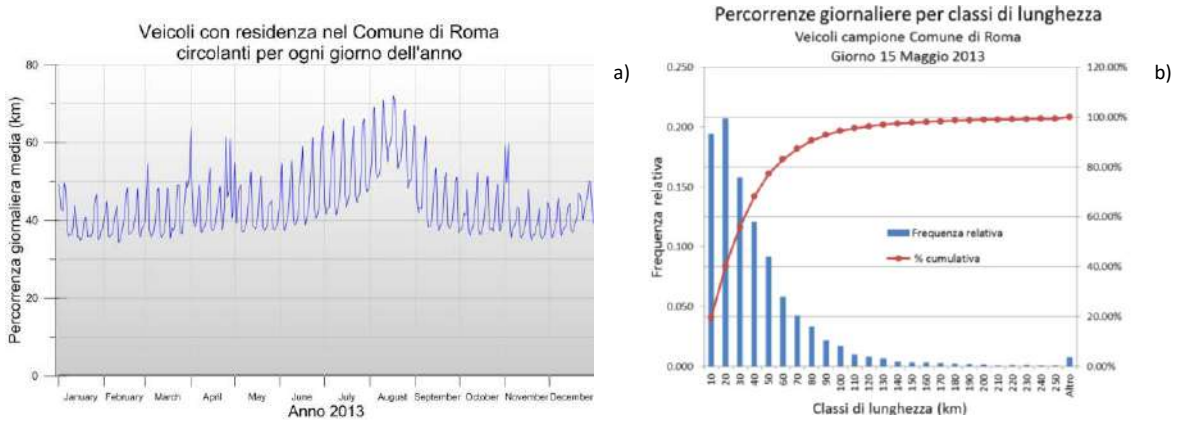


Figura 454. Percorrenze giornaliere per l'anno 2013 (a) e per classi di lunghezza (b)

Tabella 141. Consumi sperimentali su strada per il veicolo in prova

	08-Ott	09-Ott	16-Ott	17-Ott	21-Ott	22-Ott
km	48	40,83	40,46	41,01	40,41	53,69
kWh	7,32	5,26	7,26	7,82	5,32	7,86
Wh/km	152,5	128,9	179,3	190,8	131,6	146,4

Sono state esaminate le possibili percorrenze con accumulo a bordo di 24, 30, 36 e 40 kWh. I risultati ottenuti mostrano che, considerando la batteria da 30 kWh, che verrà montata di serie dal prossimo anno sulla Nissan Leaf, circa un 15% di veicoli a combustione interna può essere sostituito da veicoli elettrici (VE) senza nessun cambiamento, mantenendo esattamente lo stesso utilizzo del veicolo. Se poi si decide di rinunciare al veicolo per almeno un certo numero di giorni l'anno in cui il VE non sarebbe in grado di garantire la percorrenza, il numero delle conversioni aumenta notevolmente. Infatti, con non più di 1 rinuncia al mese, le conversioni in VE aumentano circa al 70%, lasciando il comportamento del veicolo invariato in tutti gli altri giorni. Questa percentuale addirittura può aumentare di un ulteriore 20 se i proprietari di questi ulteriori veicoli decidono di montare delle batterie più grandi di quella di serie fino ad un massimo di 48 kWh. Quindi si può concludere che già da oggi, buona parte dei veicoli in circolazione è tecnicamente convertibile in elettrico.

Quello che si riscontra è che l'aumento in capacità della batteria ha un peso maggiore dell'aumento in potenza della ricarica. Un'altra cosa interessante, osservata nell'uso delle ricariche lente, è che usando una potenza più alta si riduce la frequenza di ricarica. Ciò è sicuramente apprezzabile perché anche se la ricariche sono fatte in sosta, rimane sempre la fastidiosa operazione di inserire e togliere i cavi.

Basandosi sulle analisi condotte relativamente alla conversione possibile di veicoli da convenzionale in elettrici si è considerato il consumo dei veicoli e le loro esigenze di ricarica per la determinazione di un profilo di carico che potesse rappresentare una reale situazione di richiesta in una determinata zona della città. Ai fini delle prove da eseguire su un prototipo di stazione multi sorgente si è provveduto ad estrarre un profilo di carico generale giornaliero sfruttando un insieme di veicoli afferenti ad un determinato punto di sosta. Questo ha condotto ad un grafico che attraverso fattori di scala potesse essere adottato in modo generico a taglie variabili di impianti di ricarica.

La Figura 455 mostra il profilo di veicoli in sosta nella zona di sosta-rifornimento che superano di poco le 75 unità per effetto del trascinamento del giorno precedente in cui si è iniziato a prendere nota delle soste iniziate dopo le ore 00:00 di martedì. Interessante è la linea rossa che ci mostra l'andamento della potenza di ricarica necessaria per i veicoli che si presentano nell'arco della giornata. Nello specifico si è ipotizzato di utilizzare una ricarica lenta vista la numerosità dei veicoli che sostano e per la durata delle loro soste. Quindi potremmo ricadere nel caso di una zona di parcheggio attrezzata con numerosi punti di ricarica (almeno 80) con una potenza massima necessaria di 240 kW in caso di utilizzo contemporaneo ma di soli 120 kW con il profilo dei consumi e delle necessità di carica come valutato in precedenza. Esaminando il profilo (in rosso) viene ben evidenziato che il numero dei veicoli in carica è inferiore a quello di veicoli presenti poiché man mano che il processo di carica dell'accumulo di bordo procede i veicoli si staccano dalla rete al raggiungimento del massimo SOC. I veicoli in carica tendono a giungere alla stazione in prossimità delle ore legate al ciclo casa-lavoro e quindi intorno alle 20:00 sia il martedì che il mercoledì si sono raggiunti i massimi veicoli collegati in carica. Altra nota interessante alle ore 4:00 del mattino non esiste carico per le esigenze di ricarica.

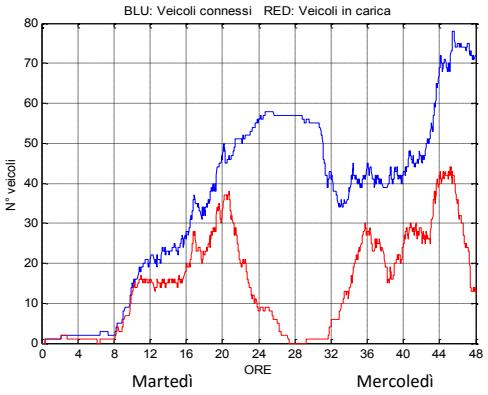


Figura 455. Veicoli in sosta per la ricarica

Il profilo di potenza istantanea ricavato per il mercoledì (giorno tipo in genere per le analisi delle reti elettriche) è mostrato in Figura 456. Il grafico mostra che dopo il ciclo notturno con la potenza richiesta nulla inizia a crescere la richiesta di potenza dalle 8:00 sino alle 12:00 per effetto di veicoli che giungono all'area di sosta da altre zone sostituendo veicoli che lasciano quell'area per spostarsi altrove. Il picco serale mostra il rientro dei veicoli partiti la mattina ce la sostituzione con quelli che ritornano alle loro zone di origine. Si giunge quindi ad una condizione di equilibrio dinamico tra veicoli che si spostano di area e che si ricaricano durante la sosta. Il picco di potenza principale è quello serale intorno alle ore 20:00 con 130 kW richiesti (ben al di sotto dei 240 kW massimi ipotizzabili a veicoli scarichi e tutti in ricarica) con il picco secondario delle 12:00 che vale circa 80 kW. La figura ci mostra una richiesta di potenza tendenzialmente lungo l'arco diurno della giornata per crollare intorno alla mezzanotte.

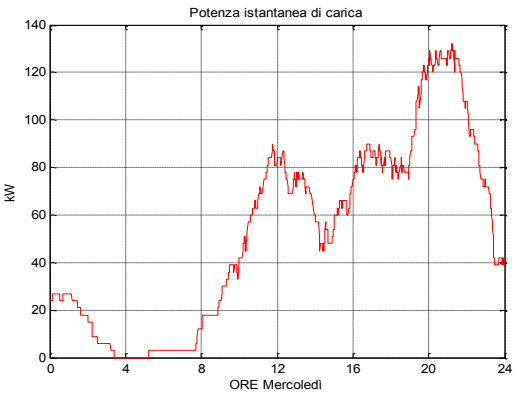


Figura 456. Profilo potenza istantanea di ricarica

La distribuzione giorno/notte nettamente distinta suggerisce la possibilità di approvvigionarsi in quota parte con energia non prelevata da rete ma proveniente da una fonte fotovoltaica presente durante le ore diurne. La sera visto il carico ridotto si può pensare ad un ricorso alla rete integrato eventualmente con un accumulo stazionario.

Partendo da tale profilo di carico si è sfruttata la piattaforma di progettazione e controllo [rapporto RdS/PAR2014/104] per valutare la migliore opportunità per realizzare una stazione di ricarica in grado di servire i veicoli in sosta con il minor costo energetico ed economico possibile.

Per poter eseguire il confronto con la stazione assemblata presso il laboratorio di Cassino la curva di carico è stata scalata in relazione alla taglia della macchina di conversione ivi presente poiché la macchina di taglia superiore da attivare in ENEA non è risultata disponibile. Per queste condizioni il profilo di carico ipotizzato e poi usato per la sperimentazione è rappresentato in Figura 457.

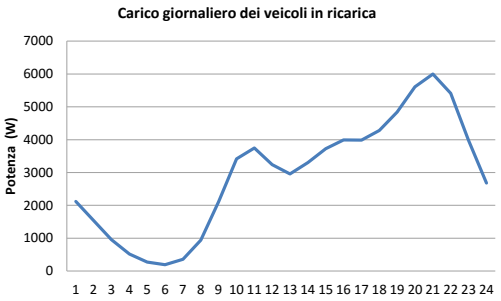


Figura 457. Diagramma di carico per test

Si è utilizzato allo scopo un impianto fotovoltaico di 5 kW di picco come potenza a.c. disponibile ai morsetti di impianto ed un accumulo di 28,8 kWh. La prima valutazione è stata eseguita con un profilo di campo estivo come mostrato in Figura 458. Il costo di investimento del sistema di accumulo è stato posto pari al valore reale di acquisto, 0,20 €/Wh.

Con queste condizioni di erogazione da PV e con il carico indicato si ha una situazione ottima con un accumulo di energia in batteria di 1,63 kWh durante la parte centrale della giornata, in corrispondenza delle ore con surplus di produzione fotovoltaica, ed un prelievo di 1,2 kWh dal sistema di accumulo la sera in prossimità del picco di costo maggiore di energia prelevata dalla rete.

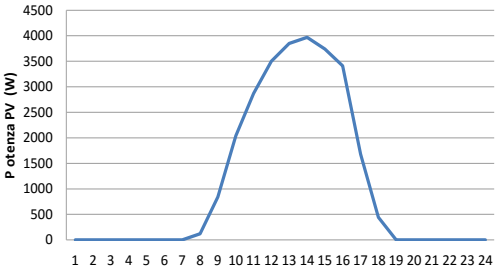


Figura 458. Potenza PV

All'interno della soluzione di ottimo è garantita una variazione nulla del SOC dell'accumulo stazionario nelle 24 ore. È da evidenziare che a causa del costo considerato per il sistema di accumulo, nella soluzione di ottimo non è presente il *time-shifting* con l'acquisto da rete. In particolare, per lo scenario di elettromobilità considerato non c'è convenienza ad acquistare energia da rete per accumularla nel pacco batteria nelle ore in cui il costo di energia è minore e successivamente utilizzarla nelle ore a maggiore costo dell'energia da rete per alimentare il carico.

Il bilancio energetico prevede un carico di 70,2 kWh forniti da rete per 44,36 kWh, 26,4 kWh da PV, 1,2 kWh da accumulo (Figura 459).

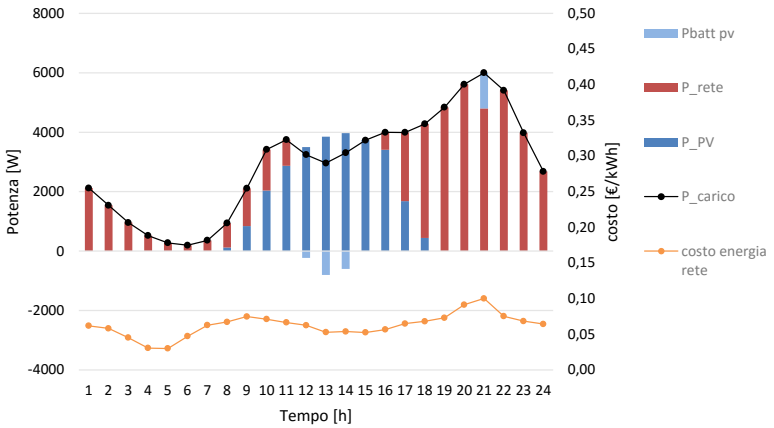


Figura 459. Esercizio previsto

Se invece durante l'esercizio le condizioni mutano con una riduzione dell'energia prodotta dal campo fotovoltaico al seguito di un ombreggiamento abbiamo una rideterminazione delle componenti come riportato in Figura 460.

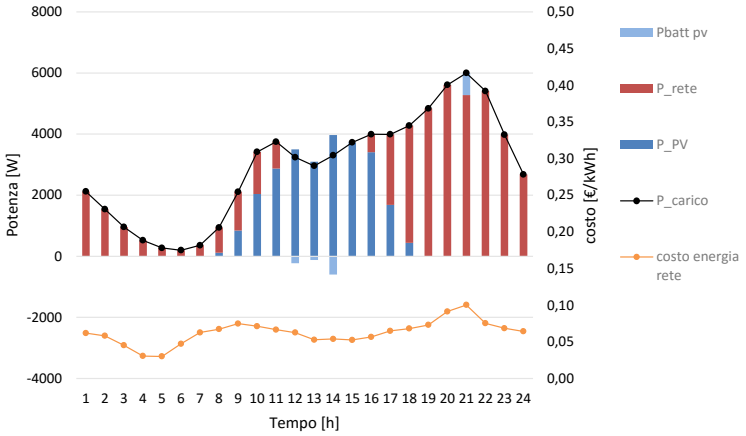


Figura 460. Esercizio con variazione previsione

Pur avendosi meno energia in batteria da parte del PV il sistema è ancora in grado di fornire energia la sera a compensazione del maggior picco di costo dell'energia da rete. La variazione della produzione PV viene presa in carico dalla macchina che muta le impostazioni di gestione e consente di seguire lo stesso il profilo di carico rilasciando meno energia verso le batterie e ripescando la sera l'energia necessaria per contenere il costo del picco serale. In Figura 461 i diagrammi relativi alle acquisizioni eseguite sul sistema sperimentale confermano la risposta alle variate condizioni di ingresso.

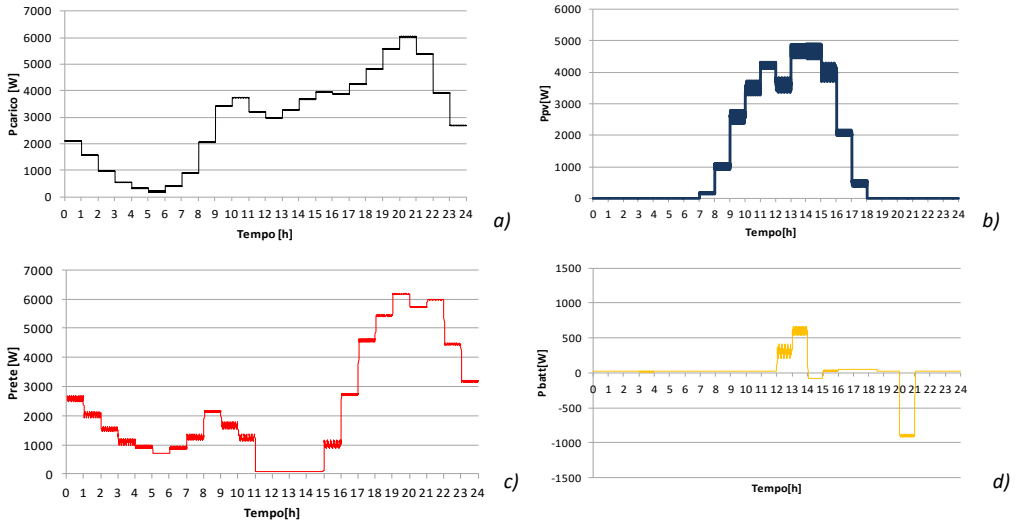


Figura 461. Misure su macchina in prova

Variando leggermente il profilo di carico la situazione non muta in modo sostanziale sia nelle condizioni previste di insolazione che di ombreggiamento.

Una terza prova è stata eseguita abbassando il costo di investimento per l'accumulo sino a 0,07 €/Wh. Durante il giorno in una fase di basso carico e minor costo di energia da rete viene prelevato un certo quantitativo di energia ed immagazzinato in batteria. Durante la fase serale del picco di carico viene fornita al carico sia l'eccedenza da PV accumulata di giorno che la quota di energia acquistata dalla rete. In Figura 462 è riportato il risultato di esercizio dell'impianto ed in Figura 463 le misure rilevate sulla stazione multi sorgente.

L'applicazione di sistemi integrati composti da fonte rinnovabile ed accumulo si è dimostrata utile nella gestione di impianti asserviti alla ricarica di veicoli elettrici. Partendo da un profilo di carica reale generato da veicoli su strada si è operato applicando le tecniche di gestione ottimizzate riportate nel rapporto RdS/PAR2014/104. Le simulazioni hanno confermato la possibilità di integrare l'accumulo a supporto della fornitura di energia in ore di forte richiesta e di poter mantenere un vantaggio anche in caso di acquisto di energia da rete a patto di ridurre il costo di acquisizione dell'accumulo.

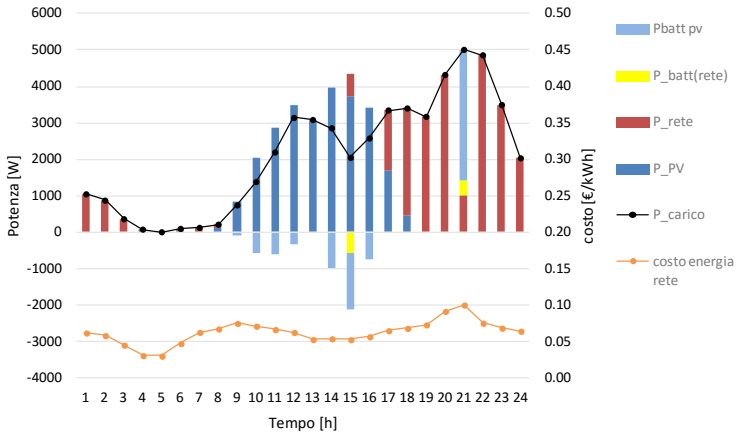


Figura 462. Prova con acquisto da rete

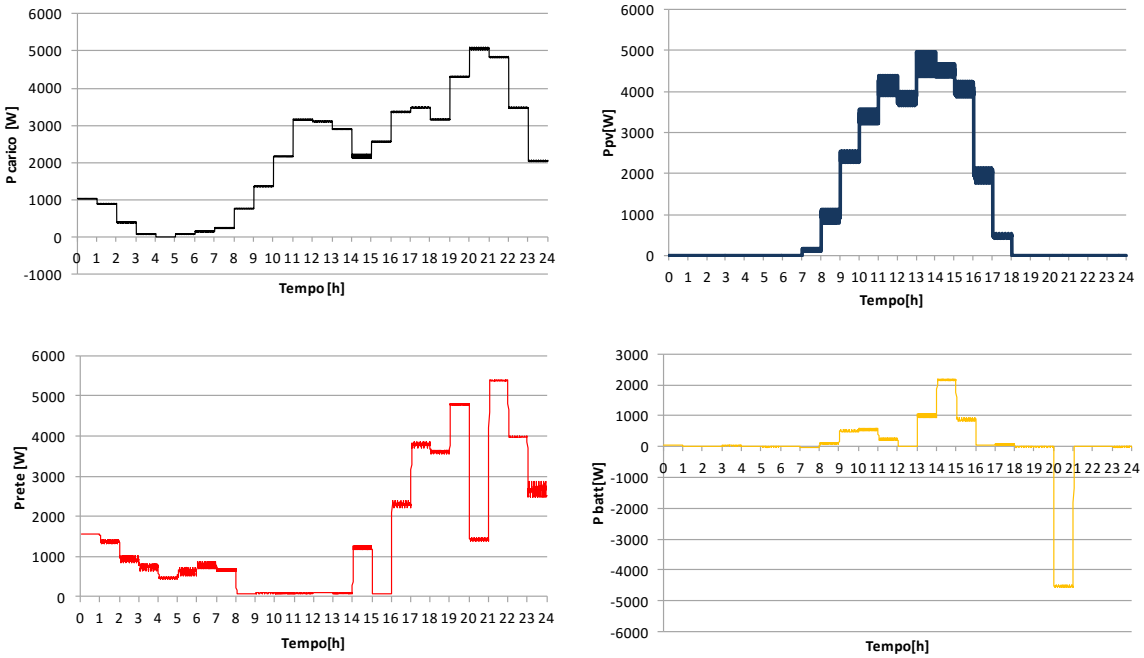


Figura 463. Misure su macchina nel caso di acquisto da rete

L'attività svolta è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/105.

a.3 Effetti della ricarica rapida sulle batterie

Il lavoro analizza il comportamento di sistemi d'accumulo elettrochimici sottoposti a carica rapida. In particolare, si vuole indagare sugli effetti da essa prodotti, sia in termini di capacità del sistema d'accumulo ad eseguire profili di lavoro che includono la carica rapida, senza incorrere nei limiti elettrici e termici, sia in termini di impatto della carica rapida sulla vita del sistema d'accumulo stesso.

Se è vero che la ricarica rapida e quella ultrarapida rispondono all'esigenza pratica e psicologica di avvicinare il più possibile le modalità d'uso del veicolo elettrico a quello convenzionale, è altrettanto vero che ben poco ancora si conosce sull'influenza delle correnti elevate in fase di carica sulla durata della batteria. Di conseguenza, i limiti di corrente "in carica" posti dai costruttori di batterie commerciali sono, cautelativamente, piuttosto bassi. La letteratura scientifica è abbastanza carente a riguardo ed ai molti studi di modellistica, caratterizzazione e confronto tra le varie tipologie di batterie, non fanno riscontro altrettante numerose ricerche sui cicli vita e sulla carica rapida. Se da un lato qualcosa è stato fatto a livello di sistema elementare (cella, elemento base del sistema

d'accumulo elettrochimico) dall'altro ben poco si conosce circa la vita e gli effetti della carica rapida a livello di sistema complesso (modulo o sistema batterie, dotato di più celle, opportunamente connesse) .

In realtà, esperienze di laboratorio stanno dimostrando come le correnti massime effettivamente accettabili da batterie litio-ione, anche economiche come le litio ferro fosfato commerciali, durante una "fast charge" possano essere doppie e triple di quelle dichiarate dai costruttori, senza notevole danno alla vita delle stesse, anche dopo l'esecuzione di migliaia di cicli di cariche e scariche parziali (profondità di scarica del 20-30%.

Sembra perciò importante approfondire questo tema con la finalità di indagare sugli effetti prodotti dalla carica rapida sui sistemi d'accumulo, valutare la fattibilità tecnica della carica rapida in termini di impatto sulle prestazioni e sulla vita dei sistemi d'accumulo e, conseguentemente, la sua fruibilità nell'ambito applicativo. A tale scopo si utilizzeranno gli stessi moduli 12 V - 60 Ah sviluppati nel corso dei precedenti PAR, particolarmente adatti alla carica rapida in quanto termostatati a mezzo ventole. La prova vita, già avviata a correnti di carica pari ad 1,5 volte il valore della capacità nominale, è stata quindi "accelerata" raddoppiando il valore della corrente. La curva di degrado delle prestazioni sarà indicativa del rapporto esistente tra lo stress cui è sottoposta la batteria e la vita della stessa, dando una prima risposta al problema della determinazione del costo "a fine vita" della batteria di un veicolo elettrico utilizzato con modalità di carica rapida, quale potrebbe essere, ad esempio, un autobus in servizio urbano.

Il presente lavoro si riferisce a sistemi d'accumulo di tipo elettrochimico che utilizzano batterie agli ioni di litio con tecnologia catodica LFP (litio ferro fosfato, $LiFePO_4$). Lo studio è stato condotto dapprima a livello di cella, elemento base nell'architettura dei sistemi d'accumulo: sono state impiegate celle al litio ferro fosfato da 60 Ah, sottoposte ad una prova vita secondo un profilo di lavoro che include una fase di carica ad un'intensità di corrente pari a tre volte il valore di capacità nominale delle celle. I campioni testati hanno eseguito circa 2000 cicli senza evidenziare rilevanti degradazioni delle prestazioni.

Le prove sono state condotte utilizzando uno dei ciclatori (convertitori AC/DC bidirezionali) presenti presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia. Il ciclatore è in grado di eseguire fasi di carica e scarica del sistema d'accumulo in condizioni programmate (modalità di carica/scarica, intensità della corrente, condizioni di fine fase) e controllate, comportandosi da alimentatore nelle fasi di carica e da carico in quelle di scarica. L'energia estratta dalle batterie durante le fasi di scarica viene immessa in rete. Un'immagine della macchina utilizzata è riportata in Figura 464. La frequenza di acquisizione è impostabile durante la configurazione della prova, fino ad un valore massimo di 5 Hz. E' possibile impostare valori diversi del tempo di acquisizione in fasi diverse dello stesso ciclo di lavoro.



Figura 464. Ciclatore utilizzato per l'esecuzione delle prove

Le prove sono state eseguite alla temperatura RT di +23 °C (prove su cella) e +27,5 °C (prove su modulo) assicurate dal sistema di condizionamento installato nella sala prove dell'edificio. La temperatura del campione durante la prova è stata misurata applicando su di esso il sensore della termocoppia tipo K in dotazione al ciclatore. L'altro sensore di temperatura, Pt100, di cui è corredato il ciclatore, è stato posizionato in prossimità del campione per registrare il valore della temperatura nell'ambiente di prova. La differenza tra i valori registrati dai due sensori permette di calcolare il riscaldamento che il campione subisce durante l'esecuzione del test.

Il profilo di lavoro utilizzato per le prove è compatibile con una tipologia di missione per minibus richiesta dal TPL (Trasporto Pubblico Locale): nei pochi minuti di sosta al capolinea, il mezzo carica l'energia di cui necessita per eseguire il percorso di servizio. In questo ambito, si esalta un concetto di carica rapida che è diverso da quello legato in senso assoluto al valore della potenza o del tempo di carica, riportato nella sua definizione: si può parlare, infatti, di carica rapida legata alla missione del veicolo, in cui il veicolo in pochi minuti si carica parzialmente (quindi non si tratta di carica completa) della sola energia di cui ha bisogno per eseguire la sua missione. Sulla base della compatibilità del profilo di lavoro utilizzato per i test con una tipologia di missione richiesta dal TPL, verrà realizzato un sistema batterie che al termine della campagna di prove sul modulo sarà installato a bordo di un minibus: quest'ultima parte delle attività sarà eseguita nell'ambito del "Progetto ENEA-CNR per lo sviluppo del tessuto produttivo del Mezzogiorno" che si svolge parallelamente ed in coordinamento con le attività della Ricerca di Sistema Elettrico.

La tipologia di cella testata è agli ioni di litio, con catodo al litio ferro fosfato $LiFePO_4$ ed anodo in grafite, geometria prismatica (Figura 465).



Principali caratteristiche della cella

Tipo		litio-ione, LFP
Capacità		60 Ah
Tensione	Nominale	3,20 V
	Minima	2,50 V
	Massima	3,65 V
Corrente max. continuativa	Scarica	180 A (3C)
	Carica	60 A (1C)
Temperatura di esercizio	Scarica	-20 ÷ +60°C
	Carica	0 ÷ +45°C

Figura 465. Cella litio-ione LFP 60 Ah

Le prove sono state eseguite a partire da SOC (stato di carica) iniziale 75%, sottoponendo il campione al seguente profilo di lavoro:

- carica a corrente costante di valore 3C (180 A) per 300 s;
- pausa per 60 s;
- scarica a corrente costante di valore 2/3C (40 A) per 1200 s;
- pausa per 60 s.

Il profilo è rappresentato in Figura 466, considerando negativa la corrente in scarica e positiva in carica. La prova consiste nel sottoporre il campione all'esecuzione continuativa del profilo di lavoro, con interruzione periodica dopo 350 ripetizioni per effettuare il controllo delle prestazioni. Detto controllo avviene tramite l'esecuzione di due cicli standard, di cui il primo ha funzione di reset ed il secondo viene utilizzato per il computo delle prestazioni: misura carica elettrica ed energia erogate durante la fase di scarica standard, calcolo del rendimento coulombico ed energetico.

La prova ha termine se il campione presenta segni di danneggiamento, oppure non riesce ad eseguire il profilo di lavoro (superamento della temperatura o della tensione massima, raggiungimento di una tensione inferiore al valore minimo)

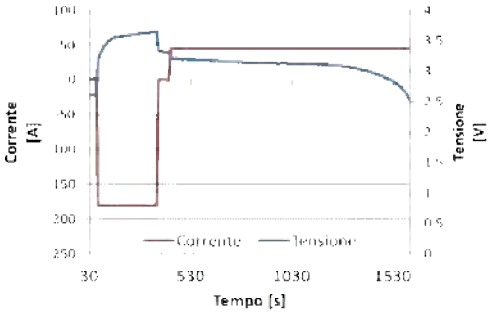


Figura 466. Profilo di carica/scarica utilizzato per la prova vita a livello di cella

In termini di carica elettrica, la quantità erogata nella fase di scarica (13,3 Ah) è leggermente inferiore a quella accumulata nella fase di carica (15 Ah): ciò consente l'esecuzione ciclica del profilo senza necessità di ricariche complete intermedie. Si noti che la fase di carica avviene ad un'intensità di corrente pari a 3C, mentre la corrente massima continuativa riportata nella specifica tecnica fornita dal Costruttore è 1C: ciò rende il tipo di celle utilizzate particolarmente adatto ad evidenziare/esaltare gli effetti della carica rapida, a cui il lavoro relativo al presente documento è dedicato.

Infine, come accennato, il profilo di lavoro è compatibile con la missione, rispondente a specifiche esigenze di TPL, di un veicolo tipo minibus che carica in pochi minuti al capolinea l'energia necessaria a compiere la tratta su cui è in servizio.

La prima evidenza sperimentale è che i campioni testati sono stati in grado di eseguire il profilo di lavoro, senza mostrare danneggiamento: tensione e temperatura rimangono nei limiti di normale funzionamento (rispettivamente 2,50 ÷ 3,65 V, +45°C in carica, +60°C in scarica), non si evidenziano deformazioni o rotture dell'involucro della cella. Nelle Figure 467 e 468 è riportato un andamento tipico di queste grandezze.

In tali condizioni, sono stati eseguiti più di 2.000 cicli. Durante il check periodico delle prestazioni, Figura 469, non si è verificato un loro decadimento significativo.

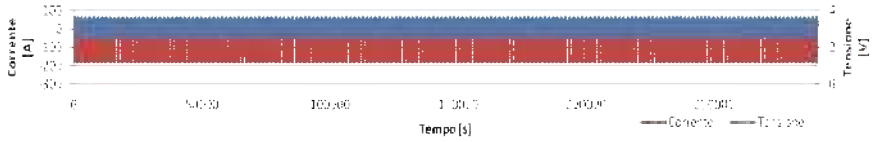


Figura 467. Andamento tipico della tensione durante l'esecuzione della prova

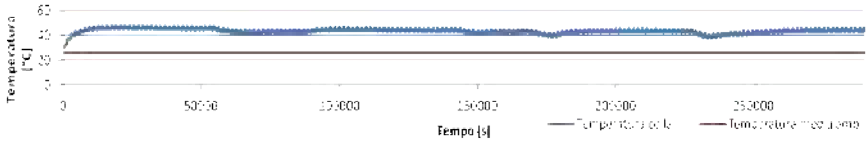


Figura 468. Andamento tipico della temperatura durante l'esecuzione della prova

Sulla base degli incoraggianti risultati ottenuti, anche se non è stata raggiunta la condizione di fine vita delle celle, è stato deciso di ripetere la prova a livello di modulo batterie. La prova è stata svolta su uno dei moduli sviluppati in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico. In particolare, è stato utilizzato uno dei moduli dell'ultima versione, precedentemente impiegato in cicli di caratterizzazione per dimostrare la versatilità applicativa in ambito veicolare e stazionario, e un ciclo di carica/scarica con carica 1,5C e scarica 0,6 C (eseguiti 400 cicli, senza rilevare decadimento prestazionale).

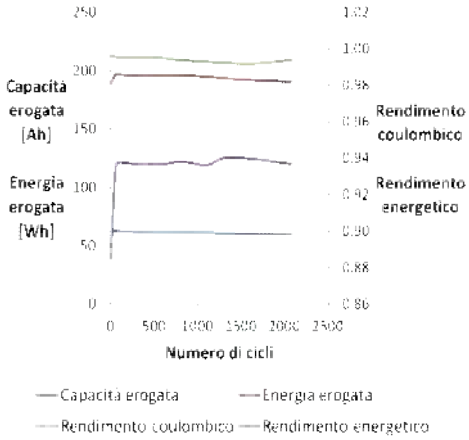


Figura 469. Diagrammi delle prestazioni rilevate durante il check periodico

Il modulo batterie, rappresentato in Figura 470, è costituito da 4 celle litio-ioni con tecnologia catodica di tipo LFP, tensione nominale 3,2 V_n e capacità 60 Ah, collegate in serie.

Il modulo batterie è stato sottoposto ad una prova vita, applicando il seguente profilo di lavoro:

- fase 0: stato di carica iniziale 100%,
- fase 1: scarica a corrente costante di intensità 1C (60 A) per la durata di 900 s,
- fase 2: pausa di durata 60 s,
- fase 3: carica a corrente costante di intensità pari a 3C (180 A) per la durata di 300 s
- fase 4: pausa di durata 60 s,
- fase 5: ripetizione iterativa delle fasi da 1 a 4 per un periodo di tempo pari a 10 h,
- fase 6: carica lenta e completa (carica standard) fino a ripristinare lo stato di carica iniziale 100%.

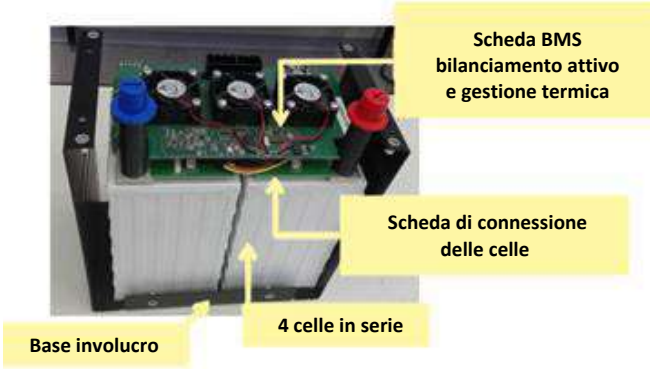


Figura 470. Modulo batterie litio-ioni LFP 12,8 V - 60 Ah

Questo profilo è leggermente di verso da quello utilizzato per le prove a livello di cella: in particolare, la durata della scarica compensa la quantità di carica accumulata durante la carica. Il ciclo è equilibrato in termini di quantità di carica, quindi, per effetto del rendimento, l'energia erogata nella scarica è maggiore di quella accumulata nella carica. Di conseguenza il modulo batterie va progressivamente scaricandosi col procedere dell'iterazione. Dopo 10 h di funzionamento, il modulo batterie viene caricato completamente con una carica standard.

Ciò è stato fatto per ottenere una migliore corrispondenza del profilo di prova a quello richiesto da una specifica tipologia di missione del trasporto pubblico locale, in cui il mezzo carica in pochi minuti, durante la sosta al capolinea, la quantità di carica di cui necessita per percorrere la tratta su cui è in servizio. Al termine del servizio, il mezzo rientra al deposito, ove riceve la carica completa, pronto per tornare in servizio il giorno successivo con le batterie completamente cariche. Questa corrispondenza verrà illustrata con maggiore dettaglio più avanti.

Come già evidenziato a proposito delle prove a livello di cella, la corrente massima continuativa in carica riportata nella specifica tecnica del costruttore delle celle è 1C, mentre la fase di carica rapida utilizzata nel profilo di prova avviene ad un'intensità pari a 3C: ciò rende il modulo batterie impiegato particolarmente adatto ad evidenziare/esaltare le problematiche e gli effetti della carica rapida sui sistemi d'accumulo. Inoltre, il modulo batterie utilizzato per la prova vita è stato approntato con celle già disponibili in virtù degli acquisti effettuati nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, e già sottoposte a cicli di caratterizzazione e profili di lavoro simili a quello attuale, anche se meno impegnativi dal punto di vista della carica (sono state effettuate cariche entro il limite massimo consigliato dal Costruttore delle celle): anche il fatto di utilizzare un modulo batterie non completamente nuovo, è un elemento di utilità per esaltare gli effetti della carica rapida sui sistemi d'accumulo.

Nella fase di carica rapida, il punto di lavoro delle celle si porta immediatamente in corrispondenza della tensione massima consentita ed accade che la fase di carica viene presto interrotta per raggiungimento delle condizioni di allarme/errore per sovratensione. Inoltre, ciò avviene tanto più facilmente quanto più le celle sono squilibrate. La Figura 471 mostra questa situazione.

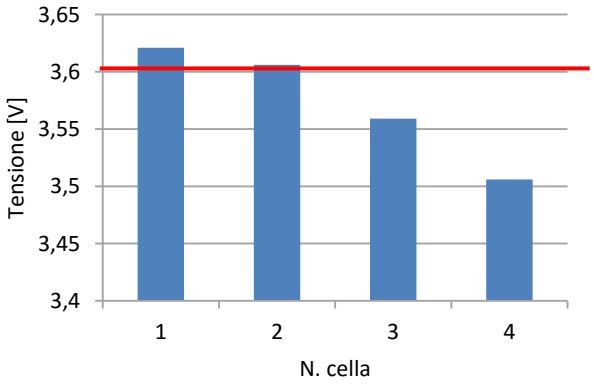


Figura 471. Squilibrio tra le celle nella fase di carica rapida

La linea rossa rappresenta il limite di tensione massima impostato a 3,6 V. Durante la fase di carica rapida le celle raggiungono la tensione massima e la prima che supera la soglia determina l'insorgere delle condizioni di allarme con conseguente arresto della carica.

La situazione migliora se le celle sono bilanciate in quanto tutte aumentano parallelamente di tensione ed è possibile sfruttare a pieno la potenzialità del modulo, fino alla tensione massima. Il requisito che questa esperienza suggerisce per i sistemi d'accumulo sottoposti a carica rapida è un bilanciamento molto spinto delle celle, in modo da consentire al sistema di lavorare appena sotto la soglia di tensione massima, senza superarla. Nel caso del modulo batterie in esame, il bilanciamento delle celle viene eseguito automaticamente dal BMS al termine della fase di carica completa, che corrisponde nella realtà applicativa alla carica delle batterie del mezzo effettuata in deposito durante la pausa notturna.

Infine, per poter proseguire le prove, è stato necessario modificare la fase di carica rapida dalla tipologia "a corrente costante" alla tipologia "a corrente costante/tensione costante": in questo modo di carica, il dispositivo di carica mantiene la corrente costante fino al raggiungimento della tensione massima impostata, dopodiché mantiene costante il valore di tensione e riduce progressivamente l'intensità della corrente secondo il principio che tanto più il sistema batterie va caricandosi, tanto meno è disposto ad accettare carica. Si noti che tale modalità di carica è comunemente eseguita sia dal ciclatore, che dalle stazioni di carica, ed è pertanto una

tipologia di carica completamente fruibile non solo a livello di laboratorio, ma anche a livello applicativo.

Per effetto della modifica, il profilo di lavoro diventa come di seguito:

- fase 0: stato di carica iniziale 100%,
- fase 1: scarica a corrente costante di intensità 1C (60 A) per la durata di 900 s,
- fase 2: pausa di durata 60 s,
- fase 3: carica a corrente costante con intensità di corrente pari a 3C (180 A) fino al raggiungimento del valore di tensione 14.4 V e quindi proseguimento della carica a tensione costante e corrente decrescente fino al raggiungimento del tempo complessivo di fine fase, 300 s,
- fase 4: pausa di durata 60 s,
- fase 5: ripetizione iterativa delle fasi da 1 a 4 per un periodo di tempo pari a 10 h,
- fase 6: carica lenta e completa (carica standard) fino a ripristinare lo stato di carica iniziale 100%.

Nella Figura 472 tale profilo viene mostrato tramite un print screen del computer asservito al ciclatore, durante l'esecuzione della prova.

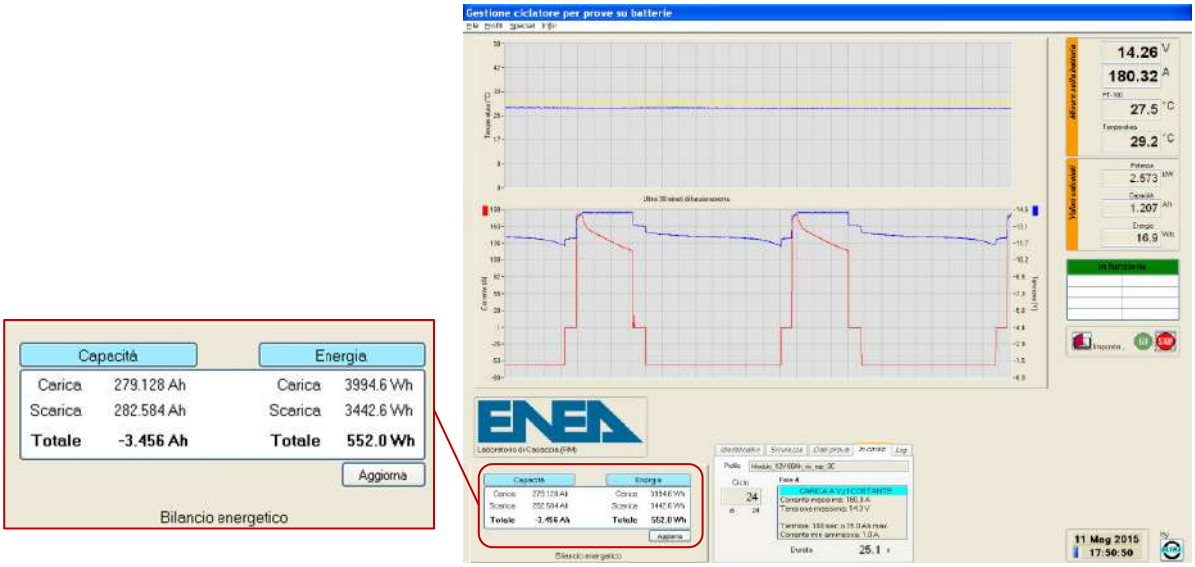


Figura 472. Profilo di lavoro utilizzato per la prova vita sul modulo

Il modulo batterie ha mostrato capacità di eseguire il profilo di lavoro: non sono emerse deformazioni (rigonfiamenti) dell'involucro delle celle, tensione e temperatura rimangono nei limiti di normale funzionamento. La Figura 473 ne illustra l'andamento tipico su 30 ripetizioni del profilo, corrispondenti a circa 10 ore di esercizio.

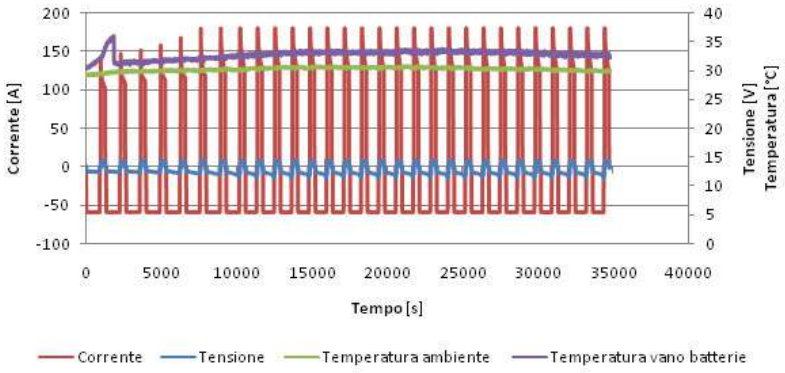


Figura 473. Andamento tipico delle grandezze elettriche e termiche durante la prova vita

Dalla Figura 472 si nota il beneficio conseguito grazie all'impiego della carica rapida. Nel dettaglio relativo al bilancio della quantità di carica elettrica, si osserva che, al momento in cui è stato eseguito il print screen dal PC

asservito al ciclatore, è in corso il ciclo 24 (corrispondente a circa 8 ore di funzionamento) e la quantità di carica elettrica erogata è pari a 282 Ah, che è più di 4 volte il valore di capacità nominale del modulo batterie. Grazie alla capacità del modulo di accettare la carica rapida, tale quantità di carica è stata erogata senza necessità di eseguire ricariche complete (ne sarebbero state necessarie 4). Tradotto in termini applicativi, con riferimento ad un mezzo che esegue un servizio di TPL secondo il profilo di lavoro in questione, ciò vuol dire che il sistema batterie del veicolo può erogare una quantità di carica elettrica maggiore della capacità nominale, senza interruzione del servizio. Si manifesta quindi il ruolo della carica rapida nel tentativo di dar soluzione al problema della scarsa autonomia dei veicoli elettrici.

Il check periodico delle prestazioni, effettuato interrompendo l'esecuzione del profilo ogni 100 ripetizioni circa ed eseguendo il ciclo standard per la verifica delle prestazioni di capacità/energia erogata ed efficienza, evidenzia che non è emerso un loro decadimento significativo

ENEA in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, sta realizzando, nell'ambito del "Progetto ENEA-CNR per lo sviluppo del tessuto produttivo del Mezzogiorno", un sistema batterie complesso costituito per l'appunto da 24 moduli 12,8 V - 60 Ah: tale attività è stata concepita per studiare la realizzazione di sistemi complessi a partire da moduli standard (viene affrontata la problematica della connessione serie/parallelo dei moduli e dell'elettronica che gestisce i moduli stessi, singolarmente e nel loro insieme, con la problematica del bilanciamento intra ed extra modulo, all'interno della medesima stringa e tra stringhe diverse). Il sistema batterie (Figura 474), una volta terminato e testato, verrà installato a bordo di un minibus Gulliver messo a disposizione dal Centro Ricerche per il Trasporto e la Logistica dell'Università Sapienza di Roma.



Figura 474. Vano porta batteria completo di moduli

Possiamo quindi concludere che l'applicazione di un'alta corrente di carica determinando un'inevitabile incremento di tensione dovuto al prodotto del valore di corrente per il valore di resistenza. E quindi lo spostamento "verso l'alto" del punto di lavoro. Quindi tale aumento di tensione può avvenire senza superare la soglia di tensione massima solamente quando lo stato di carica è basso. Ovvero, l'applicazione di alte correnti di carica può essere sostenuta dal sistema d'accumulo senza superare la soglia di tensione massima quando il sistema d'accumulo si trova a bassi SOC (da circa il 30% in giù, come mostrato in precedenza, nel caso dell'esperienza eseguita nella presente attività). Ciò vuol dire che, come tipologia di carica, non è possibile applicare la "carica a corrente costante" per tutti gli stati di carica, ma è necessario sostituire quest'ultima con la "carica a corrente costante/tensione costante": con tale metodo, il dispositivo di carica fornisce al sistema d'accumulo la massima corrente che esso può accettare senza superare il limite di tensione massima e mantiene tale valore di corrente finché la tensione raggiunge, ma non supera, il suo valore massimo (fase a corrente costante), dopodiché riduce dinamicamente la corrente mantenendo costante il valore di tensione fino alla fine della carica (fase a tensione costante). Il valore di corrente massima assorbita dal sistema d'accumulo durante la fase di carica aumenta con il diminuire dello stato di carica.

Un altro requisito del sistema d'accumulo imposto dalla carica rapida è l'equalizzazione delle celle. Infatti, a causa dell'incremento di tensione dovuto all'elevata corrente di carica, le celle si portano in prossimità della tensione massima ed è molto importante che i rispettivi livelli di tensione siano tra loro molto vicini per evitare che anche una sola di esse superi il limite di tensione massima (ciò determinerebbe l'immediata interruzione della carica stessa ad opera del sistema elettronico di gestione e controllo del sistema d'accumulo). Inoltre, la bassa dispersione dei valori di tensione aiuta ad aumentare la quantità di carica che si riesce ad immettere nel sistema d'accumulo, in quanto le celle raggiungono tutte insieme la condizione di fine carica mentre nel caso opposto una sola cella raggiungerebbe la condizione di fine carica (determinando così la fine della carica per tutto il sistema) con le altre celle ancora potenzialmente in grado di accettare carica.

Nel caso in esame, il sistema elettronico che gestisce e controlla le celle dal punto di vista elettrico e termico fa sì che durante l'esecuzione del profilo di lavoro con carica rapida la tensione e la temperatura delle celle rimangano nei limiti di normale funzionamento: ciò ha consentito l'esecuzione di 650 cicli senza provocare un degrado significativo delle prestazioni per cui la carica rapida sembra, al momento, tecnicamente fattibile. Le prove continueranno sino a raggiungere la condizione di fine vita, corrispondente ad una riduzione delle prestazioni pari al 20% rispetto ai valori di inizio prova.

E' stato mostrato che il particolare profilo di lavoro con carica rapida, utilizzato per la prova vita del modulo batterie, può avere come riscontro applicativo il caso di un minibus, tipo il "Gulliver" della Tecnobus, in servizio su una tratta di pochi chilometri, che nei pochi minuti di sosta al capolinea carica le batterie per la quantità di energia

necessaria a compiere il percorso. Questo genere di servizio corrisponde ad una tipologia di missione effettivamente richiesta dal Trasporto Pubblico Locale (trasporto nodale). Il bilancio della quantità di carica elettrica per un giorno di esercizio mostra che la carica rapida consente al sistema d'accumulo di erogare una quantità di carica superiore alla sua capacità nominale, senza interposizione di ricariche lente e complete: ciò vuol dire che il mezzo può svolgere la propria missione senza interruzione del servizio. Tutto il presente lavoro è stato impostato pensando ad un tipo di carica rapida che potesse avere un riscontro applicativo: invece che parlare di carica intesa in senso assoluto, appare più corretto parlare di carica rapida correlata al tipo di veicolo e di missione che esso dovrà svolgere. Non è la carica rapida in sé ad avere successo, quanto il connubio "carica rapida – batterie - veicolo – missione" nel suo insieme. In questo senso la carica rapida si colloca come valido elemento d'ausilio per risolvere il problema della scarsa autonomia dei veicoli elettrici.

Per giungere ad una completa conferma di tutto quanto sopra riportato, il programma di lavoro ha necessità di essere continuato, con la prosecuzione della prova vita sul modulo batterie fino alla sua conclusione e, nel caso auspicato di esito soddisfacente, con la verifica finale sul minibus di un sistema batterie completo.

L'attività svolta è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2014/106.

b. interazioni mobilità urbana/reti intelligenti

La mobilità è stata oggetto nei PAR precedenti di attente valutazioni relative alle capacità di utilizzo di veicoli elettrici all'interno del sistema dei trasporti privato e pubblico. La metodica utilizzata basata sulla analisi di dati reali provenienti da una campagna di monitoraggio continua ed estesa ha consentito di vagliare gli spostamenti sul territorio urbano. Queste informazioni hanno avuto modo di individuare sia le percentuali di sostituzione convenzionale/elettrico sulla base delle prestazioni indicate dai costruttori. Le esigenze di creare sul territorio strutture di ricarica aperte al pubblico, come indicato dal PNIRE, offrono l'opportunità di produrre uno strumento di ausilio nella distribuzione delle strutture di ricarica all'interno della rete stradale. Lo scopo finale del lavoro è quello di andare incontro alle esigenze dell'eventuale utente di vetture elettriche, in maniera da assicurare su base calcolata il rispetto del vincolo di autonomia dello spostamento mediante una dislocazione ben valutata delle stazioni di ricarica sul territorio urbano.

b.1 La distribuzione delle infrastrutture per l'elettromobilità in ambito urbano

La disponibilità di un'infrastruttura di ricarica ben ritagliata sulle esigenze dell'utenza è importante ai fini dello sviluppo della mobilità elettrica. La Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan), evidenzia che la disponibilità di punti di ricarica standardizzati risulta un fattore determinante per dare un impulso al mercato delle auto elettriche (PEV/PHEV), e occorre che la ricerca, oltre agli obiettivi di sviluppo tecnologico (quali sistemi di accumulo, di ricarica e di comunicazione tra veicolo e rete), si concentri anche sull'eliminazione di queste che al momento sono barriere infrastrutturali.

L'utilizzo nello studio della mobilità di grandi raccolte di dati geo-referenziati, generati in grande quantità (Big Data) da varie sorgenti quali dispositivi mobili (smartphone, tablet e unità di bordo), siti WEB di social network e social forum, rende possibile un approccio quantitativo innovativo al problema della creazione di un'infrastruttura di ricarica elettrica, sia per quanto riguarda l'aspetto della collocazione ottimale delle stazioni sul territorio che per ciò che concerne la determinazione della loro taglia energetica e di disponibilità di punti di ricarica.

L'analisi di questi Big Data porta ad una migliore comprensione dei comportamenti e delle abitudini dei viaggiatori, permettendo quindi la costruzione di modelli di simulazione più aderenti alla realtà. Questi, a loro volta, ci consentono di analizzare le prestazioni del trasporto urbano e di cogliere criticità ed opportunità di modernizzazione della viabilità, creando una soluzione di dettaglio più centrata nella sua accettabilità territoriale.

Il focus del presente studio è stato quello di sviluppare nuovi strumenti per aumentare l'efficienza e l'affidabilità dei processi decisionali relativi alla pianificazione delle infrastrutture elettriche ed allo sviluppo del trasporto elettrico urbano. In particolare, lo studio si è concentrato sulle infrastrutture di ricarica per le auto elettriche che vadano incontro alle esigenze dell'eventuale utenza di vetture elettriche, in maniera da assicurare su base calcolata il rispetto del vincolo di autonomia dello spostamento mediante una dislocazione ben valutata delle stazioni di ricarica sul territorio urbano.

Lo studio si è basato sull'analisi di una grande quantità di dati raccolti dalla compagnia privata OctoTelematics. I dati riguardano gli spostamenti compiuti dai veicoli e contengono informazioni quali posizione, velocità, tempo, distanza percorsa. In particolare, il set di dati utilizzati riguarda la città metropolitana di Roma e copre 6 giorni lavorativi (lunedì-sabato) del mese di Maggio 2013. Essi rappresentano un dato significativo dell'andamento del traffico urbano, coprendo circa il 6% del parco vetture circolante all'epoca del rilevamento.

L'analisi del database ha permesso di determinare il numero di viaggi effettuati nel periodo di osservazione, le distanze coperte, la distribuzione geografica dei punti di arrivo delle traiettorie convergenti entro il Grande Raccordo Anulare (GRA) di Roma. I dati sono stati quindi opportunamente filtrati e considerati tra le ore 7:00 e le 10:00, poiché l'interesse del presente lavoro è focalizzato sullo studio dei viaggi casa-lavoro e degli spostamenti verso punti di attrazione al fine di individuare i parametri di distribuzione geografica e dimensionamento di potenza e di affluenza per le infrastrutture di ricarica.

Una opportuna tecnica di analisi di tipo statistico (la Cluster Analysis) è stata applicata alla distribuzione geografica dei punti di sosta entro il GRA (Figura 475) per suddividere tale insieme in gruppi di aggregazione, a ciascuno dei quali si può far corrispondere una zona urbana delimitata; la suddivisione è stata pilotata dal criterio di ottenere la somma complessiva minima degli spostamenti degli utenti della sosta rispetto ai centri geografici (baricentri o centroidi) di ciascuna zona.

La Figura 475 presenta il risultato della Cluster Analysis sui dati di sosta riportati nella stessa figura.

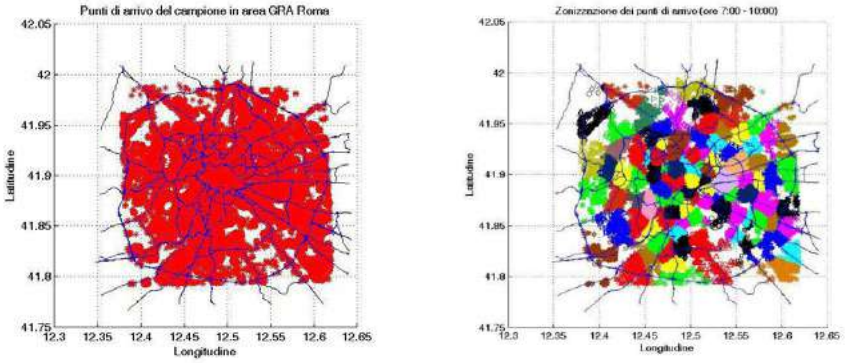


Figura 475. I punti di sosta entro il GRA di Roma e risultato della Cluster Analysis

Il presente studio quindi ha voluto offrire una metodologia per la pianificazione delle strutture di ricarica, tenendo principalmente conto delle esigenze dei consumatori. Questa metodologia rappresenta una prima risposta al problema, che nella realtà risulta essere molto più complesso. Infatti, nel pianificare un'infrastruttura di ricarica per i veicoli elettrici è necessario tenere conto anche dell'interazione di tale infrastruttura con il sistema elettrico territoriale, della effettiva conformazione del territorio, come pure delle politiche nazionali e comunitarie in materia di energia elettrica.

Inoltre, il modello demand-side deve essere necessariamente integrato con modelli di business che garantiscano gli opportuni ritorni economici agli operatori privati, che nel presente contesto devono necessariamente essere coinvolti in una impresa difficilmente sostenibile dal solo intervento pubblico.

Un secondo sviluppo della metodologia ha riguardato la valutazione per ciascuna zona identificata dalla Cluster Analysis della quota energetica elettrica spesa dal campione OctoTelematics per arrivare dai suoi vari punti di origine al punto di sosta entro il GRA di Roma, supponendo che tale campione abbia effettuato il passaggio alla trazione elettrica pura e si sia orientato su due vetture prese come riferimento dei consumi: la Nissan Leaf (per i viaggi più lunghi di 10 km.) e la Mitsubishi i-Miev (per i viaggi più corti di 10 km.). Questa valutazione zona per zona ha implicato l'esecuzione dell'analisi energetica di ogni viaggio e la stima per ciascuno dei suoi consumi elettrici tramite due modelli empirici di consumo per le vetture scelte, appositamente sviluppati nella nostra analisi.

La Figura 476 presenta le quote di consumo (in kWh) stimate per ciascuna zona e riferite tramite codifica cromatica ai centroidi e i livelli di affluenza dell'utenza (numero medio veicoli/giorno) per ciascuna zona, riportate tramite codifica cromatica ai centroidi.

In questo modo si è realizzata una zonizzazione della città di Roma relativamente all'impegno energetico di ciascuna zona (nell'ipotesi che ciascun utente che vi sosta voglia fare una ricarica di reintegrazione), ed all'affluenza prevedibile in ciascuna di esse.

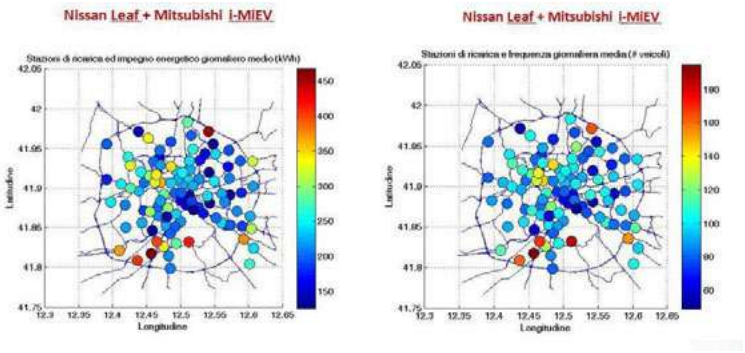


Figura 476. Livelli di consumo e affluenze per ciascuna zona

Gli ulteriori sviluppi della presente metodologia dovrebbero considerare l'analisi dettagliata del rapporto tra ciascun gruppo/zona ed i punti di attrazione presenti al suo interno, come pure l'utilizzo ottimale di ogni stazione di ricarica elettrica, mediante una configurazione adeguata della sua offerta di punti di ricarica lenti e veloci (in termini di numero di punti di connessione alla rete elettrica, di tipologia, di potenza assegnata a ciascuno di essi, ecc.), in base all'affluenza ed alla richiesta energetica dell'utenza che vi si riferisce, che è stata stimata nel lavoro presente. La configurazione dovrebbe essere parametrizzabile, in modo che possa affrontare bene tutte le possibili variazioni nell'utenza. Questa integrazione metodologica costituirebbe la tappa di chiusura dell'intero ciclo e aprirebbe le porte ad una capacità di sviluppo progettuale operativo.

Per approfondimenti sul lavoro svolto si rimanda al rapporto RdS/PAR2014/107.

b.2 V2G gli aspetti di rete e di interfaccia di potenza: impatto sul sistema di accumulo

In un'ottica di sviluppo sostenibile, assumono un ruolo centrale la razionalizzazione ed il risparmio nell'uso dell'energia elettrica nell'elettromobilità. Notevoli potenzialità sono offerte dal paradigma di *smart grids*, il quale consiste nella decentralizzazione della gestione ottimale delle reti elettriche e dei carichi ad esse connessi al fine di ottimizzare le prestazioni complessive del sistema da un punto di vista economico, energetico ed ambientale. Per essere intelligente una rete deve integrare le azioni di tutti gli attori connessi, quindi non solo le azioni dei produttori (il paradigma tradizionale), ma anche quelle dei consumatori e dei produttori-consumatori (*prosumers*). Pertanto la *smartness* non è richiesta soltanto ai singoli componenti ma anche alle strategie di impiego per l'operatività congiunta dei componenti connessi a livello energetico e a livello informativo. Il binomio "veicolo elettrico - smart grid" è ampiamente trattato nella letteratura scientifica di settore degli ultimi anni ed emerge che, così come è evidente la centralità dell'aspetto infrastrutturale nella diffusione della mobilità elettrica, è anche opinione condivisa che i veicoli elettrici possano svolgere un ruolo importante per il futuro delle reti attive. In quest'ottica, la gestione intelligente della ricarica dei veicoli costituisce un tema d'innovazione che vede potenziali vantaggi per la rete in termini sia di adattabilità della domanda che di stoccaggio distribuito, e quindi di resilienza della rete stessa.

La gestione intelligente della ricarica dei veicoli elettrici in prospettiva *vehicle-to-grid* (V2G) è basata sul flusso bidirezionale di energia tra veicolo e rete, annoverando così gli accumulatori elettrochimici a bordo veicolo come una fonte di stoccaggio distribuito dell'energia elettrica Nell'ambito del PAR 2013 è stata svolta un'attività inerente alla realizzazione di un modello energetico sviluppato in ambiente Matlab/Simulink® per la determinazione delle perdite e dei rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare interattivo con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. Il modello, sviluppato in ottica parametrica e modulare in modo da poter essere esteso a diverse taglie di convertitore e di accumulatore elettrochimico, è basato su mappe di efficienza energetica che possono essere desunte da dati di letteratura, modelli circuitali o prove sperimentali.

In un'ottica di prosecuzione del lavoro, le attività oggetto della presente collaborazione sono volte alla validazione, per mezzo di prove di laboratorio, dello strumento di calcolo sviluppato nell'ambito della precedente collaborazione. In particolare, le misure sperimentali sono finalizzate alla determinazione delle mappe di efficienza energetica del convertitore e di accumulatori al litio da trazione stradale. Le mappe di efficienza energetica determinate sperimentalmente permettono così la validazione del modello energetico di sistema sulla base di simulazioni di casi di studio con profili di carico di rete reali.

In Figura 477 è riportata la schematizzazione dei principali componenti di un sistema di ricarica con funzionalità V2G. Il convertitore elettronico di potenza è costituito da due stadi di conversione bidirezionali: lo stadio AC/DC e lo stadio DC/DC. Il filtro lato rete ed il filtro lato batteria, necessari al fine di limitare la distorsione armonica della

corrente assorbita dalla rete e dalla batteria, sono stati opportunamente dimensionati per l'attenuazione delle componenti armoniche indesiderate. La Figura 478 mostra in dettaglio lo schema circuitale del sistema.

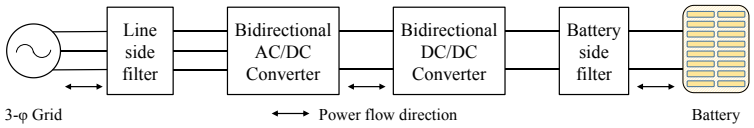


Figura 477. Componenti sistemi di ricarica

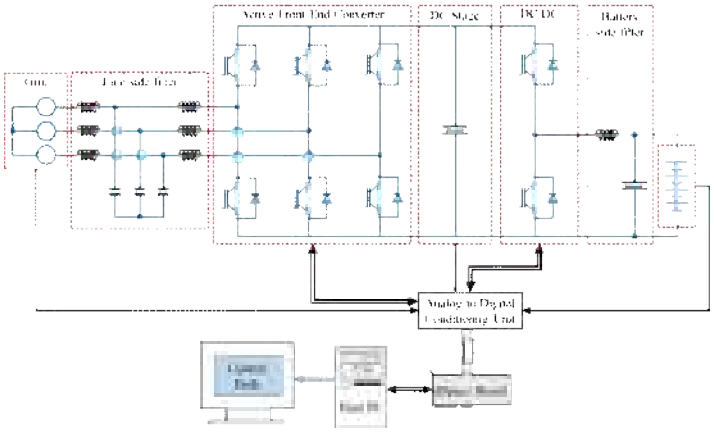


Figura 478. Schema circuitale del sistema di ricarica bidirezionale per accumulatori veicolari

In Figura 479.a è mostrato il convertitore elettronico di potenza prototipale utilizzato per le misure sperimentali. Il controllo della struttura di conversione è stato implementato per mezzo del sistema modulare di prototipazione rapida dSpace DS1005. In particolare, il controllo digitale è stato implementato per mezzo di routine *S-Function* scritte in linguaggio di programmazione C; le routine di controllo, una volta compilate, vengono eseguite in real-time dal sistema dSpace. In Figura 479.b è mostrata la scheda di interfaccia tra il sistema modulare dSpace ed il convertitore elettronico di potenza. Come evidenziato in figura, la scheda di interfaccia è equipaggiata con una CPLD (*Complex Programmable Logic Device*) la quale assolve alla gestione ed esecuzione dei comandi generati dal controllo (compresi i comandi degli *switch* di potenza degli stadi di conversione AC/DC e DC/DC), al condizionamento dei segnali analogici/digitali ed alla gestione delle protezioni dell'hardware, il comando per i teleruttori e del relè di soft-start. Le prove sperimentali sono state condotte utilizzando un emulatore programmabile di batterie, il quale permette sia di erogare che di assorbire energia con profili di tensione e corrente tipici degli accumulatori elettrochimici. In Figura 5480a è riportata, in funzione della potenza e della tensione di batteria, la mappa di efficienza determinata sperimentalmente per il convertitore prototipale in oggetto; tali risultati sono mostrati anche nella superficie di Figura 480b, la quale riporta l'efficienza del convertitore come funzione simultanea della potenza e della tensione di batteria. La procedura seguita per la determinazione sperimentale della mappa di efficienza è valida per qualsiasi struttura di caricabatteria.

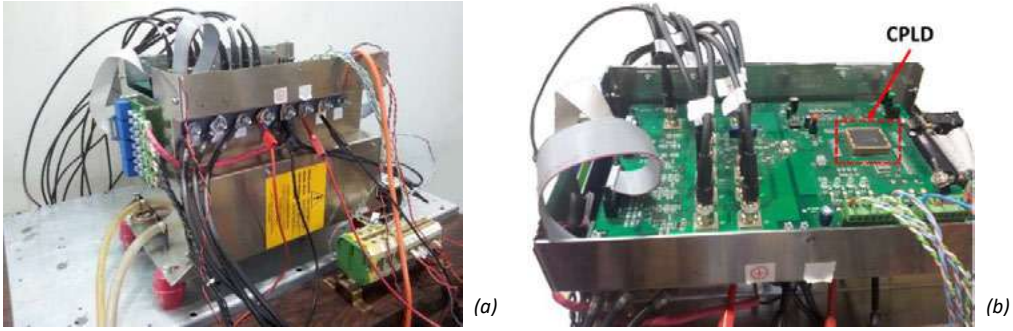


Figura 479. Convertitore elettronico di potenza prototipale utilizzato per le misure sperimentali (a) e scheda di interfaccia con il sistema modulare dSpace1005 (b).

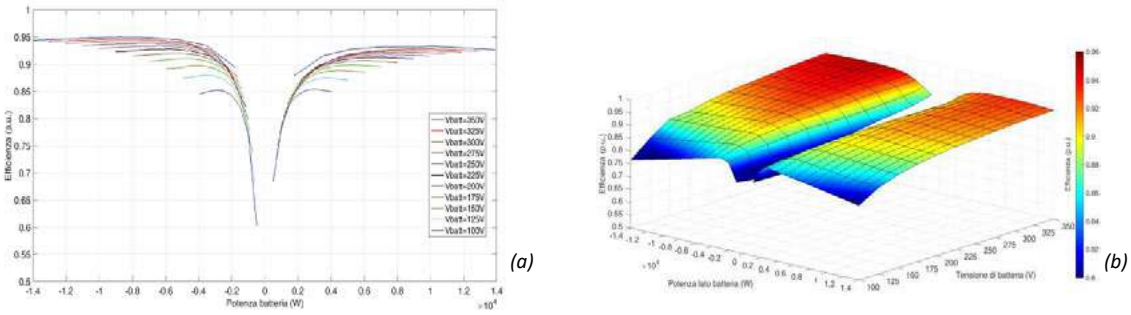


Figura 480. Mappa di efficienza determinata sperimentalmente per il convertitore prototipale: a) curve per diversi valori di tensione di batteria; b) superficie funzione simultanea di tensione e potenza lato batteria

In particolare, le misure sono state eseguite per diversi valori di tensione di batteria, a partire da 350 V fino a 100 V con passo di 25 V. Per ciascun valore di tensione impostata dall'emulatore, si sono eseguite le misure di tensione, corrente e potenza (sia lato rete sia lato batteria) per diversi valori di corrente di batteria variabili a step di 5 A tra +40 e -40 A. In entrambe le figure, il segno positivo della potenza significa potenza assorbita dalla batteria, mentre il segno negativo indica potenza erogata dalla batteria verso la rete; i valori intermedi tra due punti di misura sono stati estrapolati analiticamente. I risultati ottenuti dalle misure rispettano gli andamenti attesi, ovvero il convertitore elettronico di potenza è caratterizzato da valori di efficienza energetica maggiori all'aumentare della potenza e della tensione di batteria, sia in fase di carica che di scarica.

In Figura 481 è riportata, per diversi valori di corrente di scarica, la tensione in funzione della capacità per una cella al litio per trazione stradale.

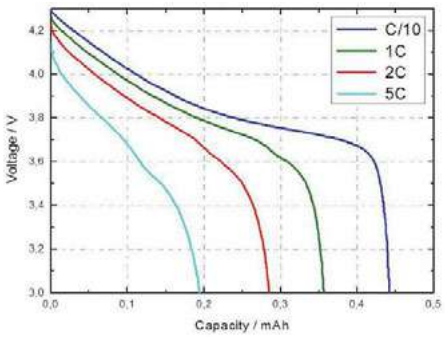


Figura 481. Curve di tensione in funzione della capacità per diversi valori di corrente di scarica per una cella al litio per trazione stradale

Le mappe di efficienza determinate sperimentalmente sono state implementate nelle *look-up tables* del modello energetico sviluppato nell'ambito della precedente collaborazione, permettendo così l'analisi delle simulazioni condotte su casi di studio con profili di carico di rete reali eseguite con il modello energetico basato su mappe di efficienza sperimentali.

Dettagli sulle attività svolte sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2014/108.

c. Comunicazione e diffusione dei risultati

Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

L'attività ha riguardato la partecipazione attiva ad alcune iniziative internazionali sui veicoli elettrici ed ibridi (Electric Vehicle Initiative e Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes dell'IEA) che sono una fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni mobili e stazionarie. La partecipazione è anche funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso. Inoltre l'ENEA è attiva nel board dell'Associazione europea veicoli elettrici stradali (AVERE). Pertanto le principali partecipazioni a gruppi di lavoro internazionali hanno riguardato:

La partecipazione alle attività dell'EVI (Electric Vehicle Initiative)

Su richiesta del Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE), è continuata la partecipazione italiana, avviata nel 2011, all'EVI (Electric Vehicle Initiative), coordinata dall'IEA, sviluppata nell'ambito del CEM (Clean Energy Ministerial). Il CEM è un forum globale ministeriale creato nel 2010 con lo scopo di condividere pratiche virtuose e promuovere politiche e programmi che favoriscano la transizione verso un'economia energetica pulita. Le iniziative CEM coinvolgono 23 governi con diversi ministeri; l'Italia partecipa con il Ministero dello Sviluppo Economico e con quello dell'Ambiente.

All'EVI partecipano attualmente 17 nazioni (Cina, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, India, Giappone, Italia, Olanda, Portogallo, Regno Unito, Spagna, Svezia, Stati Uniti, Sud Africa). La IEA svolge le funzioni di segreteria e coordina la raccolta, l'analisi e la diffusione dei dati EVI.

Nell'ultimo anno, le attività sono state numerose iniziative. A novembre 2014, si è svolto a Vancouver, in concomitanza con la riunione del Comitato esecutivo dell'IEA HEV, una riunione di EVI per proseguire una collaborazione relativa ai problemi associati alla diffusione dei veicoli elettrici. EVI e IA-HEV hanno lanciato la versione 2014 dell'EV City Casebook, rapporto in cui sono presentati, estratti da centinaia di casi, le iniziative sulla mobilità elettrica condotte in oltre 50 città in tutti i continenti.

A Vancouver è stata programmata la nuova attività di raccolta e diffusione di informazioni e dati sui veicoli elettrici, il Global EV Outlook 2015 un data sheet in cui sono presentate informazioni relative ai veicoli elettrici in 16 paesi. L'ENEA ha contribuito con dati relativi alle infrastrutture di ricarica ed al parco circolante, con alcune informazioni sugli incentivi in corso.

In ambito EVI è proseguito lo sviluppo del portale web *World EV Cities and Ecosystems* (www.worldevcities.org), che consente di mettere a disposizioni tutte le informazioni pubbliche su programmi, progetti, politiche, esperienze e casi di successi.

Nella riunione di maggio 2015, che si è tenuta in Corea del Sud, in contemporanea con il convegno mondiale sui veicoli elettrici EVS-28, si è svolta una riunione di EVI in cui sono state programmate le attività per il periodo 2015-2016. È in fase di valutazione da parte del Ministero dello Sviluppo Economico, l'opportunità e le modalità di un contributo economico, ancora volontario, ma già fornito da alcuni paesi partecipanti, sollecitato dall'IEA per poter garantire il prosieguo dell'azioni di segretariato e di coordinamento di EVI.

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". In questo periodo sono state concordate e realizzate alcune modifiche e iniziative importanti, che hanno riguardato:

- le modalità di funzionamento. Il contributo per il fondo comune e per le attività del Comitato Esecutivo è stato modificato con fasce di partecipazione che rendono automatica ed a costo zero la partecipazione ai Task che prevedono un costo di gestione del Coordinatore;
- la prosecuzione dell'IA. Il Comitato Esecutivo, su proposta del Chairman e della Segreteria e dello special Gruppo di lavoro "Strategia", ha approvato il documento strategico che ha portato all'estensione, per ulteriori 5 anni, dell'IA degli organi decisionali dell'IEA (EUWP-End Use Working Party e CERT - Committee for Energy Research and Technology);
- la sostituzione del Segretario del Comitato Esecutivo. Dopo un'ampia selezione tra diversi partecipanti, la scelta ha visto prevalere il candidato statunitense del Argonne National Laboratory.

Tra le principali attività svolte dall'ENEA, sono da citare:

- il contributo alla redazione del Rapporto Annuale 2015, contenente un ampio aggiornamento sullo stato dei programmi e della diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi nel mondo aggiornato al 31 dicembre 2014.
- nel quadro della Task 21, la revisione del programma sperimentale per la verifica dei protocolli di invecchiamento delle batterie al litio, coordinato dall'ENEA;
- la partecipazione alle riunioni collegiali del Comitato Esecutivo (EXCO) che si sono tenute in Canada (Vancouver), a novembre 2014, e in Corea del Sud (Gwangju) ad aprile-maggio 2015.

Nel quadro dell'implementi Agreement HEV, ENEA partecipa ai seguenti task:

- Task 1 Information Exchange: questo Task consente lo scambio di informazioni tra i membri dell'IA e ha lo scopo di raccogliere, analizzare e diffondere informazioni complete sui veicoli elettrici e sui programmi nazionali di incentivazione e diffusione.

- Task 10 Electrochemical systems: questo Task consente di scambiare in maniera coordinata informazioni ed analizzare aspetti critici dei sistemi di accumulo per veicoli elettrici.
- Task 21 Accelerated Ageing Testing for Li-ion Batteries: questo Task ha l'obiettivo di confrontare a livello internazionale le procedure di prove di vita accelerate per batterie al litio, al fine di mettere a punto, mediante *round robin test*, procedure comini. L'ENEA è il coordinatore (OA) di questo task che vede la partecipazione di Stati Uniti e Svizzera ed il potenziale interesse di altri 10 paesi partecipanti

La partecipazione alle attività dell'AVERE

La partecipazione ENEA all'AVERE ha riguardato il coinvolgimento nelle attività del Board (Assemblea dei delegati nazionali), a cui l'ENEA partecipa in qualità di membro della sezione italiana CEI-CIVES (Commissione Italiana Veicoli Elettrici Stradali del Comitato Elettrotecnico Italiano).

Partecipazione a gruppi di lavoro nazionali – CEI

Le Collaborazioni a livello istituzionale vedono l'ENEA partecipare alle attività del CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano che è responsabile in ambito nazionale della normazione tecnica in campo elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni, con la partecipazione diretta - su mandato dello Stato Italiano - nelle corrispondenti organizzazioni di normazione europea (CENELEC – *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*) e

Il *CT 69 - Macchine elettriche dei veicoli stradali elettrici* è il comitato che si occupa di preparare norme riguardanti i veicoli elettrici stradali a trazione totalmente o in parte elettrica e con accumulo dell'energia elettrica a bordo. Tra i vari argomenti il CT69 affronta le tematiche della ricarica conduttiva, normalizzazione prese-spine, ricarica induttiva, comunicazione veicolo-stazione di ricarica, accumulo e supercapacitori, sicurezza e protezione ambientale. ENEA partecipa al CEI CT69 - ricoprendo l'incarico di segretario del comitato.

Pubblicazioni, mostre e convegni

Le azioni di diffusione dei risultati sono state operate negli ambiti scientifici attraverso la pubblicazione di memorie su riviste internazionali e tramite la partecipazione a convegni di settore. Per ampliare la platea dei soggetti che possano fruire dei risultati delle ricerche portate avanti si sono considerate anche le presentazioni ad eventi indirizzati verso il largo pubblico.



Tra gli eventi che hanno visto la partecipazione dell'ENEA citiamo Ecomondo, fiera nazionale dedicata ai temi della Green Economy che si è tenuta a Rimini nel novembre 2014: Nel corso dell'evento sono state esposte le proposte ENEA per la mobilità sostenibile e sono stati illustrati sia gli aspetti della mobilità individuale che quelli del trasporto pubblico locale e il trasporto merci; sono stati inoltre presentati sistemi per l'infomobilità e per la gestione della distribuzione delle merci e componenti e sistemi per la mobilità elettrica.

Nell'edizione 2015 di Ecomondo era prevista una sessione specifica sul trasporto sostenibile "Gli obiettivi ambientali nella pianificazione della mobilità urbana ed il ruolo dei sistemi di trasporto collettivi", a cura di ASSTRA (Associazione Trasporti) e ANAV (Associazione Nazionale Autotrasporto Viaggiatori).. ENEA ha partecipato con la presentazione delle prospettive emerse dalle attività relative alla ricarica rapida al servizio del trasporto pubblico, svolte nel quadro della Ricerca del Sistema Elettrico

Il nono appuntamento del ciclo di convegni tematici sulla Ricerca di Sistema Elettrico, iniziativa ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA volta a diffondere e rafforzare la conoscenza dei risultati ottenuti dalla ricerca di sistema nel triennio 2012-2014, è stato dedicato ai "Prodotti per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità. Il convegno ha avuto luogo presso la sede ENEA di Roma il 15 luglio 2015.

Il programma del convegno ha visto sia una parte diretta alla divulgazione dei risultati delle attività svolte dai laboratori ENEA in collaborazione con le Università che una di confronto con il mondo della ricerca ed industriale per approfondire gli aspetti di interesse emersi dalle ricerche condotte. In particolare la tavola rotonda ha visto la partecipazione di rappresentanti di ATA, ANIE, RSE, CEI-CIVES, ANFIA ed ENEL.

Nell'ambito della settimana europea della mobilità il 21 settembre 2015 si è svolta una tavola rotonda avente per titolo "La mobilità elettrica urbana: tavola rotonda su scenari e progetti a Roma" presso la sala conferenze dell'ISPRA di Roma. Questa è stata un'occasione di diffusione dei risultati e degli strumenti messi a punto nel

quadro della Ricerca di Sistema Elettrico. La tavola rotonda della sessione "Il ruolo dei veicoli elettrici nella mobilità sostenibile: il mercato, la tecnologia e la ricerca", oltre ad ENEA, ha visto la partecipazione di ANFIA, UNRAE,NISSAN, MERCEDES e ACI.

Le attività di diffusione sono descritte nel rapporto RdS/PAR2014/109.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Cassino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione

Il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, per l'obiettivo a ha svolto una ricerca dal titolo "Validazione di un convertitore modulare per Infrastrutture di ricarica multi-sorgente per l'ottimizzazione dei flussi di potenza nelle micro-grid". Per lo sviluppo dell'elettromobilità viene richiesto un adeguamento della rete di infrastrutture di ricarica. Le difficoltà a integrare grandi stazioni possono essere superate creando delle micro-reti, auspicabilmente integrate in sistemi di generazione da fonti rinnovabili, in grado di disaccoppiare sia in potenza che in energia l'infrastruttura di ricarica dalla rete elettrica. Nella precedente annualità (PAR 2013) è stato sviluppato un sistema di conversione statico dell'energia multi-sorgente in grado di minimizzazione, attraverso l'utilizzo di un sistema di accumulo ibrido ed un generatore fotovoltaico, l'impatto delle ricariche sulla rete di alimentazione in termini di energia, potenza e di *power quality*. La soluzione tecnologica sviluppata alimenta una *micro-grid* in cui è possibile ricaricare a potenze superiori (ricariche rapide e veloci) di quelle disponibili al punto di allaccio. L'utilizzo della fonte rinnovabile riduce anche la richiesta di energia dalla rete, rendendo di fatto la mobilità elettrica realmente sostenibile secondo l'approccio "*well to wheel*". Tuttavia, la fonte fotovoltaica è aleatoria e risulta necessario il supporto di un adeguato sistema di accumulo per immagazzinare l'energia prodotta in eccesso dal campo fotovoltaico e utilizzarla nelle ore notturne o in caso di scarsa produzione. Inoltre, il sistema di accumulo integrato consente di immagazzinare l'energia dalla rete nello ore in cui il costo è minore, per poi utilizzarla nelle ore di picco. La progettazione del sistema ha richiesto lo sviluppo di un'opportuna piattaforma numerica, che fornisce, attraverso la risoluzione di una funzione di ottimo per possibili scenari di costo e utilizzo, come risultato il progetto di massima del convertitore ideale da utilizzare per quella specifica applicazione (in termini di singole unità di conversione, taglia, topologia, ecc..) e l'impostazione dei flussi di potenza del convertitore, utili ad ottenere il migliore piano di ammortamento dell'investimento iniziale dell'impianto. Diverse strutture per le unità di conversione e tecniche di controllo ad alte prestazioni sono state sviluppate ed integrate all'interno della piattaforma al fine di poter comparare le soluzioni classiche ad altre più innovative. Nel corso della presente annualità è stata modificata la struttura del sistema di conversione statica dell'energia elettrica in modo da poter implementare la modalità *vehicle to grid (V2G)* all'interno della soluzione proposta. Questa attività ha previsto lo sviluppo di opportuni convertitori di potenza e relative tecniche di controllo e di modulazione, che consentono un flusso bidirezionale di potenza lato infrastruttura di ricarica e lato rete di alimentazione. Questi nuovi componenti sono stati integrati nel *layer di dispositivo* e la nuova modalità *V2G* è stata considerata nel *layer di sistema* per la risoluzione del problema di ottimizzazione.

Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale

Il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova per l'obiettivo a ha svolto una ricerca dal titolo "Automazione di un caricabatteria contactless per city car". Il lavoro di ricerca ha avuto per oggetto l'automazione gestionale e funzionale di un caricabatteria contactless di tipo induttivo con topologia risonante ed è la naturale prosecuzione delle attività svolte nell'annualità precedente che avevano portato alla realizzazione di un prototipo per la ricarica del pacco accumulatori di una city car elettrica. Il lavoro di ricerca svolto nell'ambito del presente collaborazione ha riguardato le seguenti attività:

a) sviluppo di un sistema di comunicazione per la gestione di un caricabatteria contactless,
b) sviluppo di una tecnica per il riconoscimento delle condizioni di non risonanza e il conseguente aggiustamento della frequenza di alimentazione,
c) sviluppo di algoritmi dedicati.

Quanto espresso è stato provato utilizzando il prototipo realizzato nel corso del PAR2013 da 600 W verificando sia la funzionalità delle comunicazioni che il riconoscimento della condizione di non risonanza e la sua correzione. Inoltre si sono realizzati gli algoritmi necessari alla gestione di flussi di controllo per l'operatività del sistema in sicurezza.

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

Il Dipartimento Energia per l'obiettivo b ha svolto una ricerca dal titolo "Modellistica per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid: validazione sperimentale". La gestione intelligente della ricarica dei veicoli elettrici in prospettiva *vehicle-to-grid* (V2G) è basata sul flusso bidirezionale di energia tra veicolo e rete, annoverando così gli accumulatori elettrochimici a bordo veicolo come una fonte di stoccaggio distribuito dell'energia elettrica. Nell'ambito del PAR2013 è stata svolta un'attività inerente alla realizzazione di un modello energetico sviluppato in ambiente Matlab/Simulink® per la determinazione delle perdite e dei rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare interattivo con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. Il modello, sviluppato in ottica parametrica e modulare in modo da poter essere esteso a diverse taglie di convertitore e di accumulatore elettrochimico, è basato su mappe di efficienza energetica che possono essere desunte da dati di letteratura, modelli circuitali o prove sperimentali.

In un'ottica di prosecuzione del lavoro, le attività oggetto della presente collaborazione sono state rivolte alla validazione, per mezzo di prove di laboratorio, dello strumento di calcolo sviluppato nell'ambito della precedente annualità. In particolare, le misure sperimentali sono state finalizzate alla determinazione delle mappe di efficienza energetica del convertitore e di accumulatori al litio da trazione stradale. Le mappe di efficienza energetica determinate sperimentalmente permettono la validazione del modello energetico di sistema sulla base di simulazioni di casi di studio con profili di carico di rete reali.

Elenco documenti tecnici

Progetto A.4
Sistemi avanzati di accumulo di energia

- Arbizzani, L. Da Col, F. De Giorgio, M. Mastragostino, F. Soavi "Sintesi e caratterizzazione di catodi ad alto potenziale", Università di Bologna - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2014/166
- F. Maroni, R. Tossici, R. Marassi, F. Nobili, Realizzazione di materiali nano-compositi Sn/grafene e Si/grafene per sistemi Li-ione, Università di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie, RdS/PAR2013/167
- Arbizzani, L. Da Col, F. De Giorgio, M. Mastragostino, F. Soavi "Prestazioni elettrochimiche di celle litio-ione ad alta energia", Università di Bologna - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2014/168
- Rondino, V. Orsetti, F. Fabbri, A. Rufoloni, A. Santoni "Sintesi via CVD di anodi di Si nanostrutturato per batterie litio-ione ottenuti su substrati di acciaio funzionalizzati con Au, Ag e Cu," ENEA, RdS/PAR2014/169
- P.P. Prosini, C. Cento, M. Carewska, A. Masci "Caratterizzazione completa chimica ed elettrochimica di celle complete da laboratorio con nuovi materiali elettrodici", ENEA, RdS/PAR2014/170
- P.P. Prosini, C. Cento "Sintesi e caratterizzazione strutturale e morfologica di materiali anodici e catodici prima della realizzazione di celle complete", ENEA, RdS/PAR2014/171
- M. Pasquali, G. Tarquini, F. Scaramuzzo "Materiali anodici per batterie litio-ione di elevata energia", Università Sapienza di Roma - Dipartimento di Scienze di Base e Applicate all'Ingegneria, RdS/PAR2014/172
- P.P. Prosini, C. Cento "Progettazione delle celle/sistemi di scala significativa di due tipologie diverse e completa caratterizzazione elettrochimica ed elettrica", ENEA, RdS/PAR2014/173
- M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger "Dimensionamento di un sistema di accumulo per una tramvia con integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica", Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/PAR2014/174
- M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger "Prove sperimentali e ciclo semplificato di un sistema di accumulo per una tramvia", Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/PAR2014/175
- M. Pasquali "Ottimizzazione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulo per la metropolitana di Bergamo", ENEA, RdS/PAR2014/176
- D'Annibale, F. Vellucci, "Prosecuzione di analisi termografiche su celle litio-ione sottoposte ad esperienze di second life", ENEA, RdS/PAR2014/178
- M. Pasquali, F. Vellucci "Prosecuzione delle prove di "second life" su celle litio-ione: approfondimento ad una applicazione stazionaria", ENEA, RdS/PAR2014/179
- S. Cordiner, V. Mulone "Studio su prove di invecchiamento e degrado di celle al litio", Università di Roma Tor Vergata - Dipartimento di ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/180
- S. Cordiner, V. Mulone, Modelli preliminari di funzionamento e invecchiamento di celle al litio, Università di Roma Tor Vergata - Dipartimento di ingegneria Industriale RdS/PAR2014/181
- C. Di Bari, V. Sglavo "Procedura di estinzione incendi di celle Litio-ione su scala di laboratorio", ENEA, RdS/PAR2014/182
- C. Di Bari, F. Conigli, C. Manni, I. Morriello, F. Messale, "Prove di incendio ed esplosione di celle litio-ione, con documentazione filmata delle prove su campo e con analisi termografica", ENEA, RdS/PAR2014/183
- M. R. Mancini, S. Frangini "Recupero di componenti da batterie al litio-ione esauste: processo eco-sostenibile e innovativo", ENEA, RdS/PAR2014/184
- M. R. Mancini "Progettazione di massima per un impianto pilota per il riciclo di batterie al litio-ione eco-sostenibile e innovativo", ENEA, RdS/PAR2014/185
- D. De Angelis "Ottimizzazione e sperimentazione del processo per il recupero di materiali da batterie LFP esauste tramite tecnologie idrometallurgiche", ENEA, RdS/PAR2014/186
- La Marca, M. Ferrini, A. Scoppettuolo "Pre-trattamento delle batterie litio-ione in scala di laboratorio con particolare riferimento alle modalità di apertura delle celle", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, RdS/PAR2014/187
- D. De Angelis "Definizione di un processo in scala laboratorio e ipotesi preliminare di impianto dimostrativo", ENEA, RdS/PAR2014/188
- M. Conte "Attività di comunicazione e partecipazione a gruppi di lavoro internazionali relativi ai sistemi di accumulo", ENEA, RdS/PAR2014/189

Progetto B.1.1
Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

- G. Lembo, C. Patriarca, P. Barghini, S. Gorrasi, M. Fenice "Studio di un processo fermentativo anaerobico di materiali ad alto contenuto in chitina e acque di vegetazione", Università della Tuscia - Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche, RdS/PAR2014/143
- G. D'Alessandro, G. Dottorini, F. Liotta, L. Pontoni, M. Fabbricino "Ottimizzazione delle condizioni di processo per la

valorizzazione energetica di substrati di scarto lentamente biodegradabili attraverso decomposizione biologica per via anaerobica", Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, RdS/PAR2014/144

- G. Massini, G. Dottorini, C. Felici, A. Gaetani, G. Lembo, R. Liberatore, V. Mazzurco Miritana, S. Meharya, A. Signorini "Sviluppo di processi di digestione anaerobica di matrici non convenzionali", ENEA, RdS/PAR2014/145
- F. Barbato, L. Ninivaggi, E. Cogliani, F. Petrazzuolo "Sviluppo di sistemi per l'integrazione di microalghe in processi produttivi di biogas", ENEA, RdS/PAR2014/146
- A. Bianco, A. Venditti "Controlli chimico-analitici relativi allo sviluppo dell'integrazione di microalghe in processi produttivi di biogas", Sapienza Università di Roma- Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2014/147
- A. Molino, V. Larocca, P. Iovane, V. Lauro, V. Valerio, M. Martino "Processi termochimici per il trattamento di matrici organiche mediante gassificazione con acqua in condizioni supercritiche: valutazioni energetiche di processo ", ENEA , RdS/PAR2014/148
- A. Molino, P. Tarquini, V. Larocca, P. Iovane, F. Nanna, V. Valerio, M. Martino, V. Lauro, G. Santarcangelo "Test sperimentali di gassificazione in acqua supercritica di digestato di fanghi zootecnici e analisi preliminari per il trattamento di microalghe", ENEA, RdS/PAR2014/149
- M. Migliori, A. Aloise, E. Catizzone, G. Giordano "Analisi sperimentale dei catalizzatori a base di nichel supportato su zeolite per la gassificazione delle biomasse con acqua in condizioni supercritiche", Università della Calabria - Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica, RdS/PAR2014/150
- E. De Luca, N. Corsaro, C. Felici, F. Fiocchetti, L. Lona, S. Rosa "Sviluppo di un processo per l'abbattimento dell'H_2S nel biogas mediante fotobioreattore a LED", ENEA, RdS/PAR2014/151
- V. Palma, D. Barba "Attività e stabilità di catalizzatori a base di V_2O_5/CeO_2 per l'ossidazione parziale selettiva dell'H_2S in una corrente ricca in CO_2",-Università di Salerno - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/152
- P. Gislon, M. Carewska, S. Galli, M. Granati, G. Monteleone, A. Masci "Test di un prototipo per la purificazione e upgrading del biogas prodotto da un impianto di digestione anaerobica", ENEA, RdS/PAR2014/153
- P. Di Profio, S. Arca, E. D'Alessandro "Upgrading del biogas mediante formazione di gas idrati: ottimizzazione e parametrizzazione del processo", Università di Chieti e Pescara - Dipartimento di Farmacia, RdS/PAR2014/154
- M.C. Annesini, R. Augelletti, F. Gironi, M.A. Murmura "Processo semi-batch per l'upgrading del biogas mediante assorbimento della CO_2 con soluzioni di AMP in solvente organico: simulazione dinamica di un prototipo e analisi tecnico-economica di impianto full-scale", Sapienza Università di Roma - Dipartimento di ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, RdS/PAR2014/155
- F. Basile, G. Fornasari, E. Lombardi, R. Mafessanti, A. Vaccari "Metanazione con catalizzatori a base di Ni: sintesi e ottimizzazione del contenuto di Ni, effetto della pressione e del rapporto H_2/CO e caratterizzazione dei campioni utilizzati", Università di Bologna - Dipartimento di Chimica Industriale, RdS/PAR2014/156
- "A. Villone, R. Agostini, F. Nanna, M. Carnevale, G. Pinto, D. Barisano "Impiego di sorbenti per la cattura di CO_2 in processi di gassificazione di biomasse", ENEA, RdS/PAR2014/157
- F. Nanna, A. Villone, R. Agostini, G. Canneto, M. Carnevale, G. Pinto, D. Barisano "Produzione di SNG da biomassa: studio di catalizzatori di metanazione nella conversione del gas di gassificazione", ENEA, RdS/PAR2014/158
- U. Pasqual Laverdura, K. Gallucci, A. Romano, I. Aloisi, P. U. Foscolo "Sviluppo e sperimentazione di sorbenti-catalizzatori per processi SEWGS da correnti gassose multicomponente", Università dell'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/PAR2014/159
- S. Sau, N. Corsaro, A.C. Tizzoni, M. Agostini, A. Masci "Nitrati fusi come fluido termovettore intermedio per cicli ORC alimentati da biomasse. Compatibilità di materiali con sali ternari contenenti litio e calcio", ENEA, RdS/PAR2014/160
- M. Caldera, G. Guarnieri, G. Bracco, R. Roberto "Implementazione su piattaforma web dello strumento di calcolo per l'analisi di sistemi energetici alimentati a biomassa legnosa", ENEA, RdS/PAR2014/161
- V. Palma, E. Meloni "Sistemi di filtrazione ceramici catalizzati per la rimozione del particolato dalle emissioni gassose di impianti di combustione a biomassa", Università di Salerno - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/162
- M. Caldera, D. Lipari, A. De Sio, R. Roberto "Analisi sperimentale della rigenerazione di filtri catalitici wall-flow per la rimozione del particolato fine prodotto dalla combustione di biomassa legnosa", ENEA, RdS/PAR2014/163
- G. Calì, F. Tedde, S. Meloni, P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano "Modifiche ed adeguamento dell'impianto dimostrativo di gassificazione di biomasse per la produzione elettrica", SOTACARBO / ENEA, RdS /PAR2014/164
- G. Calì, F. Tedde, S. Meloni, P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano "Sperimentazione dell'impianto dimostrativo di gassificazione da biomasse per la produzione elettrica", SOTACARBO / ENEA, RdS/PAR2014/165

Progetto B.1.3
Energia elettrica da fonte solare

Linea Progettuale 1. Ricerche su celle fotovoltaiche innovative

- M. Della Noce, E. Bobeico, L. Lancellotti, L.V. Mercaldo, I. Usatii, L. Verdoliva, P. Delli Veneri, M. Izzi M. Tucci "Realizzazione di celle solari a eterogiunzione su wafer in silicio di tipo p",ENEA, RdS/PAR2014/001
- L. Serenelli, M. Tucci, M. Izzi, R. Chierchia, E. Salza, D. Caputo, G. de Cesare "Sviluppo di strati sottili di ossido trasparente e conduttivo per applicazione alle celle ad eterogiunzione silicio amorfo /silicio cristallino", Università Sapienza di Roma -

Dipartimento di Ingegneria Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni / ENEA, RdS/PAR2014/002

- M. Valentini, C. Malerba, C. Azanza, E. Salza, M. L. Grilli, F. Menchini, P. Scardi, A. Mittiga "Realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di Cu_2ZnSnS_4" ENEA/ Università di Trento - DICAM / Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Fisica, RdS/PAR2014/003
- M. Valentini, D. Tedeschi, A. Polimeni, C. Malerba. A. Mittiga, M. Capizzi "Caratterizzazione ottica di film sottili per dispositivi fotovoltaici basati su CZTS", - Università Sapienza di Roma- Dipartimento di Fisica / ENEA / Università di Trento, DICAM, RdS/PAR2014/004
- E. Cappelletto, F. Girardi, R. D'Angelo, C. Azanza, C. Malerba, R. Di Maggio, F. Villani, F. Loffredo, A. Mittiga, P. Scardi "Crescita e caratterizzazione di film di CZTS a partire da soluzioni di sali o sospensioni di nanoparticelle", Università di Trento - DICAM / ENEA, RdS/PAR2014/005
- S. Binetti, M. Acciarri, A. Mittiga "Sviluppo di strati buffer per celle a base di CZTS", Università di Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali / ENEA, RdS/PAR2014/006
- V. La Ferrara, A. De Maria , L.V. Mercaldo , P. Morvillo , R. Diana E. Bobeico , P. Delli Veneri "Sviluppo di celle solari innovative a base di perovskite", ENEA, RdS/PAR2014/007
- C. De Rosa, F. Auriemma, A. Malafronte, R. Di Girolamo, C. Sasso, C. Diletto, P. Morvillo "Sviluppo di copolimeri a blocchi per la realizzazione di matrici di ossidi metallici di tipo n", [1] Università di Napoli "Federico II" - Dipartimento di Scienze Chimiche / ENEA, RdS/PAR2014/008
- M.L. Addonizio, L. Fusco, A. Spadoni, A. Antonaia "Sviluppo di substrati con elevate proprietà di scattering della radiazione solare mediante etching da plasma reattivo", ENEA, RdS/PAR2014/009
- A. Aronne, M. L. Addonizio, L. Minieri , P. Pernice "Sviluppo di metodologie chimiche per la modulazione della morfologia superficiale di substrati vetrosi", Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale / ENEA, RdS/PAR2014/010
- A. Micco, A. Gnisci, A. Ricciardi, M. Pisco, A. Cusano, L.V. Mercaldo, I. Usatii, G. Pandolfi[2] P. Delli Veneri "Cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare", Università del Sannio -Dipartimento di Ingegneria / ENEA, RdS/PAR2014/011
- P. Delli Veneri, G. Ciniglio, A. Scognamiglio "Attività di diffusione dei risultati e collaborazioni internazionali", ENEA RdS/PAR2014/012

Linea Progettuale 2. Solare termodinamico

- S. Esposito, A. Antonaia, A. Guglielmo, G. Vitiello "Ottimizzazione di strati sottili metallici adatti alla realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale", ENEA, RdS/PAR2014/110
- S. Esposito, A. Antonaia, A. Guglielmo, G. Vitiello "Ottimizzazione, realizzazione e caratterizzazione di filtri solari del tipo interferenziale", ENEA, RdS/PAR2014/111
- A. De Luca, T. Crescenzi "Definizione delle principali caratteristiche di un impianto solare alimentato con aria compressa e accumulo termico con materiale ceramico", ENEA, RdS/PAR2014/112
- A. De Luca "Realizzazione di una sezione di prova in scala ridotta per test di accumulo termico con materiale ceramico", ENEA, RdS/PAR2014/113
- R. Grena, A. Miliozzi, E. Veca "Analisi della durabilità di miscele nitrati fusi-nanoparticelle e simulazione del comportamento di nitrati fusi e loro interazione con le nanoparticelle", ENEA, RdS/PAR2014/114
- A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini, D. Mele, G. Napoli "Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi elementari di accumulo a calore latente", ENEA, RdS/PAR2014/116
- V. Russo, A. Miliozzi, T. Crescenzi "Studio di fattibilità di un sistema LHTES di piccola taglia e della sua integrazione in un impianto solare termodinamico", ENEA, RdS/PAR2015/117
- R. Liberatore, G.M. Giannuzzi "Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi di accumulo a calore sensibile in materiali cementizi", ENEA, RdS/PAR2014/118
- L. Rinaldi, W. Gaggioli "Stato di avanzamento della realizzazione di un circuito sperimentale per la produzione di vapore surriscaldato con un generatore di vapore di nuova concezione a sali fusi, per l'alimentazione di una turbina a vapore da 1,5 kW elettrici", ENEA, RdS/PAR2014/122
- M. Falchetta "Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali", ENEA, RdS/PAR2014/123
- A. Antonaia, G.M. Giannuzzi, D. Mazzei, A. Miliozzi, R. Di Maggio "Il solare termodinamico nella ricerca di sistema elettrico", ENEA, RdS/PAR2014/124
- J. M. Kenny, M. Chieruzzi "Studio di nuovi materiali avanzati di accumulo termico a cambiamento di fase con proprietà termiche incrementate", Università di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, RdS/2014/115
- F. Girardi, R. Di Maggio "Realizzazione e caratterizzazione di un modulo di accumulo basata su mescola sviluppata da UNITN", Università di Trento - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, RdS/2014/119
- G. Mazzucco, G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana "Progettazione termomeccanica, realizzazione e caratterizzazione di un modulo di accumulo in materiale cementizio. Simulazioni ed analisi dei dati sperimentali", Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, RdS/2014/120

Progetto B.1.5
Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

- M. Fontana, G. Moretti, F. Damiani “Dry-run test di un sistema PTO per ReWEC basato su elastomeri Elettroattivi”, Scuola Superiore S. Anna di Pisa- stituto di Tecnologie per la Comunicazione, Informazione e Percezione, RdS/PAR2014/221
- R. Vertechy “Studio di un sistema PTO per OWC del tipo REWEC-GV basato su elastomeri elettroattivi" Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/222
- M. Pollino, L. La Porta, E. Caiaffa “Il Geoportale “Waves Energy” per la condivisione delle informazioni geospaziali “, ENEA, RdS/PAR2014/223
- F. Borfecchia, C: Micheli, L. De Cecco “Stima degli impatti sugli ecosistemi costieri da impianti ‘’Wave Energy Converter ” tramite tecniche di Remote Sensing”, ENEA, RdS/PAR2014/224
- A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino “Validazione del sistema operativo per la previsione del moto ondoso nel Mediterraneo”, ENEA, RdS/PAR2014/238
- A.Carillo, G. Sannino “Analisi statistica degli spettri bidimensionali delle onde”, ENEA, RdS/PAR2014/239
- D. Nicolini, V. Russo, L. Sipione, E. Giovannini, F. Arena, F. Strati “Modellazione e simulazione CFD di un cassone di tipo REWEC3-GV”, ENEA / Università Mediterranea di Reggio Calabria, RdS/PAR2014/237
- F. Arena, V. Fiamma, G. Malara, A. Romolo. F. Strati, V. Laface, C. Ruzzo G. Barbaro, V. Russo, G. Sannino “Esecuzione di prove sperimentali su prototipo in scala 1:8 del dispositivo a colonna d’acqua oscillante REWEC3-GV”, Università Mediterranea di Reggio Calabria / ENEA, RdS/PAR2014/225
- G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella. G. Sannino “Progettazione e costruzione del sistema di conversione PEWEC in scala intermedia”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale /ENEA, RdS/PAR2014/227
- G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella “Metodologia progettuale del sistema di conversione passivo PEWEC”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale /ENEA, RdS/PAR2014/226
- G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino “Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale /ENEA, RdS/PAR2014/228

Progetto B.2
Cattura e sequestro della CO_2 prodotta da combustibili fossili

- S. Stendardo “Aumento delle prestazioni della dolomite naturale in termine di assorbimento di CO_2 e stabilità chimica mediante calcinazione ‘ triggered “, ENEA, RdS/PAR2014/121
- S. Stendardo, M. Nobili, S. Cassani, L. Pagliari, G. Messina, A. Di Nardo, G. Calchetti, A. Assettati, G. Guidarelli, S. Attanasi, S. Scaccia, G. Vanga, R. Viscardi, D. Franchi P.U. Foscolo “Test sperimentale e simulazione numerica del processo SE-WGS nell’Infrastruttura di Ricerca ZECOMIX”, Università de L’Aquila - Dipartimento di ingegneria Industriale e dell’Informazione e di Economia / ENEA, RdS/PAR2014/248
- T. Antonini, P.U. Foscolo, K. Gallucci “Realizzazione di un impianto da banco per misure di permeazione dell’ossigeno dall’aria attraverso membrane perovskitiche a trasporto ionico, ad alte temperature (850-1000°C)”, - Università de L’Aquila - Dipartimento di ingegneria Industriale e dell’Informazione e di Economia, RdS/PAR2014/249
- T. Antonini, P.U. Foscolo, K. Gallucci “Integrazione del modello di permeazione dell’ossigeno attraverso ITM con un modello per la gassificazione di combustibili solidi”, Università de L’Aquila - Dipartimento di ingegneria Industriale e dell’Informazione e di Economia, RdS/PAR2014/250
- R. Baciocchi, G. Costa, P. Librandi, M. Morone “Applicazione in scala pilota del processo di carbonatazione di residui industriali alcalini per lo stoccaggio minerale di CO_2”, Università di Roma Tor Vergata – Dipartimento di Ingegneria Civile, RdS/PAR2014/266
- E. Giacomazzi, D. Cecere, G. Calchetti, A. Di Nardo, F.R. Picchia “Simulazione di instabilità termo-acustiche”, ENEA, RdS/PAR2014/240
- G. Troiani, R. Camussi, T. Pagliaroli “Analisi statistica avanzata per la determinazione dell’instabilità termo-acustica in combustori per turbogas sottoposti a variabilità del punto di lavoro”, ENEA / Università di Roma TRE - Dipartimento di Ingegneria, RdS/PAR2014/241
- G. Calchetti, A. Di Nardo, S. Chiocchini “Simulazione di un bruciatore per turbine a gas orientato alla load and fuel flexibility", ENEA / Università Roma TRE - Dipartimento di Ingegneria, RdS/PAR2014/242
- G. Troiani, M. Marrocco, R. Camussi, T. Pagliaroli “Sviluppo di un bruciatore in scala di laboratorio per la combustione di miscele gassose in ambiente ricco di CO_2”, ENEA / Università di Roma TRE - Dipartimento di Ingegneria, RdS/PAR2014/243
- G. Messina, A. Di Nardo, G. Calchetti “Esercizio dell’Impianto AGATUR in assetto EGR – STEP 1: simulazioni numeriche”, ENEA, RdS/PAR2014/244
- G. Messina, A. Assettati, E. Giulietti, A. Grasso, G. Guidarelli, C. Stringola “Esercizio dell’Impianto AGATUR in assetto EGR-STEP 1: test di stabilità”, ENEA, RdS/PAR2014/267
- E. Giacomazzi, F.R. Picchia, D. Cecere, G. Messina, N. Arcidiacono, G. Rossi, B. Favini “Implementazione e test di modelli numerici e fisici per l'ossi-combustione in atmosfera di CO_2 supercritica”, ENEA / Sapienza Università di Roma -

Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale, RdS/PAR2014/245

- V. Barbarossa, R. Viscardi "Utilizzo della CO_2 per produzione di combustibili", ENEA, RdS/PAR2014/251
- G. Calì, P. Miraglia, F. Tedde, D. Marotto, P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi "Attività sperimentali relative a tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre-combustione", Sotacarbo / ENEA, RdS/PAR2014/252
- G. Cau, D. Cocco, V. Tola "Modellazione di tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre- combustione", Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, RdS/PAR2014/253
- C. Madeddu, R. Mei, M. Errico, R. Baratti "Sviluppo di un modello dettagliato dell'impianto di cattura postcombustione della co_2 utilizzando CUSTOM MODELER dell'ASPEN", Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, RdS/PAR2014/254
- C. Frau, E. Loria; F. Poggi, F. Manenti, A. Bassani, E. Ranzi "Sviluppo di un sistema innovativo per il trattamento dei gas di coda provenienti dalla desolforazione del syngas da carbone", Sotacarbo / Politecnico di Milano - Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica, RdS/PAR2014/255
- C. Frau, E. Loria, F. Poggi, M. C. Tilocca "Ottimizzazione delle tecniche di preparazione e caratterizzazione di miscele coal-slurry da alimentare al reattore di ossicombustione", Sotacarbo / Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria civile, ambientale e architettura, RdS/PAR2014/256
- C. Frau, E. Loria, F. Poggi "Realizzazione della sezione di recupero di H_2SO_4 e prove funzionali Sotacarbo, RdS/PAR2014/257
- A. Plaisant, D. Multinedu, A.Testa, L. Ciccarelli, S. Valentini "Autorizzazioni di indagine e permesso di ricerca per la caratterizzazione del bacino carbonifero del Sulcis", Sotacarbo /Golder Associates, RdS/PAR2014/258
- A. Plaisant, A. Testa, S. Bigi, C. Tartarello, L. Ruggiero, D. De Angelis, A. Conti, V. Romano, S. Lombardi "Caratterizzazione geostrutturale dell'area del bacino carbonifero del Sulcis", Sotacarbo / Sapienza Università di Roma- Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici, RdS/PAR2014/259
- S. Bigi, C. Tartarello, L. Ruggiero, D. De Angelis, P. Sacco, S. Lombardi, A. Plaisant, D. Multineddu, A. Testa "Monitoraggio e caratterizzazione geochimica dell'area del bacino carbonifero del Sulcis", Sotacarbo / Sapienza Università di Roma - Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici, RdS/PAR2014/260
- A. Plaisant, A. Testa, M. Anselmi, M. Pastori, D. Piccinini, P. De Gori, M. Buttinelli, G. Colasanti, C. Chiarabba "Studio della sismicità naturale dell'area del bacino del Sulcis", Sotacarbo / INGV, RdS/PAR2014/261
- G. Serra "Comunicazione e diffusione dei risultati", Sotacarbo, RdS/PAR2014/262
- E. Maggio "Attività legate a IEA CCC"– Sotacarbo, RdS/PAR2014/263
- G. Calì, P. Miraglia, F. Tedde, D. Marotto, P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, G. Girardi "Attività sperimentali relative a tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre-combustione", Sotacarbo / ENEA, RdS/PAR2014/252
- M.G. Cutrufello, I. Ferino, R. Monaci, T. Pivetta, E. Rombi, P. Deiana C. Bassano "Caratterizzazione composizionale del syngas proveniente dalla gassificazione di carbone e biomasse", Università di Cagliari – Dipartimento di Scienze Chimiche / ENEA, RdS/PAR2014/268
- P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi "Studi e sperimentazioni relative alla produzione di SNG da CO e CO_2", ENEA, RdS/PAR2014/246
- M. G. De Angelis,M. Giacinti Baschetti, M. Minelli, L. Olivieri P. Deiana C. Bassano "Sintesi, caratterizzazione e prova di membrane per la separazione della CO_2 e la purificazione del Synthetic Natural Gas", Alma Mater Studiorum Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali /ENEA, RdS/PAR2014/269
- M. Martinelli, C.G. Visconti, L. Lietti, P. Forzatti, P. Deiana, C. Bassano "Sintesi, caratterizzazione e prova di catalizzatori di tipo strutturato in forma di monolita per la produzione di Synthetic Natural Gas da carbone", Politecnico di Milano – Dipartimento Energia / ENEA, RdS/PAR2014/270
- S. Scaglione, D. Zola "Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell'ossigeno nei prodotti di combustione in regime MILD",ENEA, RdS/PAR2014/247
- S. Giammartini "Azioni ENEA per la comunicazione e diffusione dei risultati", ENEA, RdS/PAR2014/271.

Progetto B.3.1

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione

Linea Progettuale 1. Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

- M. Pescarini, R. Orsi, R. Frisoni "VITJEFF32.BOLIB - An ENEA-Bologna Fine-Group Coupled (199 n + 42 γ) Cross Section Library in AMPX Format Based on JEFF-3.2 Data", ENEA, RdS/PAR2014/125
- M. Frisoni "Validation of the updated decay data libraries of the ANITA-2000 activation code package on experimental data produced by FNS-JAERI", ENEA, RdS/PAR2014/126
- K.W. Burn, P. Console Camprini "Monte Carlo Methods for Core Safety Analysis: Design of Instrumentation for monitoring PWR Core Degradation in case of a Severe Accident", ENEA, RdS/PAR2014/127
- R. Pergreffi, F. Rocchi "Valutazioni, con codici deterministici, dei fenomeni di tilt azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di sicurezza del nocciolo", ENEA ,RdS/PAR2014/128
- F. Padoani, G. Glinatsis "Resistenza alla Proliferazione, Nuclear Security e Sostenibilità del Ciclo del Combustibile", ENEA,

RdS/PAR2014/129

- M. Ferrando, R. Levizzari, A. Luce, A. Rizzo “Contributo alla piattaforma IGD-TP e altre iniziative internazionali sulla gestione dei rifiuti radioattivi”, ENEA, RdS/PAR2014/130
- F. Rocchi, A. Guglielmelli, M. Sumini “Calcoli di inventari di nocciolo per le centrali frontaliere a combustibile misto UOX-MOX e valutazione del termine sorgente in condizioni incidentali severe per alcune sequenze di particolare interesse”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/131
- G. Bandini, S. Ederli, M. Di Giuli, M. Sumini, A. Manfredini, W. Ambrosini “Assessment of PWR cores behavior and estimate of confidence level got with the use of mechanistic and/or integral codes calculations of accident sequences with reference to TMI-2 reactor”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/132
- F. Mascari, F. Giannetti, P. Balestra, A. Zoino, G. Caruso “Integral study of accident sequences with reference to NPPs next to the Italian border”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/133
- F. Rocchi, L. Moretti “Realizzazione di un database esperto a supporto della gestione di una situazione di crisi - fase 3”, ENEA, RdS/PAR2014/134
- F. De Rosa “RADCAL-III mod.N: Calculation of radioactive concentrations in air and at ground level of urban areas located at mesoscale distance (subclass α) from a nuclear plant hit by severe accident - phase 1”, ENEA, RdS/PAR2014/135
- C. Lombardo, G. Ambrosio, P. Buffa, G. Caltabellotta, M. Gardina, G. Palermo, I. Raniolo, F. Ventura “Definizione della metodologia e degli input necessari per l’esecuzione di analisi integrate Calmet-Calpuff ai fini della valutazione della dispersione di inquinanti radioattivi in atmosfera”, ENEA /CIRTEN, RdS/PAR2014/136
- L. Burgazzi, R. Lo Frano “Application of risk-informed probabilistic and deterministic safety approach to estimate the risk of external events”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/137
- C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, D'Amico, I. Moscato, G. Velia “Approfondimento delle problematiche di simulazione con i codici CATHARE2 e TRACE dei transitori SPES2”, RdS/PAR2014/138
- G. Monni, M. Caramello, M. De Salve, B. Panella “Messa a punto di una metodologia deterministica/statistica per l’analisi dei segnali dello spool piece Venturi/sonda ad impedenza”, CIRTEN, RdS/PAR2014/139
- M. Caramello, M. De Salve, B. Panella, S. Cozzi, M. Ricotti, M. Santinello “Analisi e confronto di soluzioni tecnologiche diverse per la rimozione del calore negli SMR”, CIRTEN, RdS/PAR2014/140
- A. Achilli, P. De Pace, D. Balestri, M. Polidori “Progettazione, realizzazione ed interpretazione di prove termoidrauliche di base su generatori di vapore con tubi a baionetta”, SIET / ENEA, RdS/PAR2014/141
- F. de Rosa “Raccolta e diffusione dei risultati conseguiti nel triennio del PT 2012-2014 nella linea progettuale relativa allo sviluppo di competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare”, ENEA, RdS/PAR2014/142

Linea Progettuale 2. Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

- M. Carta, P. Console Camprini, V. Fabrizio, O. Florani, A. Grossi, V. Peluso, A. Santagata, A. Boccia, A. Gardini, C. Bethaz, P. Ravetto “TAPIRO: feasibility study of minor actinides irradiation campaing”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/190
- A. Gandini, M. Frullini, V. Peluso “Implementazione del codice ERANOS per l'analisi perturbativa e di sensitività nel campo non lineare neutroni/nuclidi”, CIRTEN /ENEA, RdS/PAR2014/191
- F. Lodi, G. Grasso, A. Cammi, S. Lorenzi, C. Petrovich, D. Mattioli, M. Sumini “Characterization of the new ALFRED core configuration”, CIRTEN /ENEA, RdS/PAR2014/192
- G. Grasso, F. Lodi, C. Petrovîch “On the viability of In-Vessel Storage in the new ALFRED configuration”, ENEA, RdS/PAR2014/193
- A. Aly, D. Rozzia, A. Del Nevo L. Luzzi, D. Pizzocri “Supporto alla progettazione del combustibile nucleare per il reattore LFR”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/194
- A. Del Nevo, I. Di Piazza, C. Parisi, E. Martelli, P. Balestra, G. Caruso, A. Naviglio “Sviluppo e validazione di un approccio e di modelli per analisi di sicurezza di reattori veloci di IV generazione”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/195
- L. Lepore, R. Remetti, M. Cappelli “Studio teorico-sperimentale di un SPND commerciale per applicazione a reattori raffreddati al piombo”, CIRTEN /ENEA, RdS/PAR2014/196
- R. Lo Frano, A. Sanfiorenzo, G. Forasassi, G. Pugliese “Valutazione degli effetti dinamico-strutturali indotti dal fenomeno del core compaction”, CIRTEN, RdS/PAR2014/197
- M. Capone, G. De Angelis, C. Fedeli, M. Macerata, M. Cerini, M. Negrin, E. Mossini, M. Mariani, M. Gioia “Studio delle interazioni tra combustibile, prodotti di fissione, e refrigerante in sistemi LFR”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/198
- A. Bellucci, M. Fortunato “Sviluppo di ricoperture a base FeCrAl per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo”, Centro Sviluppo Materiali, RdS/PAR2014/199
- M.G. Beghi, F. Di Fonzo, F. Garcia Ferré “Sviluppo di ricoperture per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo mediante tecniche di ablazione laser”, CIRTEN / Istituto Italiano di Tecnologia, RdS/PAR2014/200
- F. Nanni, F.R. Lamastra, M. Bragaglia, G. Forasassi “Report sulla caratterizzazione di materiali strutturali ricoperti per applicazioni nucleari”, RdS/PAR2014/201
- M.G. Beghi, F. Garcia Ferré, F. Di Fonzo, F. Nanni, F.R. Lamastra, M. Bragaglia, G. Forasassi, M.E. Angiolini “Report sulla caratterizzazione di rivestimenti mediante prove di irraggiamento con ioni pesanti”, CIRTEN / ENEA, RdS/PAR2014/202

- A. Coglitore, A. Strafella “Prove di creep-rupture su materiali strutturali ricoperti per applicazioni in sistemi refrigerati a metallo liquido pesante”, ENEA, RdS/PAR2014/203
- C. Cristalli “Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e di corrosione in piombo dell’acciaio doppio stabilizzato DS4”, ENEA RdS/PAR2014/204
- S. Bassini, A. Antonelli, F. Garcia Ferré “Prove di corrosione su materiali strutturali ricoperti in piombo stagnate in funzione del tenore di ossigeno”, ENEA / Istituto Italiano di tecnologia, RdS/PAR2014/205
- S. Bassini, L. Rapezzi, A. Antonelli “Report sulle prove di corrosione in piombo fluente mediante impianto LECOR”, ENEA, RdS/PAR2014/206
- D. Rozzia, A. Del Nevo, M. Tarantino V. Narcisi, D.V. Di Maio, F. Giannetti, G. Caruso “ALFRED-SGBT. Preliminary experimental characterization by the HERO test section”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/207
- M. Cappelli, F. Cordella, L. Lepore “Completamento, validazione e messa in esercizio dell’impianto VAPORETTO (SWINGER)”; ENEA, RdS/PAR2014/208
- “A. Del Nevo, M. Eboli “Design dell’esperimento e specifica tecnica di fornitura relativa all’up-grade dell’impianto LIFUS5/Mod2”, ENEA, RdS/PAR2014/209.
- A. Pesetti, M. Tarantino “Pre-test Analysis of SGTR event on large scale experimental facility by SIMMER-IV code”, ENEA, RdS/PAR2014/210
- F. Moretti, L. Mengali, F. Terzuoli, F. D'Auria “Verifica e validazione preliminare sull’accoppiamento del codice di calcolo RELAP5-3D e il codice di fluidodinamica computazionale ANSYS CFX”, CIRTEN, RdS/PAR2014/211
- F. Andreoli, G. Damiani, D. Martelli, N. Forgione, W. Ambrosini “Verifica e validazione preliminare sull’accoppiamento del codice di calcolo RELAP5/Mod.3.3 e il codice di fluidodinamica computazionale ANSYS FLUENT”, CIRTEN, RdS/PAR2014/212
- A. Cervone, A. Attavino, D. Cerroni, L. Fancellu, S. Manservisi “FEMLCORE - CATHARE Coupling on SALOME Platform”, ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2014/213
- M. Polidori “Revisione della validazione del codice T/H CATHARE2 attraverso il benchmark LACANES”, ENEA, RdS/PAR2014/214
- R. Bonifetto, D. Caron, S. Sulla, V. Mascolino P. Ravetto, L. Savoldi, D. Valerio. R. Zanino “Advances in the development of the code FRENETIC for the coupled dynamics of lead-cooled reactors”, CIRTEN, RdS/PAR2014/215
- I. Di Piazza “Specifica tecnica di fornitura e installazione del circuito di reintegro piombo dell’impianto a metallo liquido pesante HELENA”, ENEA, RdS/PAR2014/216
- M. Angelucci, R. Marinari “Experimental tests on the HLM facility NACIE-UP”, ENEA, RdS/PAR2014/217
- R. Marinari, I. Di Piazza “Pre-test CFD analysis of the rod bundle experiment in the HLM facility NACIE-UP”, ENEA, RdS/PAR2014/218
- I. Di Piazza “Main process of the solidification facility SOLIDX”, ENEA, RdS/PAR2014/219
- D. Martelli, M. Tarantino “Raccolta delle Lecture del Workshop Tematico “LFR-Gen IV: Stato attuale della tecnologia e prospettive di sviluppo”, ENEA, RdS/PAR2013/051

Progetto B.3.2
Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER

- G.M. Polli, A. Cucchiaro “Stato di fabbricazione dei 9 magneti di responsabilità ENEA del Tokamak JT-60SA”, ENEA, RdS/PAR2014/049
- P. Rossi, A. Cucchiaro “Realizzazione dei componenti per la composizione delle prime sei casse di contenimento dei moduli del magnete toroidale di JT-60SA”, ENEA, RdS/PAR2014/050
- A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace, P. Zito “Realizzazione e collaudo di tre unità di commutazione veloce per JT-60SA”, ENEA, RdS/PAR2014/051
- P. Zito, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace “Realizzazione e collaudo dei sistemi per il controllo veloce del plasma di JT-60SA”, ENEA, RdS/PAR2014/052
- P. Zito, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace “Realizzazione dei sistemi di alimentazione CS1 e CS4”, ENEA, RdS/PAR2014/053
- P. Zito, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace “Realizzazione e collaudo dei trasformatori per gli alimentatori CS2 e CS3”, ENEA, RdS/PAR2014/054
- P. Favuzza, A. Antonelli, M. Cuzzani, G. Fasano, S. Mannori “Risultati relativi alla prima fase di purificazione del Litio circolante all'interno dell'impianto Lifus 6 e verifica ed ottimizzazione contestuale del suo funzionamento”, ENEA, RdS/PAR2014/055
- G. Miccichè, L. Lorenzelli, F. Frascati “Risultati finali delle prove di ricondizionamento del Target assembly di IFMIF”, ENEA, RdS/PAR2014/056
- D. Bernardi, G. Miccichè, P.A. Di Maio, Pietro Arena, G. Bongiovì “Studio del comportamento termo-meccanico del target assembly nelle condizioni transitorie di start up”, ENEA / Università di Palermo, RdS/PAR2014/057
- D. Bernardi, M. Frisoni, G. Miccichè “Ottimizzazione del design del target assembly completa di analisi strutturale e neutronica”, ENEA, RdS/PAR2014/058
- C. Cristalli, L. Pilloni, C. Testani, S. Matera “Trattamenti termici e caratterizzazione dell’acciaio ferritico-martensitico (7Cr)

alternativo all'EUROFER per la realizzazione del target assembly di IFMIF", ENEA / Centro Sviluppo Materiali, RdS/PAR2014/059

- G. Ramogida, F. Crisanti, G.M. Polli "Studio sulla fattibilità di un sistema magnetico poloidale e toroidale superconduttore per FAST", ENEA, RdS/PAR2014/060
- F. Crisanti, G. Ramogida, G.M. Polli "Studio sull'analisi termoidraulica di un sistema magnetico superconduttore per FAST", ENEA, RdS/PAR2014/061

Progetto C.1
Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

- B. Di Pietra, J. Canonaco, A. Pannicelli, G. Puglisi, F. Zanghirella "Ottimizzazione della piattaforma ENSim per la simulazione di reti termiche in assetto poligenerativo", ENEA, RdS/PAR2014/013
- B. Di Pietra , F Bonfà, L. Pazzola, J. Canonaco, G. Puglisi "Teleriscaldamento di un quartiere ad alt intensità abitativa di Roma: analisi e sviluppo della rete termica", ENEA, RdS/PAR2014/014
- B. Di Pietra, J. Canonaco, G. Puglisi, F. Zanghirella "Analisi energetica di un'ipotesi di trasformazione di reti di teleriscaldamento esistenti in reti poligenerative con presenza di scambio attivo", ENEA, RdS/PAR2014/015
- A. Del Giudice, G. Fiorenza, G. Graditi, A. Merola, M. Valenti "Smart Metering per misure di Power Quality", ENEA, RdS/PAR2014/016
- M. Badami, A. Portoraro "Analisi dei dati prestazionali di una rete di teleriscaldamento di quartiere", Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2014/017
- F. Gugliermetti, F. Bisegna, F. Nardecchia "Simulazione e valutazione di una rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento per utenze residenziali attraverso indici di prestazione exergetici", Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2014/018
- M. A. Ancona, F. Melino "Analisi di soluzioni progettuali per la trasformazione di reti di teleriscaldamento esistenti in reti poligenerative con presenza di scambio attivo", Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/019
- G. Leone, A. Piacentino, G. Ciulla, V. Lo Brano, A. Galatioto, M. Bonomolo, M. Beccali " Efficientamento energetico isole minori non connesse al sistema elettrico nazionale: stima del potenziale termico ai fini dello sviluppo di reti di teleriscaldamento e raffreddamento", Università di Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici, RdS/PAR2014/020
- M. Dell'Isola, P. Vigo, G. Ficco, L. Celenza "Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite", Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica, RdS/PAR2014/021
- C. Landi, D. Gallo, M. Luiso, F. Clarizia, R. Rinaldi "Analisi e sviluppo di un prototipo di rete di misuratori per la gestione multi-utility con funzionalità avanzate per la gestione dell'energia" , Seconda Università di Napoli - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, RdS/PAR2014/022
- P. Clerici Maestosi , C. Meloni, F. Romanello, F. Pieroni, S. Pizzuti, S. Romano, M. Chinnici, A. Quintiliani, G. Vicoli "Gestione integrata di uno Smart Village: risultati sperimentali in una rete di edifici e progettazione di aspetti prototipali orientati alla gestione di smart district", ENEA, RdS/PAR2014/023
- F. Lauro , F. Moretti, S. Panzieri "Upgrade del sistema di supervisione e controllo BEMS per la diagnostica di anomalie a basso livello e controllo ed ottimizzazione della climatizzazione attraverso MPC", Università Roma Tre - Dipartimento di ingegneria, RdS/PAR2014/024
- G. Comodi, A. Fonti, F. Polonara, S. Longhi "Miglioramento delle funzionalità di un simulatore di edificio e sua evoluzione verso la simulazione di reti di edifici in scenari di demand response", Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, RdS/PAR2014/025
- A. Capozzoli , S. P. Corgnati, V. Fabi, F. Lauro, D. Raimondo "Validazione, analisi, sviluppo ed implementazione di modelli di diagnostica orientata a reti di edifici", Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2014/026
- M. G. Maglione, S. Aprano, P. Tassini, C. Minarini "Fabbricazione e caratterizzazione di dispositivi OLED realizzati tramite impiego di materiali fosforescenti di sintesi innovativa a base di complessi dell'Iridio(III)", ENEA / Sesmat S.r.l., RdS/PAR2014/027
- P. Manini, V. Criscuolo, C.T. Prontera "Sintesi, Caratterizzazione e Proprietà Optoelettroniche di Complessi dell'Iridio(III) quali Nuovi Materiali Elettroluminescenti per Dispositivi LEECs", Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche, RdS/PAR2014/028
- L. Blaso, S. Fumagalli, P. Pistochini, M.G. Villani, O. Li Rosi, A. Antonelli, G. Leonardi "Progettazione e sperimentazione con sistemi a LED innovativi", ENEA /Università Insumbria, RdS/PAR2014/029
- M. Rossi, D. Casciani, F. Musante "Lighting design for wellbeing", Politecnico di Milano - Dipartimento Design, RdS/PAR2014/030
- L. Bellia, A. Pedace, G. Barbato "Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro", Università di Napoli Federico II - Dipartimento Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/031
- A. Rizzi, C. Bonanomi "Indagine sulle variazioni locali dell'indice di resa cromatica e approcci per sue possibili modellizzazioni", Università di Milano - Dipartimento Informatica, RdS/PAR2014/032

- F. Bisegna, C. Burattini, G. Curcio, L. Piccardi, F. Ferlazzo, A.M. Giannini, F. Gugliermetti “Approfondimento sperimentale sulla capacità delle nuove sorgenti di illuminazione artificiale LED di influenzare le performance, la qualità e la quantità del sonno", Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2014/033
- R. Chierici, A. Di Gregorio, N. Gozo “City Profiler 2015 – Un tool per la validazione dell’audit e il monitoraggio delle performance della pubblica illuminazione”, Università Milano Bicocca – CRIET / ENEA, RdS/PAR2014/034
- N. Gozo, L. Blaso, G. Giuliani, C. Honorati Consonni, C. Meloni F. Marino ” Progetto Lumière: Metodologia e strumenti per una gestione efficiente del servizio di pubblica illuminazione”, ENEA / Università Roma Tre, RdS/PAR2014/035
- “Linee Guida Lumière 2.0 - Modelli gestionali e strumenti per l’illuminazione pubblica”, a cura di ENEA, RdS/PAR2014/048
- L. Quercia, D. Palumbo, P. Di Lorenzo, F. Lazzaroni, T. Beltrani, S. Chiavarini "Sviluppo di un sistema automatico di monitoraggio dei prodotti alimentari freschi nelle celle frigorifero usate per lo stoccaggio ed il trasporto", ENEA, RdS/PAR2014/036
- R. Capuano, A. Catini, C. Di Natale "Progetto e sviluppo di una matrice di sensori di gas per il monitoraggio dei processi post-raccolta nei frutti", Università di Tor Vergata - Dipartimento di Ingegneria Elettronica e Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, RdS/PAR2014/037
- L. Quercia, D. Palumbo, P. Di Lorenzo, L. D'Aquino "Utilizzo dei materiali a cambiamento di fase per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e qualitative delle celle frigorifero usate per stoccaggio e trasporto prodotti alimentari freschi", ENEA, RdS/PAR2014/038
- P. Principi, R. Fioretti, B. Copertaro "Ottimizzazione energetica delle celle refrigerate per lo stoccaggio e il trasporto di prodotti alimentari freschi utilizzando Materiali a Cambiamento di Fase”, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, RdS/PAR2014/039
- D. Fontana, M. Pietrantonio, S. Pucciarmati, G.N. Torelli “Sviluppo di processi ecoinnovativi per il recupero di metalli ad elevato valore aggiunto da RAEE”, ENEA. RdS/PAR2014/040
- S. Canepari, M.L. Astolfi, E. Marconi, C. Farao “Caratterizzazione del refluo prodotto nel processo idrometallurgico per il recupero di elementi pregiati da schede elettroniche (RAEE) sviluppato da ENEA”, Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2014/041
- P. Battistoni, A.L. Eusebi, D. Cingolani “Studio di fattibilità per il passaggio di scala dell’impianto Romeo da pilota ad impianto industriale”, Università politecnica delle Marche - Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica, RdS/PAR2014/042
- D. Fontana, R. De Carolis, M. Pietrantonio, S. Pucciarmati, G. N. Torelli “Recupero di materiali ad elevato valore aggiunto da AEE”, ENEA, RdS/PAR2014/043
- M. Segreto, R. Guida “Progettazione della facility per il testing dei motori elettrici”, ENEA, RdS/PAR2014/044
- E. Fiorucci “Sviluppo di un protocollo contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009”, Università de L’Aquila - Dipartimento Ingegneria industriale e dell’informazione e di economia, RdS/PAR2014/045
- A. Federici, C. Martini, F. Del Magro, F. Pozzar “Analisi campionaria dei consumi elettrici e della propensione all’efficienza energetica nelle PMI“, ENEA / Università di Udine - Dipartimento Ingegneria industriale e dell’informazione e di economia /Friuli Innovazione, RdS/PAR2014/046
- G. Nardin, F. Dal Magro, F. Pozzar “Metodologia di valutazione delle opportunità di efficientamento energetico nelle PMI: prima applicazione ad un campione di imprese del Friuli Venezia Giulia”, Università di Udine - Dipartimento Ingegneria industriale e dell’informazione e di economia /Friuli Innovazione, RdS/PAR2014/047

Progetto C.2
Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

- G. Murano. G. Riva “Redazione di un atlante per la scelta rapida degli interventi di riqualificazione degli edifici”, CTI, RdS/PAR2014/062
- V. Corrado, L. Ballarini, D. DIrutigliano, S. Paduos, E: Primo “Definizione degli edifici tipo con destinazione d’uso residenziale e non residenziale. Confronto delle prestazioni energetiche per gli edifici tipo, residenziali e non residenziali, nelle diverse fasce climatiche utilizzando SW stazionari e codici dinamici”, Politecnico di Torino - Dipartimento Energia , RdS/PAR2014/063
- M. Perino, S.P. Corgnatì, V. Fabi, E. Fabrizio, A. Capozzoli, V. Monetti, G. Serale, S. Fantucci, A. Lorenzati, F. Isaia “Analisi dell’influenza del comportamento dell’utenza sui consumi energetici finali degli edifici: fattori influenzanti, modelli probabilistici per la simulazione degli occupanti e profili comportamentali tipo” Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2014/064
- L. Belussi, L Danza, I. Meroni, G. Fasano, C. Romeo, M. Zînzi “Aggiornamento del SW semplificato DOCET per la certificazione energetica degli edifici residenziali esistenti per l’adeguamento alle nuove norme in vigore. ENEA /ITC CNR, RdS/PAR2014/065
- D. Testi, E. Schito, E. Menchetti, P. Conti, D. Della Vista, G. Pellegrini, E. Tiberi, W. Grassi, G. Fasano, P. Signoretti ” Il software SEAS per le diagnosi energetiche: interventi di assistenza e formazione e sviluppo di un modello semplificato per gli edifici ad uso residenziale”, RdS/PAR2014/068
- “Corso audiovisivo di base su SEAS”, Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell’Energia, dei Sistemi, del Territorio e

delle Costruzioni / ENEA, RdS/PAR2014/067

- F. Toso, A: Mura “Analisi sulla dotazione impiantistica di climatizzazione (estiva ed invernale) del patrimonio edilizio ad uso residenziale e terziario e valutazione dell’impatto economico in relazione a misure di politiche energetiche e ambientali”, CRESME Ricerche SpA, RdS/PAR2014/069
- P. Signoretti L. Terrinoni, D. latauro “Modelli di regressione per la stima dei fabbisogni energetici per la climatizzazione degli edifici”, ENEA, RdS/PAR2014/070
- M. Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, S. Longo “Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell’energia incorporata nell’edilizia e di modelli per la quantificazione del potenziale ventilative cooling nell’edilizia” Università Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell’Informazione e Modelli Matematici, RdS/PAR2014/071
- R. De Lieto Vollaro, G. Battista, E. Carnielo, M. Zinzi, S. Agnoli “Potenzialità e limiti delle strategie di ventilazione in aree urbane” Università di Roma 3 - Dipartimento di ingegneria / ENEA, RdS/PAR2014/073
- A. Albo, F. Cumo, F. Giustini, V. Sforzini, G. Fasano “Realizzazione di un modello sperimentale di parete ventilata per l’utilizzo del vettore gas per l’efficentamento degli edifici pubblici di grandi dimensioni. Valutazioni tecnico-economiche del sistema proposto”, Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica / ENEA, RdS/PAR2014/074
- G. Riva, M. Sotte, G. Coccia “L’accumulo di energia termica quale importante strumento per la realizzazione di edifici NZEB”, Università Politecnica Marche - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali, RdS/PAR2014/075
- L. Martirano, D. A. Sbordone, M. Manganelli, B. Di Pietra “Modello di valutazione della qualità energetica degli edifici integrati con sistemi di BA e fonti rinnovabili, tramite l’utilizzo di specifici indicatori” Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica / ENEA, RdS/PAR2014/076
- G. Cammarata, M. Cammarata, G. Capizzi “Sviluppo del codice di calcolo dinamico per la determinazione delle prestazioni estive ed invernali degli edifici” Università Catania - Dipartimento di ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/077
- G. Fasano, F. Margiotta, G. Puglisi “Applicazione del modello di calcolo dinamico ad un caso reale e relative valutazioni energetiche”, ENEA, RdS/PAR2014/265
- S. Ferrari “Linee guida per l’analisi dei dati di assorbimento elettrico di edifici del terziario pubblico”, Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, RdS/PAR2014/078
- A. Poggio, G. Cerino Abdin, A. Crocetta, L. Degiorgis, M. Jarre, M. Noussan “Progettazione di un cruscotto informativo per la gestione del bilancio energetico di un ente pubblico”, Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2014/079
- E. Santini, S. Elia “Modello matematico e strumento informatico user-friendly per la valutazione del consumo e degli interventi di risparmio energetico dei centri sportivi” Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2014/080
- E. Biele, D. Di Santo, G. Tomassetti “Analisi dell'impatto delle valvole termostatiche sui consumi finali degli utenti collegati alle reti di teleriscaldamento dei Comuni montani delle zone climatiche E ed F” FIRE, RdS/PAR2014/081
- V. Costantini, F. Crespi, E. Paglialunga, A. Palma. C. Martini “Sviluppo di una metodologia per la valutazione dell’impatto occupazionale per interventi di efficienza energetica nella green economy”, Università di Roma Tre - Dipartimento Economia / ENEA, RdS/PAR2014/082
- G. Fasano, G. Centi, M. G. Landi, F. Margiotta “Linee guida per un contratto Energy Performance Contract secondo il DLgs 102/2014”, ENEA, RdS/PA2014/083
- F. Cumo, A.M. Fogheri, F. Giustini, E. Pennacchia, C. Romeo “Sviluppo della certificazione energetico ambientale degli edifici come strumento per l’efficienza energetico-sostenibile e l’aumento della qualità ambientale interna degli edifici”, Sapienza Università di Roma – CITERA / ENEA, RdS/PAR2014/084
- F. Spinelli, L. Terrinoni, M. Zinzi, A. Iatauro, P. Signoretti “Costruzione degli anni meteorologici tipici per l’illuminamento naturale (AMTIN) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l’illuminazione artificiale negli edifici” ENEA, RdS/PAR2014/085
- M. Zinzi, F. Bisegna, B. Mattoni, A. Mangione “Analisi critica per l’individuazione di metodi semplificati di calcolo del LENI”, Sapienza Università Roma - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica / ENEA, RdS/PAR2014/087
- R. Paolini, T. Poli, A.G. Mainini, A. Speroni, A. Zani, M. Zinzi “Invecchiamento e sporcamento di cool materials: esposizione naturale e accelerata”; Politecnico di Milano - Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito / ENEA , RdS/PAR2014/088
- V. Serra, L. Bianco, V.R.M. Lo Verso, S. Iennarella, I. Vigna, M. Zinzi “Involucro trasparente a carattere dinamico e adattativo tramite l’integrazione di Phase Change Materials in elementi schermanti, ai fini della riduzione della domanda energetica per raffrescamento e illuminazione artificiale”, Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2014/072
- T. Dalla Mora, A. Righi, P. Ruggeri, F. Peron, P. Romagnoni, A. Daneo, M. Zinzi “Misura e prestazioni di sistemi trasparenti integrati con PV del tipo view-through” Università di Venezia IUAV - Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi / Stazione Sperimentale del Vetro / ENEA, RdS/PAR2014/089
- S. Agnoli, M. Zinzi “Analisi delle proprietà e delle prestazioni di vetrate isolanti con schermature in intercapedine”, ENEA, RdS/PAR2014/090
- A. Disi, A. Marchetti, G. Del Signore “Guida operativa e tool kit per condurre una valutazione di efficacia delle campagne di sensibilizzazione sui temi del risparmio e dell’efficienza energetica”, ENEA, RdS/PAR2014/091
- A. Disi, A. Amato “Modulo didattico definitivo del Corso EQUEM PA”, ENEA, RdS/PAR2014/092

- M. Presutto, S. Fumagalli, L. Blaso, P. Pistochini “Elementi per una efficace sorveglianza del mercato”, ENEA, RdS/PAR2014/093
- M. Presutto, S. Fumagalli “L'etichettatura energetica: dagli eldom ai componenti e sistemi”, ENEA, RdS/PAR2014/094
- M. Presutto, S. Fumagalli, P. Pistocchini “Il consumatore pro-attivo”, ENEA, RdS/PAR2014/095
- B. Baldissara, B. Felici, M. Rao “Strumento per aumentare la sensibilizzazione dell’utente finale sui temi del risparmio energetico - comportamenti più consapevoli nell’utilizzo dell’energia in ambito domestico e negli spostamenti casa-lavoro”, ENEA, RdS/PAR2014/096
- E. Costanzo “Ricerca e innovazione tecnologica nei programmi afferenti al Building Coordination Group dell?Agenzia Internazionale dell’Energia”, ENEA, RdS/PAR2014/097
- A. Disi, F. Pacchiano, L. Cifolelli “Analisi e studio dei modelli di valutazione dei programmi finalizzati al cambiamento comportamentale per il risparmio e l’efficienza energetica”, ENEA, RdS/PAR2014/098
- M. Morcellini, L. Cannavò, M. Gravila, A.R. Montani, M. Sarrica, S. Brondi, V. D’Antonio, M. Ferrucci, C. Piscopo, A. Pranovi, G. Santonastaso, P. Tommasini, A. Zanconato “L’energia della comunicazione: linee guida per l’efficienza energetica nella PA”, Sapienza Università Roma - Dipartimento di Comunicazione e Ricerca Sociale , RdS/PAR2014/066
- “Sviluppo della metodologia di indagine. Realizzazione di schede tecniche moduli per la formazione del personale SOTACARBO per la creazione di un primo data base degli edifici pubblici insistenti sul territorio del Sulcis”, ENEA, RdS/PAR2014/100
- A. Madeddu, F. Poggi “Realizzazione di un data base degli edifici pubblici insistenti sul territorio del Sulcis: caratterizzazione edifici e indicatori statistici”, Sotacarbo, RdS/PAR2014/101
- G. Fasano, C. Romeo, F. Margiotta, G. Centi “Metodologia di analisi energetica per migliorare l’efficienza del sistema edificio/impianto in edifici vincolati”, ENEA, RdS/2014/086
- C. Frau, E. Loria, G. Cau “Attività di diagnosi energetica sull’edificio vincolato: caso studio del C.R. Sotacarbo”, Sotacarbo, RdS/2014/264

Progetto C.3
Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

- F. D’Annibale, G. Zummo, C. Menale “Studio di metodi per l’aumento delle prestazioni dei sistemi di accumulo termico basati su materiali a cambiamento di fase”, ENEA, RdS/PAR2014/229
- N. Calabrese, A. Mariani, F. Rea “Prototipo di condizionatore d’aria compatto Solar DEC, sistema Freescoo Office: modifiche e risultati della campagna invernale e seconda campagna estiva”, ENEA, RdS/PAR2014/230
- M. Beccali, P. Finocchiaro, S. Longo, V. Lo Brano, G. Ciulla P. Finocchiaro “Test funzionali ed ottimizzazione delle performance di due prototipi di condizionatore d’aria compatti Solar DEC”, Università di Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell’informazione e Modelli matematici / Solarinvent, RdS/PAR2014/231
- A. Ebolese, D. Marano, V. Sabatelli, A. Bruno "Caratterizzazione teorico-sperimentazione di ricevitori ottimizzati per applicazioni solari termiche a media temperatura”, ENEA, RdS/PAR2014/232
- V. Sabatelli, C. Copeta, A. Bruno, D. Marano "Sviluppo e sperimentazione di un prototipo di radiometro per la caratterizzazione del flusso solare in ricevitori a geometria cilindrica”, ENEA, RdS/PAR2014/233
- M. Bortolato, S. Dugaria, D. Del Col “Sviluppo e sperimentazione di dispositivo per la misura diretta del flusso solare concentrato su superficie piana”, Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/234
- N. Calabrese, R. Trinchieri, L. Saraceno, G. Boccardi, N. Pragliola “Test in camera climatica di un prototipo di PdC ad R744 reversibile (caldo/freddo) dotato di un eiettore per il recupero dell’energia di espansione: potenzialità 30 kW” ENEA / Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/235
- F. Botticella, R. Mastrullo, A.W. Mauro, L. Menna “Studio termodinamico, progettazione dei componenti principali, definizione delle prestazioni energetiche in accordo con le normative vigenti per una pompa di calore ad eiettore operante con anidride carbonica atta alla produzione di acqua calda sanitaria”, Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2014/236

Progetto C.4
Prodotti e processi per il miglioramento dell’efficienza energetica nell’elettromobilità

- G. Buja, M. Bertoluzzo “Automazione di un caricabatteria contactless per city car”, Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale RdS/PAR2014/102
- R. Pinto, V. Lopresto, S. Mancini, C. Merla “Valutazione sperimentale e numerica dell’esposizione ai campi elettromagnetici residui emessi da un sistema di ricarica senza contatto”, ENEA, RdS/PAR2014/103
- C. Attaianese, G. Tomasso, M. Di Monaco, M. D’Arpino, U. Abronzini “Validazione di un convertitore modulare per Infrastrutture di ricarica multi-sorgente per l’ottimizzazione dei flussi di potenza nelle micro-grid”, Università di Cassino e del Lazio Meridionale - , RdS/PAR2014/104
- G. Giuli, M. Mancini, A. Genovese “Elettromobilità urbana e Sistemi di Ricarica Multisorgente”, ENEA. RdS/PAR2014/105
- G. Pede , F. Vellucci “Effetti della carica rapida sui sistemi d’accumulo elettrochimici”, ENEA, RdS/PAR2014/106

- N. Andrenacci, V. Fabrizi, R. Ragona, G. Valenti “Strumenti metodologici per la dislocazione ottimale ed il dimensionamento energetico delle stazioni di ricarica elettrica in ambito urbano”, ENEA, RdS/PAR2014/107
- ricarica con funzionalità vehicle-to-grid: validazione sperimentale “, Politecnico di Torino – Dipartimento Energia e Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia, RdS/PAR2014/108
- A. Genovese “Comunicazione e diffusione dei risultati” ENEA, RdS/PAR2014/109

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito web ENEA all’indirizzo:

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-sistema-elettrico



Abbreviazioni ed acronimi

AC	Alternating current
a/c	Rapporto acqua/cemento
ABP	Potenziale di biogassificazione anaerobica
ACS	Acqua calda sanitaria
AdP	Accordo di Programma
AAE	Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche
ADS	Accelerator Driven System
AFM	Microscopia a forza atomica
AGATUR	Advanced GAs TUrbine Rising
AIT	Aluminium Induced Texture
ALFRED	Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator
ARF	Funghi anaerobi ruminanti
ASTEC	Accident Source Term Evaluation Code
ASTRID	Advanced Sodium Test Reactor for Industrial Demonstration
AV	Acqua di vegetazione
AZO	Ossido di zinco drogato con alluminio
B	Campo di induzione magnetica
BA	Broader Approach
BDBA	Beyond Design Basis Accident
BEMS	Building Energy Management Systems
BIPV	Building-Iintegrated PhotoVoltaic
BoC	Beginnning of Cycle
BP	Blackplate
BPS	By-Pass Switch
BT	Bassa tensione
BWR	Boiling Water Reactor
c.a.	Corrente alternata
c.c.	Corrente continua
C.R.	Centro Ricerche
CATHARE	Code for Analysis of THermal hydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation
CC	Corrente costante
CCS	Carbon Capture and Storage
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEM	Campi elettromagnetici
CD-DEG	Circular Diaphragm Dielectric Elastomer Generator
CFD	Computational Fluid Dynamics (fFuidodinamica computazionale)
CGE	Cold Gas Efficiency
CHP	Combined Heat and Power
CIGS	Seleniuro rame-indio-gallio
CIRCE	CIRcolazione Eutettico
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare
CMC	Carbossimetil cellulosa
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
CNT	Nanotubi di carbonio
COD	Chemical Oxygen Demand
COP	Coefficient Of Performance
CPC	Compound Parabolic Concentrator
CRESCO	Centro computazionale di RicErca sui Sistemi COmplessi
CS	Solenoide centrale
CSARP	Cooperative Severe Accident Research Program
c-Si	Silicio cristallino
CSL	Corn Steep Liquor
CSM	Cemtro Speciale Materiali

CSP	Concetrating Solar Power (Potenza solare concentrata)
CSTR	Completely Stirred Tank Reactor, reattore a serbatoio agitato
CTI	Comitato Termotecnico Italiano
CV	Potenziale costante
CVD	Chemical Vapour Deposition
CVI	Chemical Vacuum Infiltration
CZTS	Cu_2ZnSnS_4
DA	Digestione anaerobica
DC	Direct current
DEC	Desiccant Evaporative Cooling
DFT	Density Functional Theory
DGGE	Denaturing Gradient Gel Electrophoresis
DHR	Decay Heat Removal
D.Lgs	Decreto legge
DNI	Direct Normal Irradiation
DNS	Direct Numerical Simulation
DP	Doppio pancake
dpa	Displacement per atom
DS4	Doppio stabilizzato
DSA	Deterministic Safety Analysis
DSC	Calorimetria differenziale a scansione
DSM	Demand Side Management
DSP	Processore digitale di segnali
DSS	Decision Supporter System
DTA	Analisi termica differenziale
DTG	Termogravimetria derivata
E	Campo elettrico
EBC	Energy in Buildings and Community Programme
EBR-II	Experimental Breeder Reactor II
ECU	Unità elettronica di controllo
EDS	Energy dispersion spectroscopy
EED	Direttiva europea sull'efficienza energetica
EER	Energy Efficiency Ratio
EERA	European Energy Research Alliance
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ELTL	EVEDA Lithium Test Loop
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia, e lo sviluppo economico sostenibile
EoC	End of Cycle
EPC	Contratto di rendimento energetico
EQE	Efficienza quantica esterna
ERANOS	European Reactor ANalysis Optimized System
ESCo	Energy Saving Company
ESNII	European Sustainable Nuclear Industrial Initiative
ETL	Strati trasportatoti di elettrodi
EURATOM	European Atomic Energy Community
EUWP	End Use Working Party
EVEDA	Engineering Validation and Engineering Design Activities
EVI	Electric Vehicle Initiative
F4E	Fusion for Energy
FA	Fuel Assembly
FAST	Fusion Advanced Study Torus
FBR	Fotobioreattore
FDS	Fast Disconnecting System
FEM	Metodo elementi finiti
FF	Fill factor
FLD	Fattore di luce diurna
FLD_m	Fattore medio di luce diurna
FIB	Focused Ion Beam
FIRE	Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia
FISH	Fluorescence In Situ Hybridization
FPPC	Controllo veloce posizione plasma
FRESCOO	FREE Solar COOling

FTIR	Spettroscopia IR in trasformata di Fourier
FV	Fotovoltaico
g.	giorno
GESSYCA	Generatore Sperimentale di Syngas da Carbone
GHSV	Gas Hourly Space Velocity
GIF	Generation IV International Forum
GIS	Geographic Information System
GNP	Nanoplacchete di grafene
GO	Graphene oxide, ossido di grafene
GWP	Global warming potential
GZO	Ossido di zinco drogato gallio
H	Campo magnetico
HBA	Home & Building Automation
HCA	Ripartitore di calore
HERO	Heavy liquid mEtal-pRessurized water cOoled tube
HFC	Idrofluorocarburi
HGPT	Teoria delle perturbazioni generalizzate su base euristica
HM	Contatore di energia termica
HRT	Tempo di ritenzione idraulica
HSM	Heat Storage Material (Materiale di accumulo termico)
HTF	Heat Thermal Fluid (fluido termoconvettore)
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
HZP	Hot Zero Power (Reattore caldo a potenza zero)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBAD	Ion Beam Assisted deposition
ICD-DEG	Inflatable Circular Diaphragm - Dielectric Elastomer Generator
IEA	International Energy Agency
IFERC	International Fusion Energy Research Center
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility
IGD-TP	Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform
ILCD	International Life Cycle Data
IIT	Istituto Italiano di Tecnologia
IPA	Alcool Isopropilico
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISO	International Organization for Standardization
ITC-DDC	Sistema di contabilizzazione del calore basato sui tempi di inserzione compensati con i gradi giorno effettivi dell'unità immobiliare
ITC-TC	Sistema di contabilizzazione del calore basato sui tempi di inserzione compensati con la temperatura media del fluido termovettore
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
ITO	Indium Tin Oxide
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JRC	Joint Research Center
J_{sc}	Densità di corrente di corto circuito
JT-60SA	JAEA Tokamak 60 Super Advanced
KPI	Key Performance Indicator
LBE	Eutettico piombo-bismuto
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Local control cubicle
LEADER	Lead European Advanced Demonstrator Reactor
LEB	Local Energy Balance
LECOR	LEad CORrosion (Impianto a Piombo Fluente)
LED	Light emitting diode
LEEC	Light Emitting Electrochemical Cell
LENI	Lighting Energy Numeric Indicator
LES	Large Eddy Simulation
LFP	Litio ferro fosfato
LFR	Lead Fast Reactor
LIBs	Batterie secondarie al litio
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage (Accumulo energia termica a calore latente)
LIFUS	LIthium FUSion
LMVP	Fosfato misto di manganese e vanadio
LNMO	Ossido misto di litio e manganese

LOCA	Loss of coolant accident (Incidente di perdita di refrigerante)
LWR	Light water reactor (reattori ad acqua leggera)
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MDEA	Metildietanolammina
MEA	Monoetanolammina (C_2H_7NO)
MELCOR	Methods for Estimation of Leakages and Consequences Of Releases
MID	Direttiva Europea sugli strumenti di misura
MOX	Combustibile ad ossidi misti
MiSE	Ministero dello Sviluppo Economico
MT	Media tensione
NACIE	Natural Circulation Experiment
NEA	Nuclear Energy Agency
NEZB	Nearly Energy Zero Building
NFPCM	Nano Fluid PCM
NIL	Nano-Imprint Lithography
NOEL	Natural Ocean Engineering Laboratory
NPV	Net Present Value
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NSGA	Non dominated Sorting Genetic Algorithm
nZEB	nearly Zero Energy Buildings
OCV	Potenziale a circuito aperto
ODC	Optical Diagnostic of Combustion
ODE	Ordinary Differential Equation
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLA	Oleilammina
OLED	Organic light emitting diode
ORC	Organic Rankine Cycle
OWC	Oscillating Water Column
PA	Pubblica Amministrazione
PAA	Acido poliacrilico
PAEE	Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PBP	Pay Back Period
PCB	Printed Circuit Board
PCM	Phase Change Material (materiale a cambiamento di fase)
PCS	Prova Componenti Solari
PdC	Pompa di calore
PDE	Partial Differential Equation
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PES	Primary Energy Saving
PEWEC	PEndulum Wave Energy Converter
PFR	Plug Flow Reactor
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
PLC	Programmable Logic Controller
PLIF	Fluorescenza planare
PLOHS	Protected Loss of Heat Sink
PM	Peso molecolare
PMMA	Polimetilacrilato
PNIRE	Piano Nazionale Infrastrutture di Ricarica Elettrica
PO	Posidinia oceanica
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PS	Polistirene
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PTO	Power-take off
PVAc	Polivinilacetato
PVD	Physical vapor deposition
PVdF	Polivinilenfluoruro
PWR	Pressurized Water Reactors (reattore ad acqua pressurizzata)
QSSPC	Quasi Steady State Photo Conductance decay
RAAE	Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche
RAI	Rapporto aeroilluminante
RdS	Ricerca di Sistema

Re	Numero di Reynolds
RF	Radio frequenza
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
REWEC	Resonant Wave Energy Converter
RGO	Reduced Graphene Oxide (ossido di grafene ridotto)
R_h	Riflettanza emisferica
RIE	Reactive Ion Etching
ROI	Return on Investment
RMS	Response Surface Methodology
RNA	Reactor Network Analysis
RSE	Ricerca di Sistema Energetico
R_{sh}	Resistenza di strato
SBLOCA	Small Break LOCA
SBO	Station Black-out
SCB	Static Circuit Breaker
sccm	Standard cubic centimeters per minute
SCOOP	Coefficiente di prestazione stagionale, in modalità pompa di calore
SCWG	Gassificazione con acqua in condizioni supercritiche
SEAS	Software Energetico per Audit Semplificati
SEER	Coefficiente di prestazione stagionale, in modalità macchina frigo
SEI	Solid electrolyte interphase
SEM	Scanning electron microscopy
SEN	Strategia Energetica Nazionale
SEWGS	Sorption Enhanced Water Gas Shift
Set-Plan	Strategic Energy Technology Plan
SH&C	Solar Heating and Cooling
SHRT	Shutdown Heat Removal Test
SMR	Small Modular Reactor
SNETP	Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
SNG	Gas naturale sintetico
SNU	Switching Network Unit
SOC	Stato di carica
SOUR	Specific Oxygen Uptake Rate
SPND	Self Powered Neutron Detectors
SSE	Sottostazione elettrica
SW	Software
TAT	Triazatruxeni
TCO	Ossido conduttivo trasparente
t_D	Periodo di utilizzo nelle ore diurne in un anno
TEM	Microscopia elettronica a trasmissione
TES	Thermal Energy Storage
TF	Campo toroidale
TGA	Analisi termogravimetrica
TIG	Tungsten Inert Gas
TLR	Teleriscaldamento
t_N	Periodo di utilizzo nelle ore notturne in un anno
TOPO	Triottilfosfinossidi
TPL	Trasporto Pubblico Locale
TS	Termine sorgente
TVC	Trapped Vortex Burner
U	Trasmittanza
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UOX	Ossido di uranio
USC	Ultra-SuperCritico
US-NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
VAL.CH.I.RI.A	VALorizzazione CHar, Impianto RIcerche Avanzate
VAN	Valore attuale netto
V&V	Validazione e verifica
VIP	Vacuum Insulation Panel
VLS	Vapor-Liquid-Solid
V_{oc}	Tensione a circuito aperto
VS	Solidi volatili

V2G	Vehicle to Grid
WAM	WAve prediction Model
WEC	Wave Energy Converter
WGS	Water Gas Shift
WWR	Window to Wall Ratio
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction
ZECOMIX	Zero Emission COal MIXed
τ_{eff}	Lifetime effettivo di portatori minoritari

Edito dall'ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Copertina: Cristina Lanari

Maggio 2016

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

Ministero dello Sviluppo Economico

