



**ENEA**

Agencia 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

---

**Sintesi dei risultati del  
terzo anno di attività**

**Marzo 2016**

Edito dall'ENEA – Servizio Promozione e Comunicazione  
a cura di Giuliano Ghisu  
Progettazione e realizzazione grafica: Cristina Lanari  
Stampato presso il Laboratorio Tecnografico ENEA – Frascati  
Finito di stampare nel mese di Maggio 2016

# RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

## INDICE

### **AREA GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE**

Sistemi avanzati di accumulo dell'energia **5**

### **AREA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE**

Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili **9**

Energia elettrica da fonte solare: celle fotovoltaiche innovative **13**

Energia elettrica da fonte solare: solare termodinamico **17**

Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso **21**

Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili **25**

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare **29**

Collaborazione ai Programmi Internazionali per il Nucleare di IV generazione **33**

Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER **37**

### **AREA RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA**

Risparmio di energia nei settori Industria, Servizi e Civile **41**

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico **45**

Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione **49**

Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità **53**





## Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

I sistemi di accumulo dell'energia per applicazioni mobili e stazionarie registrano un crescente impegno di ricerca e sviluppo e applicazioni in varie parti del mondo.

La forma più diffusa di accumulo dell'energia elettrica è quella elettrochimica, ma la principale tecnologia

utilizzata nelle reti elettriche è il pompaggio di acqua (accumulo meccanico). Tuttavia, 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.

Attualmente gli accumulatori elettrochimici hanno prestazioni (in termini di capacità di accumulo e di caratteristiche di ricarica) limitate e decrescenti con il numero di cicli di carica/scarica e a costi non ancora allineati con le necessità del mercato. Le batterie ritenute più interessanti sono quelle al litio, ad alta temperatura e a flusso. Le potenzialità tecniche delle batterie devono essere studiate e sviluppate fino a prototipi di taglia significativa con l'obiettivo di avere sistemi economicamente più convenienti ed energeticamente più efficienti.

Diversi paesi dell'Unione Europea ed extra-europei (Canada, Cina, Corea del Sud, Giappone, Stati Uniti) hanno 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 e accumulo di aria compressa) e

la ricerca di sistemi alternativi (accumulo elettrochimico con batterie e supercondensatori e, in piccola parte, accumulo in magneti superconduttori). Il maggiore impegno 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 non programmabili.

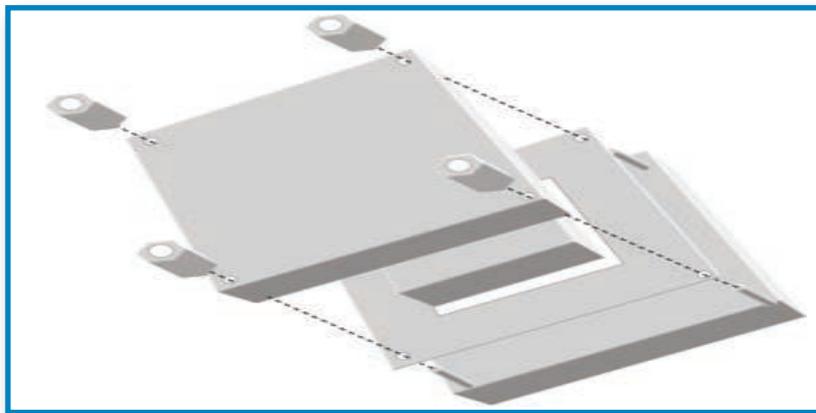
Le prospettive di mercato per i nuovi sistemi di accumulo elettrochimico sono ritenute estremamente

promettenti dagli analisti.

Inoltre il SET Plan (Strategic Energy Technology Plan – la strategia energetica dell'Unione Europea fino al 2050) ha inserito l'accumulo dell'energia elettrica tra le tecnologie strategiche prioritarie per lo sviluppo del sistema elettrico europeo e dell'Unione dell'Energia, in linea con gli obiettivi energetici al 2020 e al 2050.

L'ENEA è da oltre 20 anni impegnata nella ricerca e nello sviluppo di batterie al litio e relative applicazioni ai veicoli elettrici. Nell'ultimo decennio l'ENEA ha coordinato e svolto due programmi nazionali con il Ministero della Ricerca Scientifica, per la ricerca e lo sviluppo di batterie al litio per applicazioni mobili nei veicoli elettrici e nell'elettronica di consumo.

L'ENEA è da anni impegnata in progetti europei (tra gli altri, ASTOR, SCOPE, LIBERAL, ILHYPOS, ILLIBATT, HELIOS, HCV, GreenLion, Mars-EV) per la ricerca, lo sviluppo e la caratterizzazione di batterie al litio e altri sistemi elettrochimici (supercondensatori) per applicazioni prevalentemente mobili.



## OBIETTIVI

L'obiettivo finale del progetto è la ricerca, la realizzazione e la verifica sperimentale in applicazioni di maggiore interesse per la rete elettrica italiana, di sistemi di accumulo elettrico con prevalenza per quelli di tipo elettrochimico basati sul litio.

Inizialmente è stata svolta la valutazione dello stato di sviluppo e delle prospettive applicative di vari metodi di accumulo innovativi, quali, ad esempio, batterie ad alta temperatura e redox a flusso, l'utilizzo dell'idrogeno, analizzando l'intera filiera dalla produzione all'accumulo fino al riutilizzo finale, e altri sistemi di accumulo più avanzati, quali gli SMES (sistemi di accumulo in magneti superconduttori).

Sulla base delle valutazioni e di preliminari indagini sperimentali di laboratorio, il progetto si è concentrato su un numero limitato di soluzioni tecnologiche di più prossima applicazione: la selezione di materiali originali a più basso costo, e/o con maggiore prestazioni energetiche e a minore impatto ambientale, secondo quanto previsto nel Piano Triennale della RdS, come i sistemi al litio e quelli ad alta temperatura, eliminando, anche sulla base delle indicazioni ricevute dagli esperti, le attività sui sistemi redox a flusso e gli SMES.

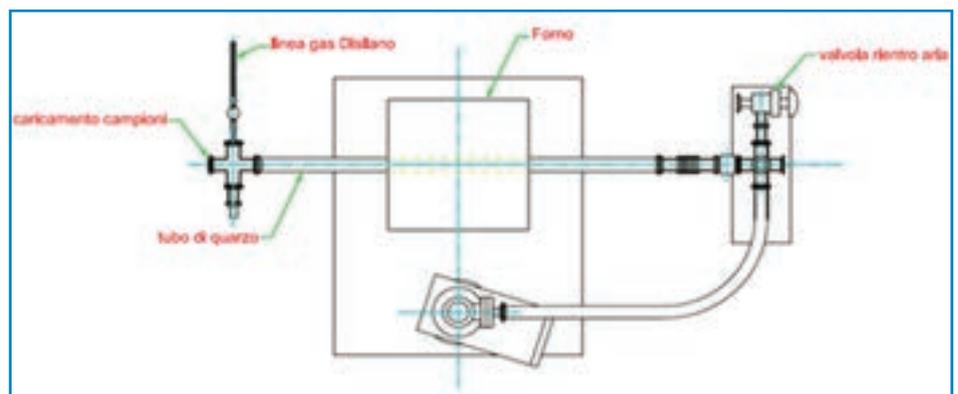
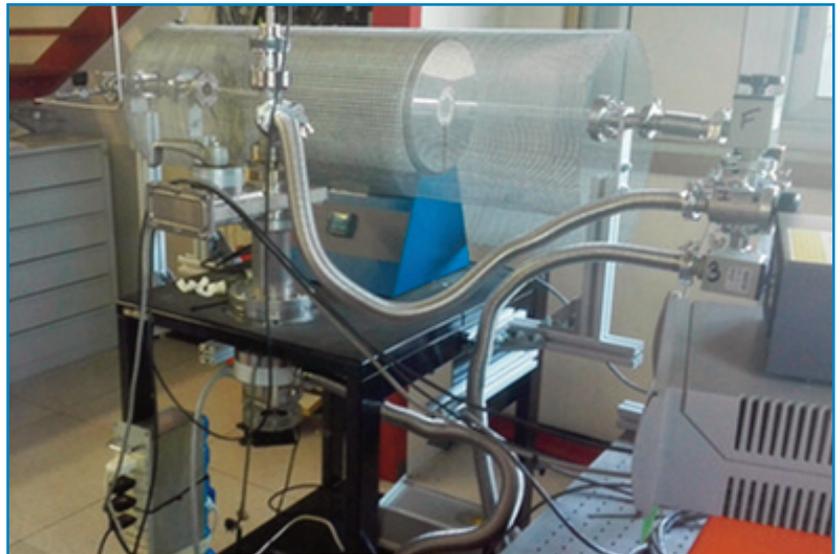
Inoltre le attività di ricerca hanno riguardato la valutazione dei vantaggi in alcune applicazioni significative (come la tranvia leggera di Bergamo) con la verifica sperimentale di soluzioni innovative per contenere i costi operativi, quali le applicazioni di "second life" di batterie già utilizzate nei veicoli elettrici; l'indagine anche sperimentale sulle importanti implicazioni di rischio e sicurezza nell'uso dei sistemi elettrochimici; e la messa a punto di possibili soluzioni innovative,

ambientalmente ed economicamente accettabili, di riciclo e recupero dei materiali contenuti nelle batterie più promettenti per il sistema produttivo ed applicativo nazionale.

## RISULTATI

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

L'attività ha previsto 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 e 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 da 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)



(nelle due immagini)  
Apparato composto da forno con tubo di quarzo dedicato alla crescita dei nanofili di ossido di silicio per materiali anodici di celle al litio

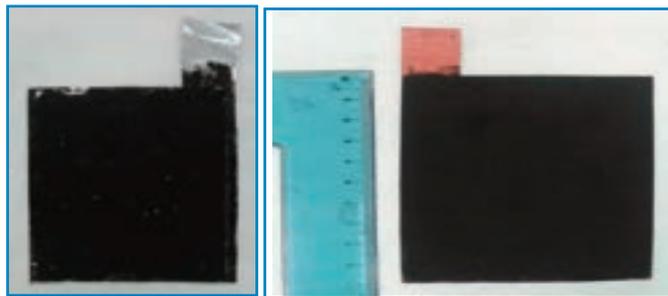
ed elettrochimica. I materiali scelti sono stati pertanto prodotti in quantità adeguate alla realizzazione e caratterizzazione di decine di campioni di elettrodi e di piccole celle da laboratorio (in versione a tre elettrodi e celle bottone). I materiali prodotti e i manufatti intermedi e finali (semicelle, celle e stack) sono stati sottoposti a completa caratterizzazione chimica, fisica ed elettrochimica nei vari laboratori di ricerca coinvolti (Università ed ENEA) in tutte le fasi del processo fino alla realizzazione di celle finali, secondo procedure concordate anche all'interno del Gruppo di Lavoro CNR-ENEA-RSE. I sistemi completi di taglia significativa (circa 1 Ah) sono delle due tipologie previste dal progetto: una di alta energia e l'altra di alta potenza. Il diagramma di Ragone, prodotto da prove su celle da laboratorio, mostra che a bassa potenza l'energia specifica, calcolata in base al peso del materiale attivo nell'elettrodo negativo, è di circa  $1210 \text{ Wh kg}^{-1}$  e si riduce a circa  $383 \text{ Wh kg}^{-1}$  quando la cella viene scaricata ad una potenza specifica superiore a 7000 W.

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

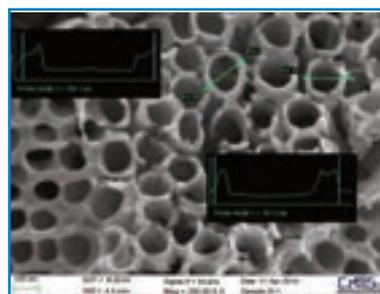
Le attività svolte in questo obiettivo hanno riguardato:

- L'analisi del comportamento di sistemi di accumulo in applicazioni con elevati potenziali risparmi di energia elettrica, che sarà completata con la messa a punto del modello matematico, con l'effettuazione di prove al banco su batterie al litio commerciali, in collaborazione con l'Università di Pisa, di analisi dell'introduzione di un sistema di accumulo stazionario in una metropolitana leggera di superficie, come quella sviluppata per la città di Bergamo ed effettuata con tram.
- 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 (già individuati e in fase di fornitura) sulla base dei profili caratteristici in alcune applicazioni tipiche per le reti elettriche, individuati nel precedente anno di attività. Queste prove sono state affiancate da prove di invecchiamento e degrado accelerate per fare un confronto sulle procedure e le modalità di prova ai fini dello sviluppo di modelli di comportamento da proporre per il successivo triennio, in collaborazione con l'Università di Roma, d'intesa con CNR e RSE, e da estendere anche ai supercondensatori.
- Sono state infine completate le attività degli studi di

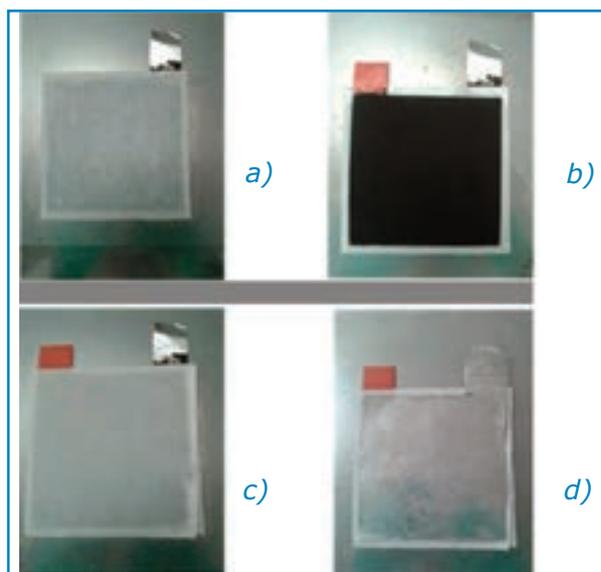
sicurezza per la messa a punto di impianti e di procedure per studiare sperimentalmente il problema dell'estinzione di un eventuale incendio di batterie



*Elettrodi catodico (destra) ed anodico (sinistra) prima dell'assemblaggio della cella per l'anodizzazione contemporanea di 10 elettrodi*



*Foto SEM (in alto) del campione di TiO<sub>2</sub>, materiale anodico di alta potenza, preparato nella cella (in basso) per l'anodizzazione contemporanea di 10 elettrodi*



*Sequenza di formazione della batteria ad alta energia: a) fotografia del 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*



Analisi termografica di una cella al litio durante le prove di "second life"



Danni subiti da moduli litio-ione in prove d'incendio: dalla zona di prova (A e D), dai cavi di collegamento (B), dai connettori presenti sul ciclatore (C)



Banco prova incendio per celle/moduli litio-ione

## 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 di questo anno di attività (a conclusione del Piano triennale) è stato raggiunto con il completamento dell'attività sperimentali sulle fasi più critiche dei due processi analizzati, anche in collaborazione con l'Università di Roma per la critica fase di apertura della cella, e la progettazione preliminare dei due processi di recupero.

Le attività di ricerca sono state sostanzialmente divise nella messa a punto di due processi "green" alternativi e/o con elevate ricadute economiche e ambientali:

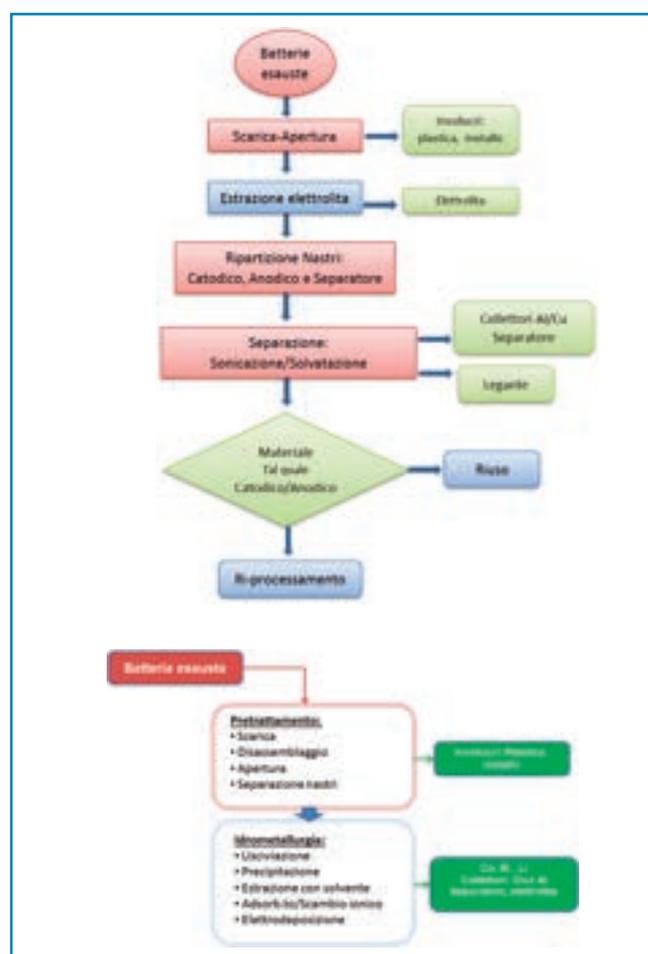
- Recupero di componenti da batterie al litio-ione esauste con cobaltite di litio mediante un processo eco-sostenibile e innovativo.
- Sviluppo di un processo per il recupero di materiali di elevato valore aggiunto da batterie al litio-ione esauste con litio-ferro fosfato tramite processi idro-metallurgici.

## Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

L'ENEA rappresenta l'Italia nell'alleanza europea EERA contribuendo in particolare al tema "Energy storage" e coordinando la parte relativa all'Accumulo Electrochimico.

Partecipa a diversi accordi di collaborazione con l'International Energy Agency (IEA), tra cui su "Energy Conservation through Energy Storage".

La partecipazione internazionale 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.



Schemi a blocchi dei processi di recupero ecosostenibile (a) e idrometallurgico (b) di materiali attivi da celle litio-ione

Area di ricerca: Governo, Gestione e Sviluppo del Sistema elettrico nazionale

Progetto A.4: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Referente: M. Conte, mario.conte@enea.it

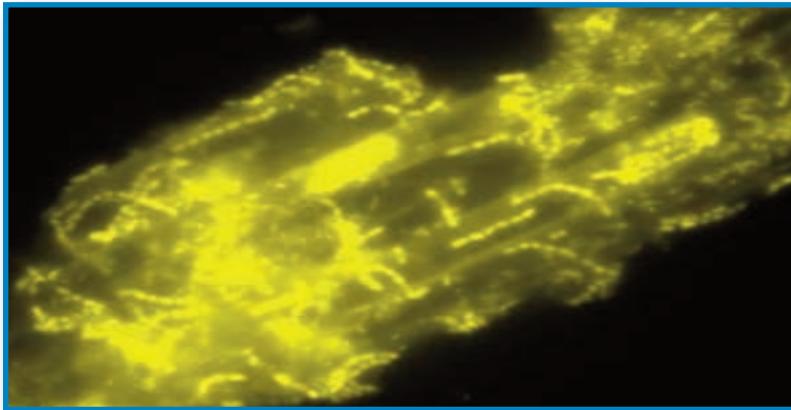


## Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Con il termine “bioenergia” si intende la produzione di energia rinnovabile dalle biomasse. Per quel che riguarda la produzione di energia elettrica, sono state prese in considerazione come possibili materie prime biomasse disponibili a livello locale, utilizzabili in impianti di taglia media e piccola mediante combustione diretta, gassificazione, o digestione anaerobica di quelle fermentescibili. Anche i biocombustibili gassosi, come il biogas prodotto dagli impianti di digestione anaerobica o il syngas ottenuto dalla gassificazione delle biomasse lignocellulosiche, sono interessanti

in quanto possono essere utilizzati in impianti di piccola taglia distribuiti sul territorio non solo presso i siti di produzione, ma anche per l'immissione nelle reti di distribuzione del gas naturale (biometano) o per alimentare sistemi cogenerativi isolati, sulla base delle effettive esigenze energetiche delle utenze finali. Questo richiede da un lato l'ottimizzazione dei processi di conversione della biomassa, 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, minimizzando le emissioni nocive per la salute e per l'ambiente, e di disporre di impianti affidabili e di facile gestione.



### OBIETTIVI

L'obiettivo del progetto è la dimostrazione su scala significativa di sistemi per la valorizzazione energetica delle biomasse, sia mediante la produzione di biogas o syngas, da utilizzare per la co-generazione di energia elettrica e calore in impianti decentralizzati di piccola-media taglia o per l'immissione come biometano nella rete nazionale di distribuzione del gas, sia attraverso lo sviluppo di sistemi di cogenerazione ad elevato rendimento basati su dispositivi innovativi per utilizzare sali fusi come vettori energetici. Inoltre, proseguiranno gli studi per la realizzazione di dispositivi innovativi in grado di ridurre i livelli di emissioni inquinanti.

### RISULTATI

#### Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili

Le attività di ricerca finalizzate allo sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili si sono rivolte in particolare ai processi di digestione anaerobica alimentati con mix di biomasse a maggior contenuto lignocellulosico e/o colture algali. La tecnologia oggetto della ricerca si basa su un processo di digestione anaerobica a doppio stadio, che prevede l'impiego di un impianto pilota di scala laboratorio, costituito da un reattore biologico separato in cui avviene la degradazione dei materiali organici di qualsiasi provenienza, e da un secondo reattore di metanogenesi per la produzione di biogas.

L'ottimizzazione del processo è stata effettuata alimentando l'impianto pilota esclusivamente con la scotta, scarto delle industrie casearie, dimostrando che è possibile dimezzare i tempi di produzione del biogas ed aumentare del 35% la resa energetica complessiva del processo rispetto alla configurazione convenzionale a un solo stadio. Risultati molto promettenti sono poi stati ottenuti anche nello sviluppo di processi biologici finalizzati ad incrementare la "digeribilità" di biomasse ricche in componente lignocellulosica, in particolare utilizzando funghi ruminali insieme ai microrganismi responsabili della fermentazione anaerobica, che ha permesso di produrre biogas da un substrato ricco di cellulosa come la paglia con rese in metano aumentate fino al 68% rispetto a un processo convenzionale. Inoltre, sono stati studiati processi semplificati e a basso costo per la produzione di microalghe in connessione a impianti di biogas, sfruttando le capacità fertilizzanti del digestato liquido e utilizzando la biomassa così prodotta per ottenere nuovo biogas, mediante un'operazione di



*Impianto bistadio di digestione anaerobica*

riciclo di nutrienti. Per quel che riguarda la produzione di biocombustibili con processi termochimici, sono stati studiati processi di gasificazione con acqua in condizioni supercritiche (SCW) di biomasse ad elevato contenuto idrico per la produzione di syngas. Il lavoro svolto ha riguardato la modellazione termodinamica, il confronto delle prestazioni del processo con differenti biomasse e la sua valutazione energetica, nonché la sperimentazione con un impianto bench-scale, progettato e realizzato in ENEA. In particolare, sono state effettuate prove di conversione di digestato di reflui zootecnici e biomassa da colture microalgali di *Scenedesmus dimorphus*, ottenendo in entrambe i casi un syngas con un potere calorifico superiore di 22 MJ/Nm<sup>3</sup> ed un contenuto elevato di idrogeno (40-45% in volume).

## **Sviluppo di sistemi di upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale**

La ricerca sui sistemi di upgrading dei biocombustibili si è occupata in primo luogo della rimozione dei contaminanti presenti nel biogas, in particolare solfuro di idrogeno (H<sub>2</sub>S), con l'obiettivo di arrivare alla produzione di biometano con caratteristiche tali da consentirne l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale.

Per la rimozione del solfuro di idrogeno sono state individuate e poste a confronto due diverse tecnologie chimico-fisiche, basate sull'utilizzo di carboni attivi (processo di adsorbimento) e di ossidi metallici (ossidazione catalitica). Per entrambi i processi gli studi avevano l'obiettivo di massimizzare la quantità di H<sub>2</sub>S rimosso dal biogas a parità di carbone o catalizzatore utilizzato minimizzando i consumi energetici. È stato anche studiato un processo biologico di rimozione dell'H<sub>2</sub>S mediante fotosintesi anossigenica, arrivando all'abbattimento

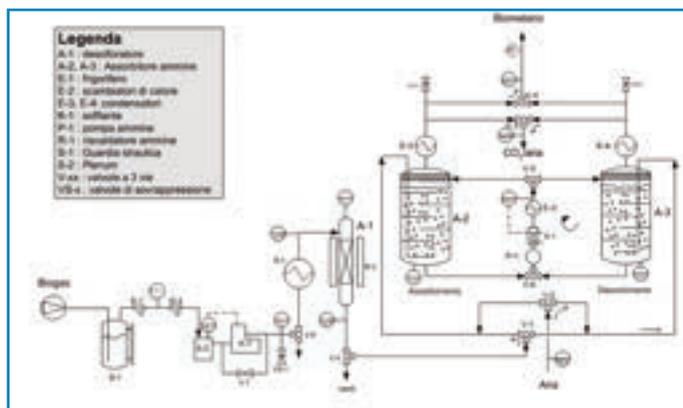
totale dell'H<sub>2</sub>S per un biogas con un contenuto di inquinante intorno a 400 ppm, con un basso consumo di energia (1 W/m<sup>2</sup>). Le attività relative ai processi di upgrading del biogas al fine di ottenere metano praticamente puro (97-99%), hanno riguardato l'impiego di un'ammina



*Fotobioreattore a LED*

complessa (2-ammino 2-metil 1-propanolo, AMP)

in una miscela di glicol etilenico e n-propanolo in proporzione 1:1, che permette di superare i limiti del processo convenzionale di assorbimento con ammine in acqua, soprattutto grazie alla possibilità di operare il desorbimento della CO<sub>2</sub> a temperatura più bassa ( $\leq 90$  °C), riducendo la perdita di ammina per evaporazione e degradazione, la corrosione degli impianti e il consumo di energia per la rigenerazione.



*Schema dell'impianto di up-grading del biogas mediante lavaggio con ammine*

Un'altra linea di attività ha invece riguardato lo studio di processi di separazione della CO<sub>2</sub> dal metano mediante la formazione/dissociazione di gas idrati, realizzata con l'impiego di particolari reattori a pressione, che consentono di arrivare ad una miscela con un contenuto in metano pari all'80%, partendo da un biogas che ne contiene il 60%. Nel corso degli ultimi due anni è stato possibile, anche grazie all'impiego di specifici promotori della formazione di idrati, scendere da pressioni di esercizio di 60 bar a 30 bar, limitando i consumi energetici e aprendo la prospettiva dello sviluppo di un futuro processo continuo.

Altre attività di ricerca sono poi state condotte sul processo di purificazione e di metanazione del syngas prodotto dalla gassificazione di biomasse lignocellulosiche, modificandone la composizione mediante assorbimento della CO<sub>2</sub>, prodotta dalla reazione di *water gas shift* (WSG) con specifici sorbenti (idrotalciti) e incrementando le rese di conversione in metano con l'impiego di specifici catalizzatori a base di nichel su precursori Mg/Al in un impianto pilota di biometanazione (BIOSNG) realizzato da ENEA.

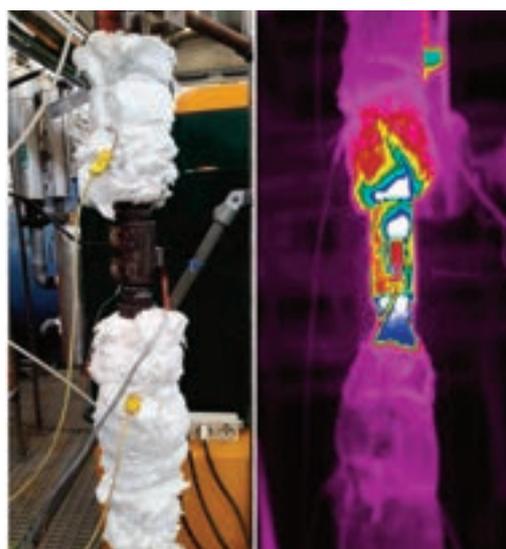
### **Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi e riduzione dell'impatto ambientale**

Sono state prese in esame caldaie a sali fusi ad alta temperatura alimentate con biomassa lignocellulosica per impianti di produzione di energia elettrica e co/trigenerazione di piccola-media taglia basati su cicli termici con vapore d'acqua o con nuovi fluidi operanti a un livello termico superiore a quelli attualmente in uso. In particolare, si è approfondito lo studio di cicli termodinamici innovativi, mediante lo sviluppo di uno strumento di calcolo (COGEGNO)

per l'analisi energetica ed economica di sistemi cogenerativi basati su caldaie a sali fusi, implementato in modo tale da rendere lo strumento liberamente fruibile al pubblico.

Riguardo al fluido termovettore, sono state selezionate una miscela ternaria contenente calcio nitrato (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>/NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub> 42,2/15,3/42,5% in peso) ed una con nitrato di litio (NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> 18/52/30 in percentuale in peso); la miscela con il nitrato di calcio è stata ritenuta la più adatta per il suo basso costo, basso punto di inizio solidificazione, relativa facile reperibilità e minori problemi ambientali. Sono state completate prove di corrosione di lunga durata (8.000 ore) di materiali utilizzabili per la realizzazione delle parti delle caldaie a contatto con tali fluidi, eseguite su provini di acciai ferritici (430) e austenitici (316 L) a contatto con il ternario contenente nitrati di Na/K/Li, a 550 e 590 °C, che hanno evidenziato come l'acciaio austenitico presenti in generale uno strato protettivo più stabile.

È stata studiata la rimozione del particolato fine e degli inquinanti organici dalle emissioni gassose della combustione delle biomasse solide mediante la caratterizzazione e la verifica sperimentale di filtri ceramici porosi per la riduzione delle emissioni inquinanti, con particolare riferimento al particolato. Sono state effettuate prove sperimentali su prototipi in scala di laboratorio di filtri catalitici strutturati tipo "wall-flow", esaminando il loro comportamento a contatto diretto con i fumi di combustione di una caldaia alimentata a pellet di legno. Le attività sperimentali hanno dimostrato una elevata efficienza di abbattimento (> 92%) del particolato ad opera di filtri in carburo di silicio catalizzati con ferrite di rame.



*Particolare della linea di campionamento fumi e relativa immagine con termocamera IR*

Sono state infine avviate, in collaborazione con la Società Sotacarbo SpA, nuove attività di ricerca finalizzate allo sviluppo di tecnologie per la co-gassificazione di biomasse e carbone, utilizzando l'impianto di gassificazione updraft da 5 MWt del Centro di Ricerche Sotacarbo di Carbonia. In particolare, sono state progettate e realizzate una serie di modifiche dell'impianto, tra cui la realizzazione di un sistema di caricamento del combustibile e di pulizia del syngas. Successivamente, è stata effettuata la verifica del funzionamento del gassificatore in continuo e della stabilità del processo mediante l'esecuzione di test di lunga durata, che hanno permesso la definizione dei parametri operativi di co-gassificazione di biomassa e carbone e di pulizia del syngas dai tar. Relativamente a quest'ultimo punto, è stato progettato e realizzato un reattore secondario di reforming catalitico ossidativo, utilizzato per valutare l'efficacia di questo tipo di dispositivi.



*Impianto di gassificazione e pulizia del syngas da tar*

## **COMUNICAZIONE E DIFFUSIONE DEI RISULTATI**

Oltre alla divulgazione dei contenuti e dei risultati delle attività di ricerca, ENEA è impegnata in attività di supporto ai ministeri e di collaborazioni internazionali.

In particolare, ENEA ha partecipato, in rappresentanza dell'Italia, agli Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) sulla Bioenergia (Bioenergy Implementing Agreement <http://www.ieabioenergy.com>), nonché ad alcune iniziative sulle tematiche del presente progetto nell'ambito della European Energy Research Alliance (EERA).

Per il Bioenergy Implementing Agreement (IEA/BA) l'ENEA ha coordinato, insieme al GSE, il contributo delle altre strutture nazionali interessate e partecipato

direttamente alle attività dell'Executive Committee e delle seguenti Task:

- Task 33 - Thermal gasification of biomass (<http://www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=33>), con attività di monitoraggio, analisi e scambio di informazioni su ricerca, sviluppo, dimostrazione e commercializzazione, sulla gassificazione delle biomasse.
- Task 42 - Biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass (<http://www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=42>), che si occupa 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.

ENEA ha curato inoltre la partecipazione nazionale alle attività di EERA (European Energy Research Alliance) sulla Bioenergia (SP5 Stationary Bioenergy), le cui azioni riguardano la cooperazione fra istituti che svolgono attività di ricerca pre-competitiva e l'individuazione di aree di interesse comune per lo sviluppo tecnologico congiunto, allo scopo di accelerare il superamento di barriere tecnologiche e lo sviluppo di nuove soluzioni.

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

*Progetto B.1.1: Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili*

*Referente: V. Pignatelli, [vito.pignatelli@enea.it](mailto:vito.pignatelli@enea.it)*



## Energia elettrica da fonte solare: celle fotovoltaiche innovative

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

L'attività di ricerca ha l'obiettivo di sviluppare celle innovative caratterizzate da prestazioni sensibilmente migliori rispetto a quelle dei prodotti attualmente disponibili in commercio. Il mercato dei moduli fotovoltaici è attualmente dominato da prodotti realizzati con la consolidata tecnologia del silicio cristallino (c-Si).

Sebbene questi dispositivi garantiscano elevata affidabilità nel tempo, le tecnologie di realizzazione siano largamente consolidate ed i volumi di produzione abbiano ridotto drasticamente il costo finale dei prodotti, è necessario introdurre nelle linee di produzione dei concetti innovativi che consentano di ottenere moduli fotovoltaici (FV) con efficienze mediamente ben più elevate di quelle attuali.

In particolare è stata recentemente avanzata l'idea di realizzare celle ad alta efficienza a struttura tandem nelle quali la cella posteriore sia realizzata in silicio cristallino, mentre quella anteriore sia realizzata con un materiale a film sottile ad alta gap potenzialmente adatto alla fabbricazione di dispositivi ad elevata efficienza.

In tal modo è prevista in linea teorica la possibilità di ottenere dispositivi caratterizzati da efficienze ben più alte del 30%, andando oltre la barriera del 33% di efficienza imposta dalla termodinamica ai dispositivi basati su una singola giunzione. Questa idea presuppone lo studio di opportuni materiali semiconduttori e lo sviluppo di celle in c-Si ad alta efficienza.

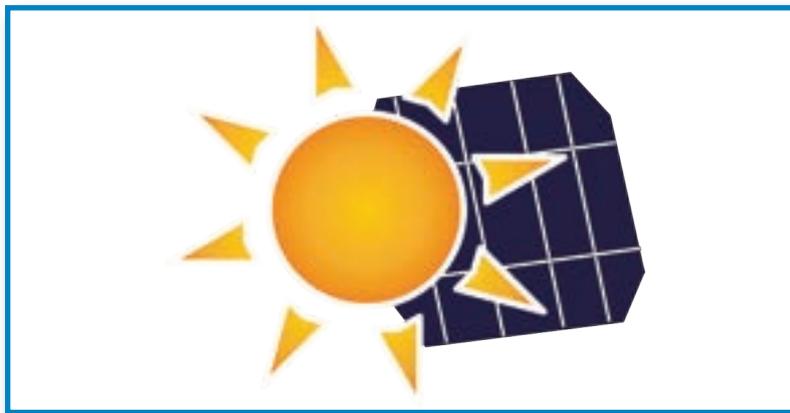
In tal modo è prevista in linea teorica la possibilità di ottenere dispositivi caratterizzati da efficienze ben più alte del 30%, andando oltre la barriera del 33% di efficienza imposta dalla termodinamica ai dispositivi basati su una singola giunzione. Questa idea presuppone lo studio di opportuni materiali semiconduttori e lo sviluppo di celle in c-Si ad alta efficienza.

### OBIETTIVI

Il progetto ha l'obiettivo di promuovere lo sviluppo di materiali e tecnologie innovative ritenute potenzialmente interessanti per la realizzazione di moduli fotovoltaici caratterizzati da alte efficienze di conversione. Lo scopo delle attività è quello di mettere a disposizione del Paese tecnologie fotovoltaiche avanzate che possano contribuire a rendere il sistema produttivo nazionale innovativo e competitivo in questo settore.

L'attività è focalizzata sullo sviluppo di celle a eterogiunzione a-Si/c-Si che possano essere utilizzate sia come dispositivo solare a se stante che come componente posteriore di un dispositivo tandem ad altissima efficienza. Per quanto riguarda i film sottili assorbitori da utilizzare per la componente anteriore della cella, sono indagati film policristallini di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) e film a base di perovskiti, potendo utilizzare quest'ultima classe di materiali anche in configurazione a singola giunzione grazie alle grandi potenzialità mostrate dal materiale.

Nell'ambito delle attività sulle celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili di tipo p, la ricerca è dedicata all'ottimizzazione del contatto frontale e dei film sottili di silicio di tipo intrinseco e drogato utilizzati per realizzare la giunzione. Relativamente allo sviluppo di celle solari a film sottile policristallino di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS), sono esplorate diverse strade per aumentare l'efficienza del dispositivo. In particolare si vuole migliorare la riproducibilità del processo di realizzazione dei film di CZTS, valutare gli effetti del disordine del CZTS



sulle prestazioni del dispositivo e studiare strati buffer alternativi al CdS. Inoltre si intende avviare un'attività di simulazioni numeriche delle celle in CZTS. È previsto, infine, uno studio di materiali per celle solari tandem CZTS/c-Si. In particolare si vuole valutare quali materiali possano essere utilizzati per la costruzione della giunzione tunnel necessaria a connettere le due celle. Le attività sullo sviluppo di celle fotovoltaiche a base di perovskite hanno lo scopo di mettere a punto le tecniche di crescita da soluzione di strati di  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , di definire le architetture più promettenti per il dispositivo e di adottare opportune strategie di intrappolamento della radiazione solare che possano consentire di ridurre al minimo la quantità di materiale utilizzato.

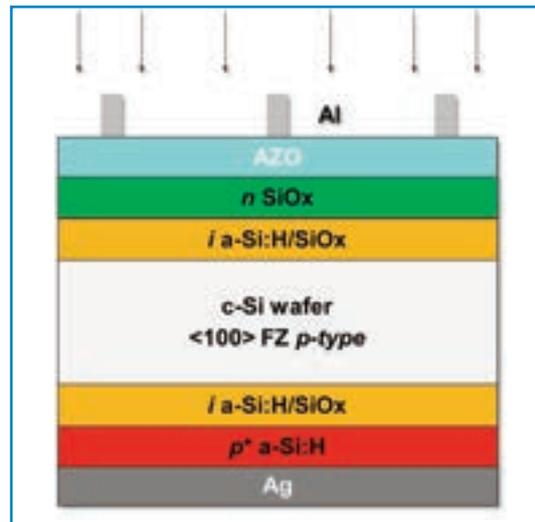
In sintesi gli obiettivi della ricerca sono:

- Sviluppare celle a eterogiunzione a-Si/c-Si;
- Sviluppare materiali e celle a film sottili policristallini a base di CZTS;
- Sviluppare materiali e architetture per celle a fil sottile a base di perovskite.

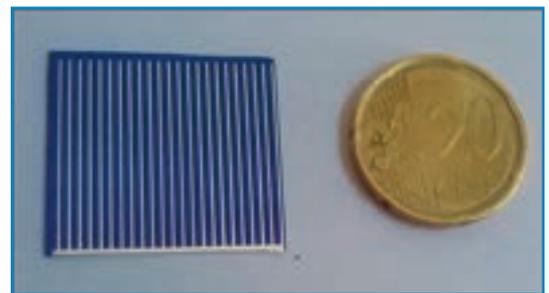
## RISULTATI

### Celle a eterogiunzione a-Si/c-Si

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. È 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



a)



b)

Architettura (a) e immagine (b) del dispositivo di test ad eterogiunzione a-Si/c-Si

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.

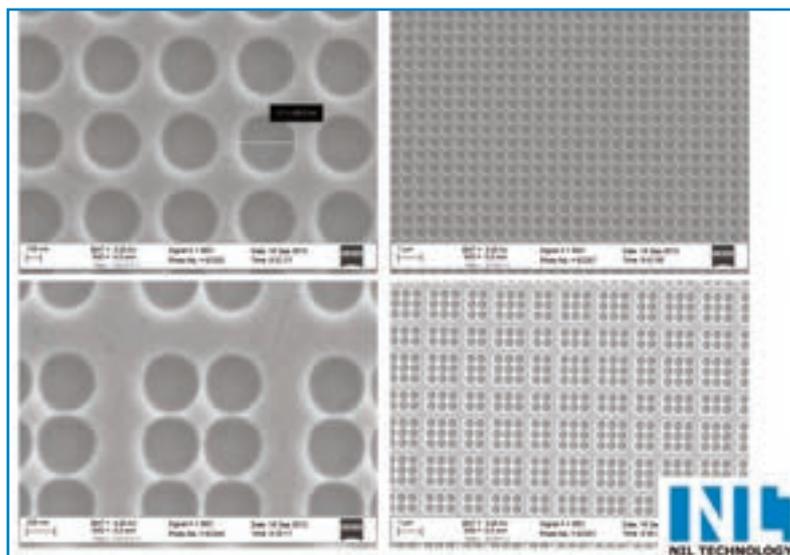
### Celle a film sottili policristallini a base di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)

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). È 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. È 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. È 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. È, 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.



*Nuovo forno di solforizzazione installato presso il Centro ENEA di Casaccia*



*Immagini SEM del master in regioni con pattern periodico (riga superiore) e aperiodico (riga inferiore)*

### **Materiali e architetture di dispositivo per celle solari a film sottile a base di perovskite**

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  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . 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  $\text{TiO}_2$  flat sviluppati in ENEA, ottenendo un'efficienza massima di

conversione pari a 6,5%. È, 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 la realizzazione di substrati con pattern periodico e aperiodico, è stata completata la progettazione di strutture adatte a celle sottili ed è stata commissionata la realizzazione del master strutturato in superficie con le geometrie individuate da progetto ad un'azienda specializzata. È stato validato e messo a punto il processo sperimentale di strutturazione mediante Nano-Imprint Lithography (NIL), che consente di replicare

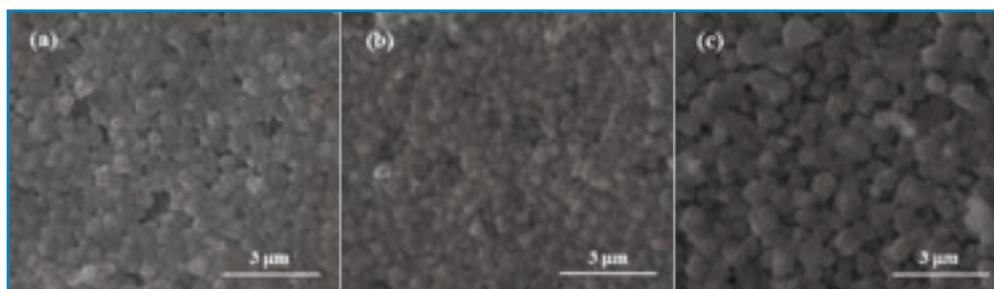
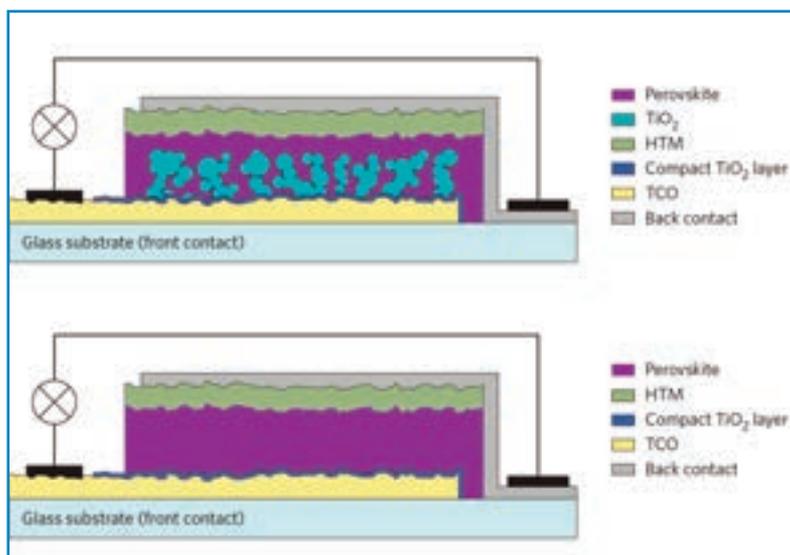
le strutture del master sui substrati, operando su aree di dimensioni idonee per l'applicazione fotovoltaica. Mediante tale tecnica sarà possibile completare la fase di validazione delle strutture progettate.

### Comunicazione e diffusione dei risultati e collaborazioni internazionali

L'ENEA è impegnata nelle attività svolte nel "Photovoltaic Power Systems Programme" della IEA, in qualità di rappresentante Italiano, ed è inserita in un gruppo di lavoro il cui obiettivo principale è quello di favorire la penetrazione del fotovoltaico nelle reti elettriche, tenendo conto delle problematiche tecniche legate all'uso dei generatori FV nelle reti di trasmissione e distribuzione, inclusi i servizi ancillari e di rete da loro richiesti.

L'ENEA ha curato l'organizzazione del workshop "Energia Elettrica da fonte solare" (ENEA-Roma, 27 maggio 2015) e si è impegnata nella divulgazione dell'attività di ricerca attraverso pubblicazioni e presentazioni a conferenze e convegni del settore.

Schema di cella solare a base di perovskite su substrato mesoporoso (in alto) o flat (in basso)



Micrografie SEM di film di  $CH_3NH_3PbI_3$  ottenuti in diverse condizioni

Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente  
 Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare – Celle fotovoltaiche innovative  
 Referente: P. Delli Veneri, [paola.delliveneri@enea.it](mailto:paola.delliveneri@enea.it)



## Energia elettrica da fonte solare: solare termodinamico

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Le attività di ricerca, inquadrare nell'ambito più generale dello sviluppo e diffusione dell'uso delle fonti rinnovabili di energia, si riferiscono alla produzione di energia elettrica da radiazione solare mediante tecnologia a concentrazione ad alta temperatura, sinteticamente denominata "Solare termodinamico". Gli impianti a "Solare termodinamico" utilizzano opportuni sistemi ottici (concentratori) per raccogliere la radiazione solare e inviarla su un componente (ricevitore), dove questa energia, trasformata in calore ad alta temperatura, viene trasferita a un fluido.



Questo calore può essere integrato con altra fonte esterna di energia (ad es. gas o biomassa) per la produzione di energia elettrica o per essere utilizzato a più alta temperatura in processi industriali. La tecnologia disponibile consente anche l'accumulo del calore per un successivo utilizzo.

Secondo la forma dei concentratori, possiamo distinguere tre diverse tipologie di impianti: a disco parabolico, a torre centrale e a collettore lineare parabolico o Fresnel. Allo stato attuale la tecnologia più diffusa è quella dei collettori parabolici lineari. In quest'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 in Sicilia (Priolo Gargallo, Siracusa), da parte di ENEL, dell'impianto da 5 MW "Archimede" integrato con un ciclo combinato a gas.

La ricerca sul solare termodinamico ha come obiettivo principale la riduzione dei costi per rendere questi impianti sempre più competitivi rispetto alla produzione elettrica con i tradizionali combustibili fossili. Questo può essere realizzato sia attraverso il miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi che con la semplificazione impiantistica e il miglioramento delle procedure di gestione e manutenzione.

L'attenzione deve essere posta, oltre che ai grossi impianti di produzione di energia elettrica, anche a sistemi di

piccola e media taglia per la produzione combinata di energia elettrica e termica, eventualmente ibridizzati con un'altra fonte energetica, meglio se rinnovabile.

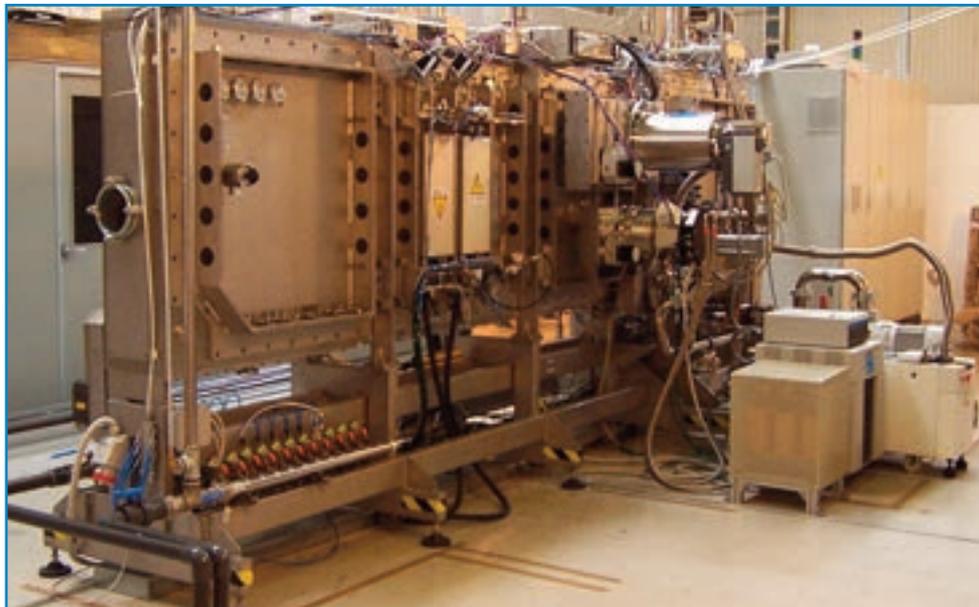
### OBIETTIVI

Gli obiettivi dell'attività riguardano:

- Lo sviluppo di nuovi coating del tubo ricevitore caratterizzati da una migliore efficienza di conversione foto-termica (alta assorbanza solare e bassa emissività termica), utilizzando la tecnologia dei filtri ottici del tipo interferenziali.
- Lo studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di nuove configurazioni impiantistiche alternative a quelle attuali, per individuare quelle più promettenti sia dal punto di vista dell'efficienza e produttività che dei costi di realizzazione e di esercizio. Le analisi mirano a confrontare in particolare l'utilizzo di fluidi termici diversi (miscele binarie/ternarie di sali fusi, fluidi

gassosi e acqua) e tipologie diverse di accumulo termico (a calore sensibile o a cambiamento di fase), in funzione della taglia dell'impianto e delle temperature operative.

- Lo sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti solari termodinamici di piccola e media taglia, in particolare sistemi cogenerativi innovativi che sfruttano l'accoppiamento diretto con il sistema di accumulo termico a sali fusi ad alta temperatura; questi sistemi possono essere utilizzati anche come emergenza in impianti di grossa taglia.



*Impianto prototipale di sputtering multicatodo installato presso il Centro Ricerche ENEA Portici*

## **RISULTATI**

### **Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità**

L'attività di ricerca è stata orientata allo studio e sviluppo di materiali, processi e tecniche di fabbricazione d'innovativi coating solari per tubi ricevitori. Gli obiettivi principali sono stati non solo il miglioramento dei parametri foto-termici del coating solare (incremento dell'assorbanza e diminuzione della emissività), della sua durabilità ed affidabilità ma anche la riduzione dei costi di produzione. Questi obiettivi sono stati perseguiti attraverso l'esplorazione sperimentale di due nuovi approcci tecnologici:

- produzione di filtri ottici a funzionamento esclusivamente interferenziale, in sostituzione di quelli già consolidati del tipo CERMET, mediante tecnica IBAD ovvero altre tecniche energizzanti il processo di deposizione degli strati metallici (co-sputtering);
- produzione di strati di ossidi e nitruri attraverso processi ad alta velocità di deposito, quali quelli cosiddetti METAMODE (Sputtering + Oxidation Glow), in sostituzione dei processi consolidati del tipo sputtering reattivo.

Nell'ambito delle attività assume particolare rilievo la realizzazione in ENEA di un impianto prototipale di sputtering multicatodo per condurre processi di deposizione di tipo IBAD (Ion Beam Assisted Deposition), sul quale sono state effettuate gran parte delle attività sperimentali.

Sono stati sviluppati e messi a punto processi di deposizione speciali per la fabbricazione di film metallici in forma molto sottile (7-9 nm), di argento e molibdeno con proprietà metalliche simili ed in alcuni casi migliori del materiale in forma di film spesso.

Sono stati progettati (mediante simulazione ottica), fabbricati (sull'impianto prototipale di sputtering), e caratterizzati 3 tipologie di filtri solari interferenziali. I risultati ottenuti hanno dimostrato la grande potenzialità dei filtri interferometrici rispetto ai filtri a base di strati CERMET. Questa tecnica inoltre può essere utilizzata anche per la realizzazione di altre tipologie di filtri interferometrici di grande interesse commerciale come ad esempio la realizzazione di vetri basso emissivi per l'edilizia.

### **Studio di sistemi alternativi di accumulo termico**

L'attività di ricerca è stata orientata allo studio, nell'ambito della tecnologia dei collettori parabolici lineari, di nuove soluzioni di accumulo termico, più compatte a calore sensibile e/o latente che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte (es. cementi speciali o materiale ceramico) e/o un materiale a cambiamento di fase (Phase Change Material). L'obiettivo è quello di ridurre i costi e gli ingombri dell'accumulo termico rendendolo particolarmente adatto negli impianti di piccola/media taglia. Il concetto può essere, inoltre, estrapolabile ad impianti solari di grande taglia e con alte temperature, oltre che al settore convenzionale (recupero di calore industriale, condizionamento solare ecc.).

La soluzione con materiali a cambiamento di fase utilizza materiali a basso costo ed alta densità di energia, è però condizionata dalla loro ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica). L'attività di ricerca, condotta in stretta collaborazione con l'Università di Perugia, ha evidenziato come sia possibile incrementare alcune caratteristiche dei PCM base come la capacità termica (20-50%) che la conducibilità termica (15-20%) miscelando con una piccola quantità di nanoparticelle (1-2%wt) di opportuno tipo e dimensioni. È stato utilizzato come PCM di base una miscela di nitrato di sodio e potassio (sali solari,  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ , 54-46wt%), a cui viene aggiunto l'1%wt di nanoparticelle di silica ed allumina. Sono state sperimentate altri tipi di nanoparticelle (placchette di grafene e nanotubi di carbonio), l'utilizzo di nanotubi di carbonio sembra attualmente essere quello che permette di avere le migliori prestazioni.). Oltre alle fasi di caratterizzazione del nanofluido-PCM è stata posta particolare attenzione ai metodi di miscelamento utilizzati, da cui dipende anche l'entità degli incrementi delle caratteristiche del mezzo, in modo da selezionare quelli che potessero essere utilizzati in un processo di produzione "industriale". Sono stati realizzati moduli elementari di accumulo che sono stati sottoposti a sperimentazione nell'impianto ATES.

L'utilizzo del calcestruzzo come mezzo di accumulo termico è nato dall'esperienza che l'ENEA ha maturato negli anni in attività di ricerca sul comportamento strutturale del calcestruzzo sottoposto ad elevate temperature in condizioni incidentali sia in ambito nucleare che civile. La scelta di questo materiale per l'accumulo termico nasce inoltre 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. In collaborazione con l'Università di Trento è stata sviluppata una innovativa miscela di calcestruzzo con caratteristiche adatte all'utilizzo come mezzo di accumulo termico, utilizzando materiali di riciclo per abbattere i costi. Si sono utilizzate cariche metalliche, consistenti in trucioli metallici provenienti da scarti di officina meccanica e fibre di poliammide (Nylon 66), dallo smaltimento dei rifiuti dell'industria delle moquette. In particolare l'utilizzo delle cariche metalliche ha determinato non solo gli attesi incrementi di



*Impianto ATES per il test di elementi di accumulo a calore latente*



*Moduli di accumulo termico in calcestruzzo*

conducibilità termica (fino a valori di  $2,74 \text{ W/m K}$ ) e capacità termica ( $0,80 \text{ J/g K}$ ), ma anche il miglioramento delle proprietà meccaniche ed in particolare del modulo elastico. L'utilizzo delle fibre di nylon ha invece confermato l'effetto di limitare il ritiro igrometrico nella fase post-produzione e di eliminare lo spalling ad alta temperatura.

Sono stati realizzati dei moduli elementari di accumulo per testare sperimentalmente le prestazioni sia termiche che meccaniche durante ripetuti cicli di riscaldamento/raffreddamento per simulare il caricamento e lo scaricamento di un sistema di accumulo termico inserito in un impianto solare a concentrazione. A seguito dei positivi risultati ottenuti, è stata effettuata una ulteriore campagna sperimentale su moduli di accumulo di maggiori dimensioni portando il grado di complessità più vicino ad un prototipo industriale. A questo scopo è

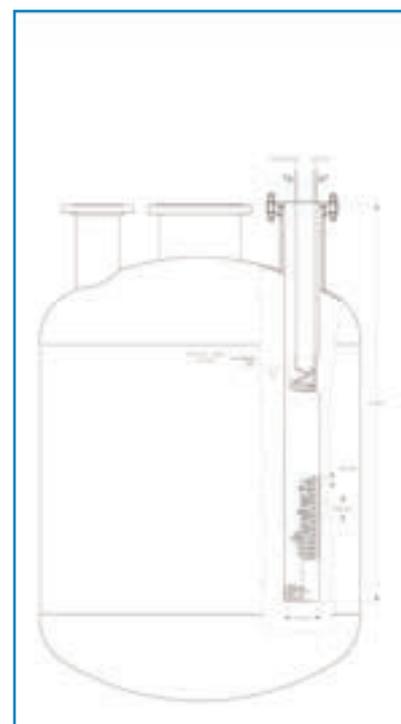
stato realizzato un nuovo impianto sperimentale per il test dei nuovi moduli di accumulo con temperature fino a 300 °C.

### **Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia**

Le attività riguardano, nel caso di applicazioni del solare termodinamico a impianti cogenerativi di piccola taglia (<1 MWe), lo studio e la progettazione di sistemi per generazione di energia elettrica di piccole dimensioni basati sull'esclusivo uso di energia termica da prelevare dal sistema di accumulo. Per le analisi sperimentali è stato utilizzato come sistema di accumulo il serbatoio a sali fusi dell'impianto PCS (Prova Collettori Solari) dell'ENEA. È stata effettuata la progettazione preliminare di un impianto cogenerativo con microturbina a vapore da 1,5 kWe. È stato progettato e realizzato un generatore di vapore di nuova concezione del tipo "once through", facilmente integrabile nel serbatoio di accumulo a sali fusi, e caratterizzato da bassi costi di realizzazione ed elevata affidabilità di esercizio. Verrà completata l'installazione dell'impianto cogenerativo con l'effettuazione delle prove sperimentali di caratterizzazione.



*Impianto per il test di elementi di accumulo in calcestruzzo*



*Serbatoio di accumulo con generatore di vapore*



*Dettaglio dello scambiatore di calore*

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente  
Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare – Solare termodinamico  
Referente: : D. Mazzei, domenico.mazzei@enea.it*



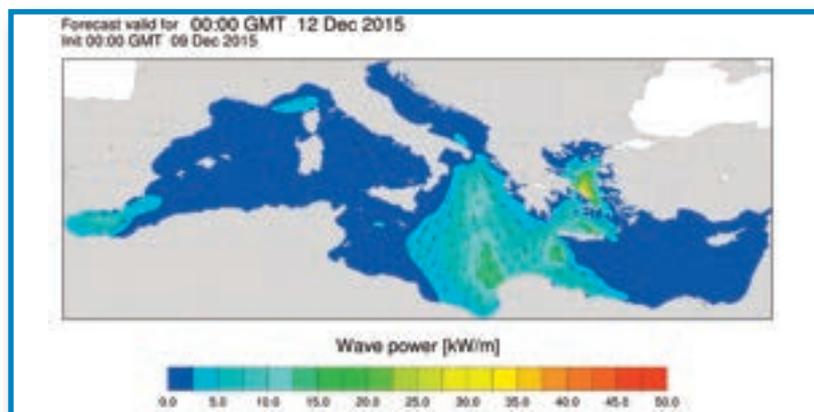
## Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Come dimostrato di recente dagli studi ENEA condotti nell'ambito dei precedenti PAR, i mari italiani possiedono un'importante 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.



### OBIETTIVI

Nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2014, Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", Progetto B.1.4 "Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso",

sono state svolte attività di ricerca e sviluppo rivolte da una parte alla qualificazione della risorsa marina e dell'ambiente e dall'altra allo sviluppo e sperimentazione di dispositivi di conversione del moto ondoso; di seguito sono riportati i principali risultati ottenuti.

### RISULTATI

#### Analisi climatologica delle componenti del moto ondoso e previsioni operative

La progettazione di impianti di conversione di energia ondosa richiede una informazione dettagliata sulle caratteristiche delle onde incidenti, in termini di frequenza e direzione di propagazione. L'attività svolta è stata indirizzata da una parte alla previsione operativa dell'energia ondosa e dall'altra ad una descrizione climatologica dettagliata della risorsa. In generale le onde in una data località sono determinate dalla combinazione di onde generate localmente dal vento e di onde che si sono propagate da regioni

lontane. La tecnica del *partizionamento* è stata utilizzata per ricavare climatologie separate per i due tipi di onda, relativamente a 20 punti distribuiti lungo la costa mediterranea, per i quali erano stati memorizzati nel corso delle precedenti annualità gli spettri bidimensionali di energia.

Vengono giornalmente messe a disposizione sul sito web dell'ENEA le previsioni dell'energia dal moto ondoso prodotte da un sistema operativo relativo all'intero Mediterraneo e, a più alta risoluzione, su alcuni sottobacini dei mari italiani. Il sistema è stato implementato con l'aggiunta di un ulteriore zoom relativo all'area dello stretto di Messina per fornire supporto alle attività sperimentali in mare effettuate in collaborazione con il Laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. È stata inoltre effettuata una validazione dei risultati prodotti dal sistema, tramite il confronto con dati da satellite e dati misurati dalle boe distribuite lungo la costa italiana.

### Attività di mappatura degli ecosistemi costieri

Nel Mediterraneo, le praterie di *Posidonia oceanica*, 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. È stata messa a punto una metodologia innovativa per monitorare a scale spazio-temporali adeguate, l'ecosistema costiero, in particolare la *Posidonia oceanica*, utilizzando un approccio basato sulle tecniche di telerilevamento 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 il sistema ISWEC per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso a



*Esempio di previsione dell'energia da moto ondoso relativo al sottobacino nello stretto di Messina*



*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*

basso impatto ambientale.

### Attività relativa a dispositivi a colonna d'acqua oscillante

Nel corso delle annualità precedenti è stato installato un convertitore di tipo *near-shore* OWC (*Oscillating Water Column*) presso il laboratorio NOEL dell'Università di Reggio Calabria. Il dispositivo in

scala 1:8 è del tipo REWEC3 a geometria variabile (REWEC3-GV). Nel corso del progetto attuale sono state effettuate analisi delle prestazioni del prototipo sia attraverso esperimenti condotti in mare, presso il laboratorio NOEL, che esperimenti numerici condotti con due diversi modelli CFD.

E' 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, identificato con l'acronimo ICD-DEG (inflatable circular diaphragm dielectric elastomer generator), 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. Scopo del lavoro è stato quello di verificare la fattibilità preliminare dell'installazione di un PTO a diaframma circolare di questo tipo sull'impianto pilota REWEC di Reggio Calabria in sostituzione delle classiche turbine *Wells*.

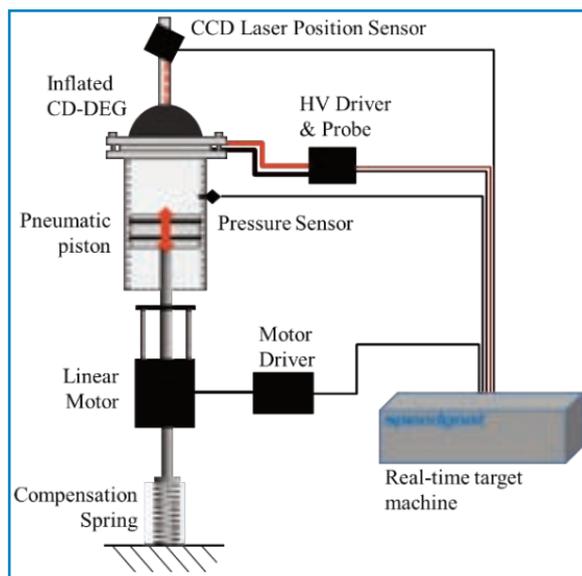
**Prove sperimentali su prototipo in scala di convertitore di tipo point absorber**

L'attività è stata dedicata alla progettazione e verifica di funzionamento, attraverso test sperimentali condotti presso la vasca navale di Roma (appartenente al CNR-INSEAN), del prototipo PEWEC (Pendulum Wave Energy Converter), già costruito in scala 1:45 nel corso della precedente annualità.

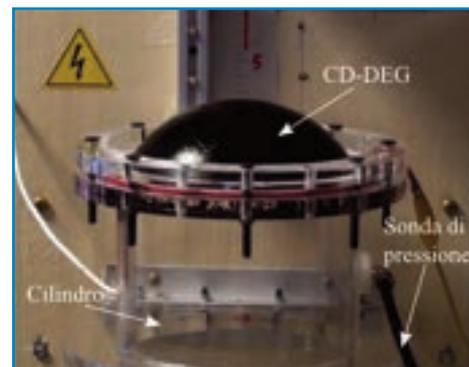
Seguendo il protocollo europeo EQUIMAR, che stabilisce i criteri da seguire durante la fase di progettazione dei convertitori dell'energia marina da semplici concept fino alla fase di prototipo in scala 1:1, nel corso del presente progetto è stato inoltre progettato e costruito il prototipo PEWEC in scala 1:12.



*Diga in cemento armato, presso il NOEL di Reggio Calabria, con i due cassoni REWEC3*



a)



b)

*Schema del setup sperimentale (a); foto del prototipo di CD-DEG e della camera pneumatica su cui è alloggiato (b)*



*Foto del prototipo del PEWEC in assetto di prova*

## Aspetti operativi di coordinamento con RSE e CNR

Il CNR non svolge attività sul presente tema nell'ambito nazionale della Ricerca di Sistema Elettrico. Non esiste quindi un coordinamento ufficiale tra ENEA e CNR su questo tema. Tuttavia l'INSEAN, l'Istituto di ricerca nel settore dell'ingegneria navale e marittima, afferente al Dipartimento Energia e Trasporti del CNR, è dotato di una vasca navale che viene utilizzata anche per testare prototipi di convertitori. Nel corso del progetto la vasca navale è stata utilizzata per testare il prototipo PEWEC a fronte di un regolare contratto di servizio stipulato tra ENEA e CNR-INSEAN. ENEA e CNR partecipano congiuntamente all'iniziativa europea EERA-Ocean Energy (European Energy Research Alliance). Maggiore interazione e coordinamento si sono stabiliti invece tra ENEA e RSE. Al fine di garantire la massima sinergia e la migliore distribuzione delle risorse, ENEA e RSE hanno operato in maniera coordinata già nel corso delle precedenti annualità al fine di assicurare lo scambio di informazioni e dati. Nello specifico ENEA ha messo a disposizione di RSE i dati prodotti dai modelli di onde relativi alla climatologia e la previsione dell'energia associata al moto ondoso nel Mediterraneo. RSE ed ENEA hanno inoltre operato in modo coordinato alla creazione della prima newsletter a diffusione nazionale sul tema dell'energia dal mare. Per quanto riguarda lo sviluppo di prototipi per la conversione del moto ondoso in energia elettrica si è concordato di seguire lo sviluppo di più tecnologie in maniera complementare. Questa scelta ha come scopo ultimo quello di individuare le tecnologie promettenti nel più breve tempo possibile.

## 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.
- 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.
- Progettazione e realizzazione del Geoportale "Waves Energy" che 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), WebGIS-DSS "Waves Energy" (Applicazione con autenticazione richiesta) e Catalogo dei servizi OCG (Accesso diretto ai layer tematici mediante servizi GIS).
- Pubblicazione online, lo scorso settembre 2015, dell'edizione speciale della rivista *Energia, Ambiente e Innovazione* sul tema dell'energia dal mare. Il periodico 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 intitolato *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.

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

*Progetto B.1.5: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso*

*Referente: G. Sannino, gianmaria.sannino@enea.it*



## Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

La sfida per un sistema energetico globale ambientalmente sostenibile, economicamente competitivo ed in grado di garantire la sicurezza negli approvvigionamenti energetici, si affronta investendo in innovazione tecnologica e incoraggiando la collaborazione tra ricerca scientifica/tecnologica e industria. Accelerare la transizione

verso un sistema energetico de-carbonizzato implica investire in efficienza energetica, utilizzare massicciamente le fonti rinnovabili, incentivare l'adozione di tecnologie CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) per il contenimento

delle emissioni di CO<sub>2</sub>, sviluppare nuovi combustibili, affrontare i problemi di stabilità della rete elettrica sorti con l'integrazione di impianti basati sulle rinnovabili con impianti a combustibili fossili.

Il governo italiano, con il documento di Strategia Energetica Nazionale, ha definito una serie di azioni, in coerenza con la Roadmap 2050 di de-carbonizzazione europea. Una di queste riguarda lo sviluppo delle tecnologie di cattura, confinamento e riuso della CO<sub>2</sub>, dato il ruolo ancora dominante che i combustibili fossili hanno nella produzione di energia elettrica e nell'industria di processo. Le tecnologie finora utilizzate consentono ancora una larga applicazione in ragione del costo di investimento per tonnellata di CO<sub>2</sub> evitata, ancora elevato; per questo sono necessarie attività di R&S. Peraltro, l'uso crescente delle rinnovabili, alcune delle quali (fotovoltaico, eolico) intrinsecamente non programmabili, sta cambiando lo scenario di riferimento della generazione di energia elettrica, introducendo il tema della flessibilità di esercizio per gli impianti di generazione programmabili, necessaria a compensare le fluttuazioni di po-

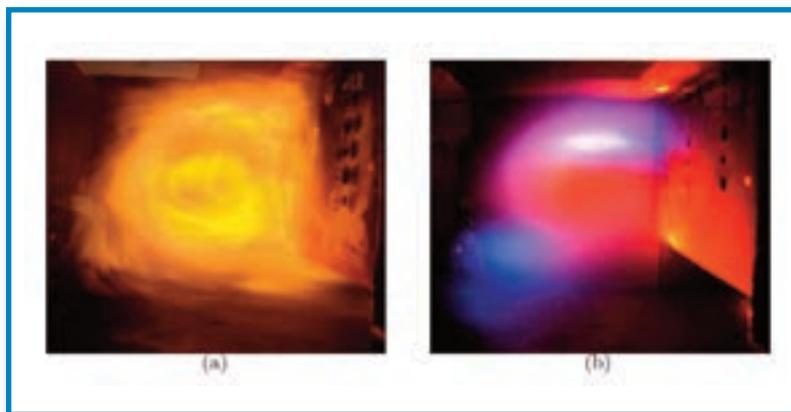
tenza associate alle rinnovabili non programmabili. Scopo del Progetto è quello di sviluppare, validare sperimentalmente e dimostrare, anche attraverso impianti di scala significativa, una serie di tecnologie innovative per l'impiego sostenibile di combustibili fossili, sia per la produzione di energia elettrica sia di

combustibili. In particolare le attività di ricerca sono finalizzate allo sviluppo di tecnologie impiantistiche più efficienti e maggiormente abilitanti all'applicazione di tecnologie CCUS, allo sviluppo di tecniche di cattura, stoccaggio e riutilizzo della CO<sub>2</sub>.

Tali sviluppi tecnologici, principalmente indirizzati verso il settore termoelettrico, sono tuttavia trasportabili nell'industria di processo altamente energivora (industria cementiera, petrolchimica, siderurgica, industria del vetro ecc.).

### OBIETTIVI

Il Progetto intende favorire l'uso sostenibile di combustibili fossili mediante la rimozione della CO<sub>2</sub> (de-carbonizzazione del combustibile o dei fumi), definire interventi per l'efficientamento dei cicli e della combustione che riducano significativamente le emissioni e massimizzino la flessibilità di esercizio e di combustibile, sviluppare soluzioni per lo storage della CO<sub>2</sub> e tecniche alternative ad esso che prevedano il suo riutilizzo, sviluppare tecnologie di compressione orientate al trasporto.



al centro: Bruciatore Trapped Vortex ENEA: (a) fiamma in condizioni di miscela grassa, fiamma instabile; (b) fiamma in condizioni di miscela magra, fiamma stabile

Il prodotto finale delle attività è un ventaglio di tecnologie (dimostrabili in laboratorio o su impianti pilota), metodi e studi, che riguardano nel dettaglio:

- la cattura di CO<sub>2</sub> mediante sorbenti, membrane e solventi e la loro rigenerazione per applicazioni nel settore termoelettrico e nell'industria di processo altamente energivora;
- sistemi alternativi allo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, come il suo utilizzo per la produzione di materiali ('mineral carbonation') e chemicals, facilmente trasferibili anche all'industria di processo (es. industria siderurgica e del cemento);
- la produzione di combustibili alternativi (gas sintetico) e 'chemicals' da carbone o CO<sub>2</sub>;
- bruciatori per turbo-gas efficienti, scarsamente inquinanti, caratterizzati da alta flessibilità di carico e di combustibile di alimentazione, per combustione di tipo tradizionale (in aria) e "oxy";
- cicli turbogas EGR (Exhaust Gas Recirculation) in grado di accoppiare la flessibilità di esercizio tipica delle turbine a gas, con l'implementazione efficace delle tecnologie CCUS, accoppiabili con cicli chiusi a S-CO<sub>2</sub> per lo sviluppo di cicli combinati più 'puliti', flessibili ed efficienti; ossi-combustione di gas in CO<sub>2</sub> supercritica, per lo sviluppo di impianti di potenza intrinsecamente predisposti per una facile cattura della CO<sub>2</sub>;
- tecnologie per la compressione e il trasporto della CO<sub>2</sub> proveniente da processi di cattura;
- ottimizzazione dei processi di ossi-combustione pressurizzata di carbone;
- caratterizzazione del bacino del Sulcis come potenziale sito per esperimenti di stoccaggio di CO<sub>2</sub>;
- sviluppo, presso il bacino minerario del Sulcis, di strutture sperimentali per un centro di eccellenza, di valenza internazionale, sulle tecnologie del confinamento geologico della CO<sub>2</sub> e più in generale dell'uso sostenibile dei combustibili fossili.



*Impianto dimostrativo di gassificazione Sotacarbo da 5 MWt*

ENEA), per sviluppo e sperimentazione di gassificazione e co-gassificazione di carboni e biomasse, nonché per sperimentazione di catalizzatori e configurazioni multi-reattore per la produzione, a partire da miscele costituite da syngas e idrogeno, di gas naturale sintetico (SNG) ad elevata concentrazione di metano. Sviluppo di modellistica per l'analisi tecnica ed economica del processo di produzione di SNG integrato con sistemi CCUS. Sviluppo, caratterizzazione e prova di nuovi catalizzatori.

- Sviluppo di un sistema di abbattimento del tar contenuto nel syngas mediante cracking autotermico e catalitico.
- Acquisizione di know-how e sviluppo di tecnologie per la gassificazione e la cattura della CO<sub>2</sub>, mediante l'impiego di solventi liquidi a base di ammine, in condizioni di pre- e post-combustione presso l'impianto pilota Sotacarbo. Effettuazione di centinaia di ore di sperimentazione volte a valutare l'efficienza del processo di gassificazione, il grado di conversione e la reattività di combustibili di diverse tipologie di carboni e biomasse. Esecuzione di centinaia di ore di test di assorbimento e rigenerazione in continuo con la finalità di aumentare le efficienze e ridurre i costi del processo.
- Definizione di correlazioni tra la densità, pH e il "caricamento" della CO<sub>2</sub> nelle ammine, utili al controllo ed alla valutazione on line del grado di saturazione del solvente.
- Modifiche e avviamento dell'impianto dimostrativo di gassificazione Sotacarbo da 5 MW, ed esecuzione delle prime campagne sperimentali di co-gassificazione (carbone e biomassa).
- Realizzazione di un modello cinetico della pirolisi

## **RISULTATI**

### **Tecnologie di gassificazione, cleanup e trattamento del syngas prodotto fino alla produzione di gas naturale sintetico e cattura della CO<sub>2</sub>**

- Realizzazione dell'impianto GESSYCA (GEnere Sperimentale di SYngas da Carbone -

e ossido-riduzione dei gas di coda provenienti dalla rigenerazione dei solventi utilizzati per la desolfurazione per la produzione di gas di sintesi, e realizzazione di un modello statico/dinamico dei sistemi di cattura post-combustione della CO<sub>2</sub> basati su ammine.

### **Tecnologie di cattura in pre- e post-combustione, con sorbenti solidi naturali e sintetici, basate sul principio del Calcium Looping**

- Upgrade di due importanti facility sperimentali:
  - Piattaforma multifunzionale ZECOMIX - ENEA per l'integrazione dei processi di gassificazione in letto fluido bollente, la decarbonizzazione del syngas prodotto, ricco di idrogeno, tramite sorbenti solidi e la successiva produzione di energia elettrica attraverso una microturbina modificata per elaborare il syngas;
  - Impianto VALCHIRIA - ENEA per studi e messa a punto di tecnologie volte all'inertizzazione e valorizzazione di scorie di acciaierie e la contemporanea cattura della CO<sub>2</sub>.
- Sviluppo di un sorbente solido sintetico, a base di ossido di calcio, in grado di consentire oltre 1000 cicli di cattura-rigenerazione senza apprezzabile decadimento delle sue prestazioni in termini di cattura della CO<sub>2</sub>.
- Messa a punto di un processo di pre-trattamento termico di un sorbente naturale (ossido di calcio) al fine di aumentarne la stabilità in fase di cattura e successiva rigenerazione, e consentire, fatta salva la non pericolosità per l'uomo e per l'ambiente, un drastico abbattimento dei costi di cattura.
- Messa a punto e verifica sperimentale, sulla Piattaforma ZECOMIX - ENEA, di un processo innovativo per la produzione, ad alta temperatura, di un gas ad alto contenuto di idrogeno a partire da CO e vapore. Tale processo consente di realizzare la reazione di CO-shift con simultanea rimozione della CO<sub>2</sub>, in assenza di catalizzatori.

### **Tecnologia di cattura a ossi-combustione**

- Caratterizzazione di miscele di acqua e carbone (water coal slurry) e stima della composizione dei fumi di combustione provenienti da un reattore di ossi-combustione. Valutazione comparativa di



*Infrastruttura di ricerca ZECOMIX (Zero Emission of CarbOn with Mixed Technology)*

differenti soluzioni tecnologiche per la produzione di coal water slurry e individuazione delle BAT.

- Progetto e realizzazione di un impianto pilota per la desolfurazione dei fumi di combustione provenienti da un ossi-combustore flameless con produzione di acido solforico di qualità commerciale.

### **Bruciatori per turbogas caratterizzati da ampia load- e fuel-flexibility**

- Sviluppo di una filiera di bruciatori innovativi per turbine a gas, basati sul principio della combustione Trapped Vortex/MILD, caratterizzati da alta efficienza, alta stabilità e ampia flessibilità di carico e di combustibile.

### **Sviluppo di cicli turbogas a CO<sub>2</sub>**

- Realizzazione di una facility sperimentale (Piattaforma AGATUR – ENEA) per lo sviluppo di cicli turbogas EGR (Exhausts Gas Recirculation) e di cicli a ossi-combustione di gas in atmosfera di CO<sub>2</sub>
- Sviluppo di un ciclo termodinamico Bryton avanzato, basato sull'uso di CO<sub>2</sub> supercritica (S-CO<sub>2</sub>), che possa rappresentare una risposta efficiente e sostenibile alla crescente richiesta di load flexibility proveniente dalla rete, e porti alla realizzazione di impianti con intrinseca cattura "pipeline ready" utilmente integrabili con le rinnovabili" e potenzialmente impiegabile per

l'estrazione "water free" dello shale gas in maniera sostenibile.

### Utilizzo della CO<sub>2</sub> per produzione di combustibili

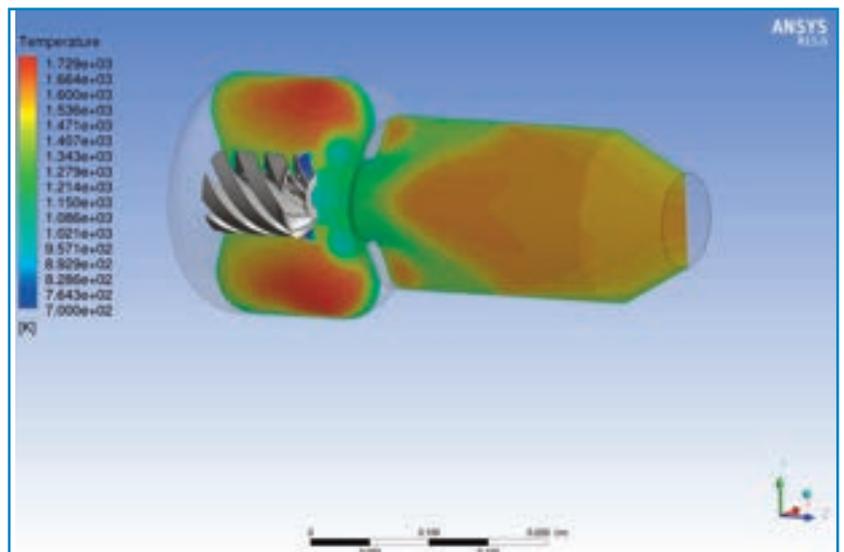
- Acquisizione del know-how relativo alla produzione di metano da CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, integrato con rinnovabili in applicazioni "Power to Gas", e realizzazione di un dimostrativo del processo denominato impianto FENICE - ENEA.



Piattaforma sperimentale AGATUR

### Storage della CO<sub>2</sub>

- Analisi geostrutturale dell'area del bacino del Sulcis. Studio in superficie e in sottosuolo della fratturazione delle formazioni del possibile reservoir per lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>.
- Linee guida e caratterizzazione geochemica dell'area del bacino minerario del Sulcis mediante una rete fissa e mobile di monitoraggio geochemico.
- Studio della sismicità naturale dell'area del Sulcis. Determinazione della sismicità di fondo dell'area interna al permesso di ricerca Sotacarbo tramite una rete sismica appositamente progettata e realizzata.



Mapa di temperatura in un bruciatore premiscelato

### Strumenti di impiego orizzontale

Tra i prodotti di impiego orizzontale, si segnala lo sviluppo di modelli di simulazione avanzati per la descrizione di fenomeni di combustione, lo studio delle fenomenologie di instabilità termoacustiche, nonché lo sviluppo di diagnostica avanzata, di tipo non invasivo (ottica) per misure fluidodinamiche, termiche, chimiche e di stabilità per sistemi reattivi.

### Divulgazione

Oltre ai previsti report tecnici, a numerosi articoli su riviste internazionali e memorie a congressi nazionali e internazionali, sono stati organizzati meeting internazionali e un workshop sui risultati della

Ricerca di Sistema Elettrico. È stata inoltre organizzata l'edizione 2015 della scuola estiva sulle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub> "Sulcis CCS Summer School" rivolta a studenti, dottorandi e giovani laureati in ingegneria e materie geotecnologiche e socio-economiche con la partecipazione di relatori e docenti provenienti da ENEA, Sotacarbo e da Università ed Enti di ricerca nazionali e internazionali, nonché avviato un progetto di divulgazione presso le scuole dell'area del Sulcis.

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

*Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili*

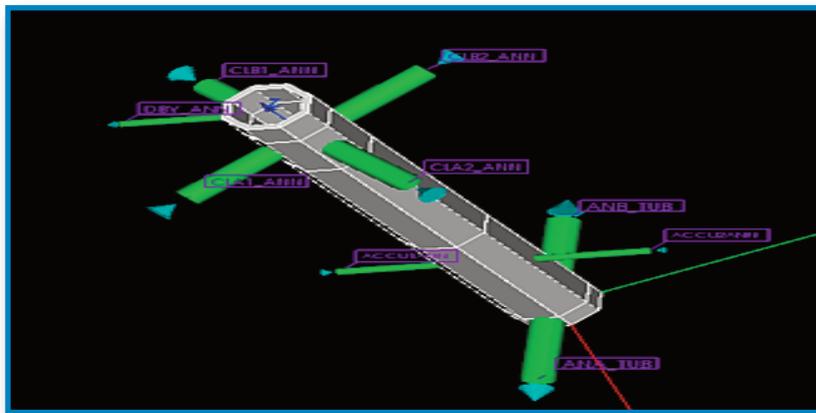
*Referente: S. Giammartini, stefano.giammartini@enea.it*



## Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

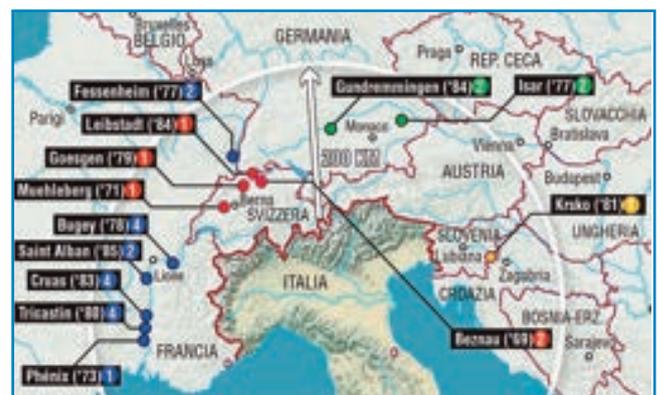
Anche in questa terza annualità dell'Accordo di Programma triennale 2012-2014, stipulato tra Il Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) e l'ENEA, le attività di ricerca sono state finalizzate alla necessità di dotare il nostro Paese di capacità indipendenti e qualitativamente elevate allo scopo di rivalutare i margini di sicurezza degli impianti in esercizio o in costruzione e di procedere a un rinnovato impegno sui temi della ricerca, della riduzione e messa in sicurezza dei rifiuti, della cooperazione internazionale per l'impiego sicuro del



nucleare negli usi civili. Il programma triennale 2012-2014 è stato modulato sulle esigenze del Paese a seguito dell'incidente di Fukushima e del successivo referendum, veicolando le attività di R&S al mantenimento e, dove possibile, all'ulteriore sviluppo di un sistema di competenze scientifiche in grado di assicurare elevata capacità di giudizio indipendente e qualificato nei campi della sicurezza, security e sostenibilità nel campo della fissione nucleare. La conoscenza delle problematiche e degli specifici aspetti di sicurezza, security e sostenibilità del ciclo del combustibile, legati al nucleare da fissione, coinvolge tutti i Paesi a prescindere dalla presenza, nel proprio territorio, di centrali elettroneucleari in esercizio. Il problema diventa particolarmente importante per l'Italia che, entro il limite di 200 km dai confini nazionali, registra la presenza di 13 siti con 27 reattori nucleari di tipo PWR e BWR dislocati in Francia, Svizzera, Germania e Slovenia/Croazia (loro confine). La necessità di approfondire la situazione si giustifica ulteriormente dal fatto che 19 delle 27 centrali sono

caricate a MOx (Ossidi misti di Uranio e Plutonio), una configurazione che richiede ulteriore attenzione ai fini della valutazione del termine sorgente in condizioni incidentali severe per alcuni scenari di particolare interesse. Si ricorda che la Commissione Europea ha stabilito che ciascuna nazione debba effettuare una valutazione indipendente dello stato di sicurezza delle centrali nucleari che reputa di stretto interesse in riferimento al proprio territorio e, in generale, di tutte le centrali nucleari con le diverse tipologie di reattori. È perciò

necessario conservare e rafforzare le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca nel settore nucleare sviluppando, come già sottolineato, una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche dal punto di vista della sicurezza, security e sostenibilità.



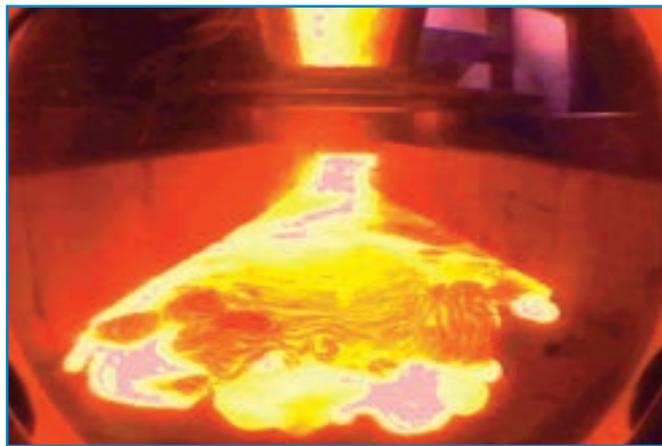
Localizzazione per Paese, indicazione dei nomi delle centrali e del numero di reattori nucleari presenti entro il limite di 200 km dai confini nazionali

## OBIETTIVI

Si conferma che anche per questa annualità del piano triennale 2012-2014 la linea guida del progetto è quella di contribuire a mantenere e, nel limite del possibile, ampliare le competenze tecniche e scientifiche necessarie agli studi sulla sicurezza dei reattori e sviluppare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche, in particolare dal punto di vista della sicurezza, security e sostenibilità, anche grazie al mantenimento di accordi bilaterali con grandi istituzioni di ricerca quali il CEA e l'IRSN francesi, i laboratori del DOE americano, la stessa USNRC ecc. In tal modo l'Italia partecipa a pieno titolo alle grandi iniziative di R&S internazionali/europee sul nuovo nucleare (GIF, INPRO, IFNEC, SNETP, ESNII, EERA, programmi EURATOM ecc.).

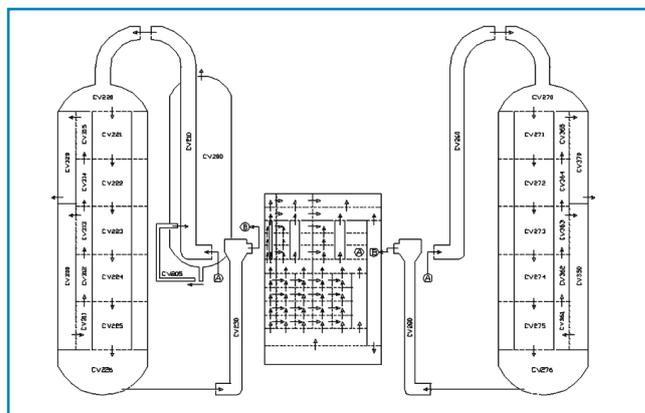
Gli obiettivi proposti sono stati sviluppati su tre direttrici principali. La prima riguarda l'acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro corretto utilizzo. Questi strumenti, in gran parte oggetto di accordi di collaborazione con gli enti francesi CEA e IRSN, e l'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 anche 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.

Il secondo obiettivo ha riguardato 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 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



Contenitore di tipo anulare per il contenimento del PCM

della centrale di Fukushima Dai-ichi, anche attraverso invio sul posto di un ricercatore per la miglior raccolta di 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.



Modellazioni del reattore PWR-900 di TMI-2 con l'uso dei codici ASTEC e MELCOR



## **RISULTATI**

Con i risultati degli studi e delle ricerche condotte nel progetto, conseguiti sfruttando il background internazionale acquisito e i risultati delle attività già svolte nei piani annuali precedenti, è stato possibile aumentare ulteriormente le conoscenze di base e arricchire l'esperienza precedentemente maturata. Si è sempre fatto riferimento all'acquisizione degli strumenti, delle metodologie e delle tecnologie più avanzate per operare stime indipendenti circa la sicurezza, sostenibilità e affidabilità delle concezioni innovative oltre che delle installazioni nucleari attuali.

I risultati conseguiti negli studi hanno permesso di procedere alla 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 alla validazione delle librerie aggiornate di dati di decadimento radioattivo del sistema ANITA-2000 su dati sperimentali prodotti da FNS-JAERI.

Per quanto riguarda l'analisi di sicurezza nocciolo, si è proceduto alla progettazione di strumentazione per il monitoraggio del livello di degradazione di un nocciolo di PWR durante un incidente severo e a valutazioni, con codici deterministici, dei fenomeni di tilt azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di sicurezza del nocciolo. In continuità con il lavoro svolto nelle precedenti annualità, 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. Grazie alle attività svolte nel PAR, 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).

Altre ricerche di rilievo sono state svolte nella valutazione delle conseguenze incidentali, attraverso l'analisi e le valutazioni di sicurezza per reattori BWR e PWR di centrali prossime ai confini nazionali, analisi della risposta di modelli di dispersione e diffusione di contaminanti rilasciati in atmosfera, implementazione della banca dati per valutazioni di sicurezza e supporto alla Emergency Preparedness e applicazione di metodologia PSA e DSA del tipo "Risk-Informed" per la stima del rischio di eventi esterni. Di altrettanta elevata qualità è risultato il lavoro svolto per la sperimentazione e il calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza. Si è proceduto alla validazione e verifica di codici termoidraulici e relativi modelli sui test SPES2 e alla sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi, quali lo sviluppo e la qualificazione della strumentazione per i deflussi bifase, la valutazione di sistemi passivi per la rimozione del calore di decadimento in reattori SMR e la sperimentazione a supporto della caratterizzazione di scambiatori con tubi a baionetta.

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

*Progetto B.3.1 – L.P.1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare*

*Referente: Felice De Rosa, felice.derosa@enea.it*



## Collaborazione ai Programmi Internazionali per il Nucleare di IV Generazione

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

A seguito dell'incidente di Fukushima del 2011 e del referendum abrogativo su costruzione ed esercizio di centrali elettronucleari in Italia, sono state abbandonate le attività di ricerca per lo sviluppo di reattori nucleari fino alla generazione III+.

La ricerca è stata quindi incentrata esclusivamente sui reattori nucleari di IV generazione a spettro neutronico veloce poiché ad elevata sicurezza ed affidabilità, massimo utilizzo del potenziale energetico del combustibile e controllata gestione dei rifiuti radioattivi.

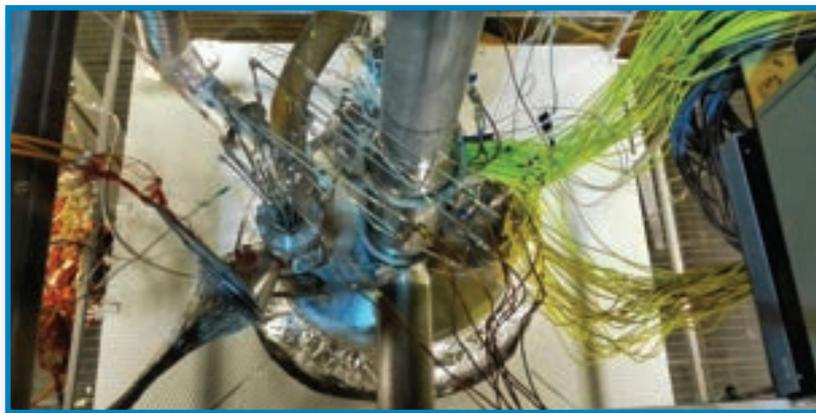
In particolare le attività hanno riguardato lo sviluppo e implementazione dei sistemi nucleari veloci refrigerati a piombo, **Lead cooled Fast Reactor (LFR)** e **Small Modular Reactor (SMR)**, su cui l'Italia detiene una posizione di leadership progettuale e tecnologica in Europa, attività che sono inquadrare nelle iniziative internazionali come la **Generation IV International Forum (GIF)** ed europee quali la **Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP)** e la **European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII)** alle quali il nostro Paese ha aderito.

In questo contesto, sia ENEA sia il sistema industriale italiano (es. Ansaldo Nucleare) e le Università (CIRTEN), sono focalizzati sullo sviluppo concettuale, sulla progettazione di dettaglio, e sulla ricerca tecnologica del DEMO-LFR ALFRED "Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator".

Le attività di R&S implementate, oltre che inserite in un più ampio contesto di iniziative europee (SNETP, ESNII, ESFRI, EERA), trovano continuità nei gruppi

di lavoro internazionali (IAEA, OECD-NEA, ESS) e negli accordi bilaterali che ENEA ha stipulato a livello internazionale (CEA - Francia; CASHIPS - Cina; SNU - Corea del Sud).

### OBIETTIVI



Le attività di R&S sui sistemi nucleari di quarta generazione si sono focalizzate sui reattori veloci refrigerati a piombo - **Lead Cooled Fast Reactor (LFR)** - che riscuotono interesse in Europa e da parte dell'industria nazionale.

Nell'ambito del SET-PLAN, all'interno del quale si sviluppa l'Iniziativa Industriale Europea per il Nucleare Sostenibile (ESNII), e a cui partecipano Ansaldo Nucleare, ENEA e CIRTEN, è stato promosso il progetto relativo al DEMO LFR - ALFRED.

Facendo leva sulla progettualità acquisita dall'industria italiana, sul know-how e sulle infrastrutture di ricerca disponibili presso ENEA, sulla capacità multidisciplinare del CIRTEN, il progetto del DEMO ALFRED è stato ulteriormente sviluppato, è stato individuato il sito per la costruzione in Romania, ed è stato pianificato l'accesso ai fondi infrastrutturali europei per la fase di progettazione finale, ricerca e sviluppo nonché per la fase successiva di costruzione ed esercizio del DEMO ALFRED.

Le principali attività di ricerca e sviluppo implementate in supporto al reattore ALFRED, sono state quindi focalizzate sui i seguenti temi principali. **Progettazione di sistema e Analisi di Sicurezza.** Sviluppo e validazione di codici di calcolo per

l'analisi di sicurezza; supporto alla progettazione e analisi di sicurezza del combustibile nucleare; progettazione di dettaglio del nocciolo del dimostratore; studi di dinamica spaziale.

**Qualifica Materiali strutturali e studi di fabbricazione.** Caratterizzazione acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo.

**Sviluppo Componenti e Sistemi Innovativi.** Mediante l'ulteriore implementazione delle infrastrutture di ricerca presso ENEA, si è provveduto allo sviluppo e qualifica di componenti e sistemi innovativi rilevanti per lo sviluppo del reattore ALFRED.

Gli obiettivi di ricerca e sviluppo si pongono come obiettivo di medio termine quello di favorire il sistema di ricerca nucleare italiano per lo sviluppo di reattori di IV generazione (LFR) e SMR con relativo ciclo del combustibile, in termini di competenze, infrastrutture di ricerca, laboratori, processi di qualificazione, know-how.

Nel lungo termine si vogliono sfruttare le competenze e le infrastrutture di ricerca così sviluppate per partecipare alla progettazione, realizzazione ed operazione di un prototipo dimostrativo del reattore refrigerato a piombo e di sistemi nucleari di quarta generazione a ciclo chiuso in ambito ESNII e GIF.

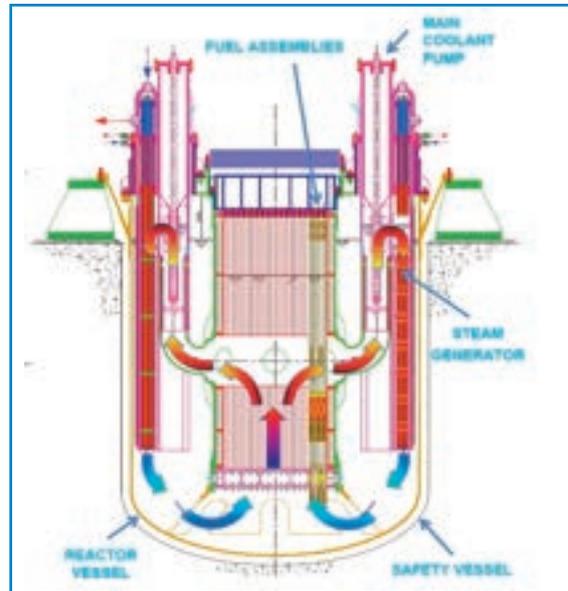
## RISULTATI

### Progettazione di sistema e analisi di sicurezza

I sistemi Gen. IV richiedono lo sviluppo di un ciclo del combustibile innovativo che contempli il bruciamento di attinidi minori. A tale scopo si sono avviati studi per il reperimento di dati nucleari accurati mediante esperienze in reattori di ricerca, finalizzate all'inferenza delle sezioni d'urto di attinidi minori. In questo contesto, e con il supporto della NEA, 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, che si propone di produrre dati nucleari per spettro veloce.

Relativamente alla progettazione del nocciolo, dopo l'analisi critica della configurazione di ALFRED, si è pervenuti ad un nuovo arrangiamento in cui sono state corrette le criticità emerse. L'ultimo passo, necessario ad una configurazione di riferimento, consiste nella caratterizzazione neutronica della stessa.

Per quanto attiene all'analisi di sicurezza dei sistemi LFR, l'attività svolta ha previsto una revisione critica

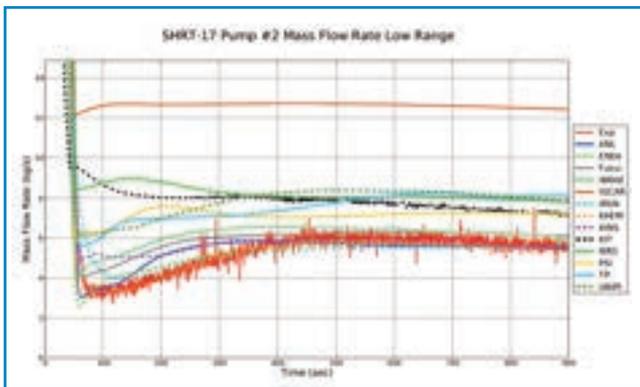
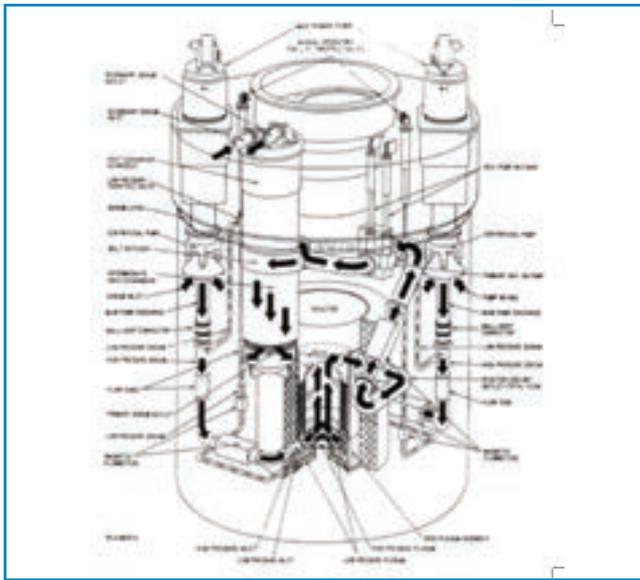


Sezione del sistema primario del reattore ALFRED



Reattore RSV-TAPIRO  
(Centro Ricerche ENEA Casaccia)

e di aggiornamento di alcuni modelli fenomenologici del combustibile, in particolare la redistribuzione 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, è stata effettuata un'analisi di performance delle barrette del reattore di riferimento, verificando il rispetto dei limiti di design preliminari ed eventuali criticità. I risultati di questo lavoro offrono indicazioni utili al progetto del reattore di riferimento e, in generale, al miglioramento della sicurezza intrinseca dei reattori a piombo. 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.



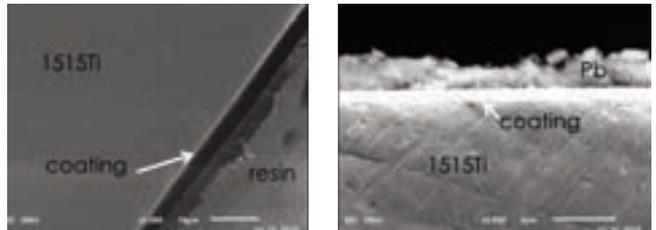
*Schema del reattore EBR-II e confronto fra dati sperimentali e analisi numeriche*

L'attività ha richiesto uno sforzo sinergico di differenti competenze tecniche, dalla fisica del reattore, alla termoidraulica di sistema, alla fluidodinamica computazionale. 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.

### **Qualifica materiali strutturali e studi di fabbricazione**

Il piombo e la lega eutettica piombo-bismuto ad alta temperatura sono molto corrosivi per gli acciai. Una tecnica per la protezione della corrosione per gli acciai inossidabili adottata si basa sul controllo dell'ossigeno disciolto nel metallo fuso: mantenendo la concentrazione di ossigeno intorno ad una certa soglia 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 però di difficile applicazione a reattori di potenza. L'attività sperimentale volta allo sviluppo di ricoperture per la protezione dei materiali strutturali da metallo liquido pesante, iniziata nei precedenti PAR, si è ora 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  $Al_2O_3$ .



*Foto al SEM di campioni ricoperti di allumina (senza buffer intermedio) mediante tecnica "Pulsed Laser Deposition" (IIT@POLIMI), esposti in piombo ad elevata temperatura. Non sono presenti fenomeni corrosivi*

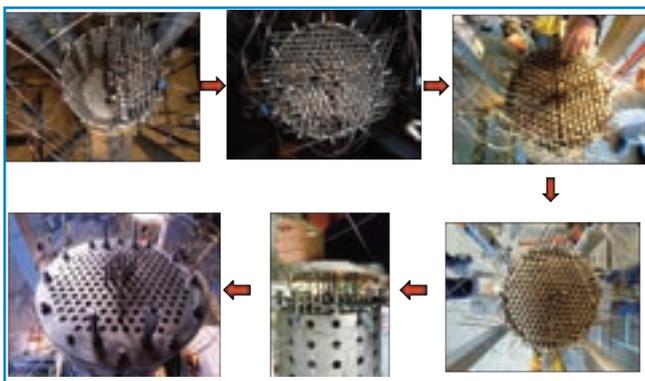
Presso il laboratorio di chimica del piombo del Centro Ricerche ENEA Brasimone si studia la corrosione in piombo statico di acciai di riferimento per sistemi LFR (austenitici 15-15Ti e 316L e ferritico/martensitico T91) e ricoprimenti di interesse (TiN, Ta e quelli a base di Al). Per il rivestimento in allumina realizzato mediante PLD 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 1  $\mu m$ ) e la seconda riguardante un double-layer con strato interno di FeCrSi (buffer layer, ottenuto con RF sputtering e spessore 0,4  $\mu m$ ) e strato esterno di PLD- $Al_2O_3$  (spessore 1  $\mu m$ ). Le prove non hanno mostrato fenomeni di corrosione o degradazione del rivestimento. Il rivestimento mono-layer di PLD- $Al_2O_3$  ha indicato inoltre scarsa bagnabilità da parte del piombo.

### **Sviluppo componenti e sistemi innovativi**

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti presso il Centro Ricerche ENEA del Brasimone, si è proseguito con le attività di caratterizzazione del Generatore di Vapore (GV) del DEMO-LFR. Il lavoro svolto nella prima parte ha avuto lo scopo di sviluppare un modello RELAP5-3D della facility sperimentale CIRCE in cui è stata installata la sezione di prova HERO. Successivamente è stato avviato il

*commissioning* dell'impianto di prova HERO-CIRCE, mediante la realizzazione del circuito secondario ad acqua in pressione a 180 bar, con prove di circolazione in regime isoterma.

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. 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. Si è quindi progettata e predisposta l'implementazione di una nuova sezione di prova da installare sull'impianto LIFUS-5 del Brasimone per testare un sistema capace di identificare in tempo reale la presenza di una piccola rottura nel tubo del generatore di vapore.



*Assemblaggio Sezione di Prova Impianto LIFUS-5*

Relativamente al supporto numerico per la progettazione dei sistemi LFR, si è provveduto allo sviluppo e alla qualifica della tecnica di accoppiamento tra un codice di CFD e un codice termoidraulico di sistema.

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 (presso il Centro ENEA Brasimone). I risultati ottenuti del sistema accoppiato e del modello RELAP5 stand-alone mostrano un ottimo accordo con i dati sperimentali.

Per quanto attiene all'accoppiamento del codice di calcolo CATHARE e il codice di fluidodinamica computazionale FEM-LCORE tramite la piattaforma SALOME, sono stati eseguiti test di accoppiamento. Relativamente alla validazione del codice CATHARE2, e dato l'interesse verso i sistemi nucleari innovativi raffreddati a metallo liquido, è stata aperta una scheda di collaborazione tra ENEA e CEA che ha riguardato la modifica del codice termoidraulico di sistema CATHARE per simulare reattori raffreddati a metallo liquido pesante. 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 NACIE (ENEA Brasimone). Durante queste attività, CATHARE ha dimostrato buone capacità di simulazione sia in convezione forzata sia naturale.

Per quanto concerne le infrastrutture di ricerca ENEA, presso il Centro Ricerche Brasimone si è provveduto all'upgrade dell'impianto HELENA, permettendo l'uso continuativo senza interruzioni per il reintegro del livello di piombo dalla tenuta rotante della pompa di circolazione.

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 fluente, si è provveduto ad un upgrade dell'esistente impianto NACIE, di cui rimane integro il vaso di espansione e tubazioni collegate, ed il circuito ausiliario a gas.

Infine, è stata realizzata la facility a metallo liquido pesante SOLIDX (SOLIDification eXperiment), con lo scopo di supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo fluente, investigando il fenomeno del congelamento del metallo liquido. La facility utilizza direttamente il piombo come fluido, lavorando quindi a temperature elevate a cavallo dei 330 °C (temperatura di congelamento).

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

*Progetto B.3.1 – L.P.1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare*

*Referente: M. Tarantino, mariano.tarantino@enea.it*

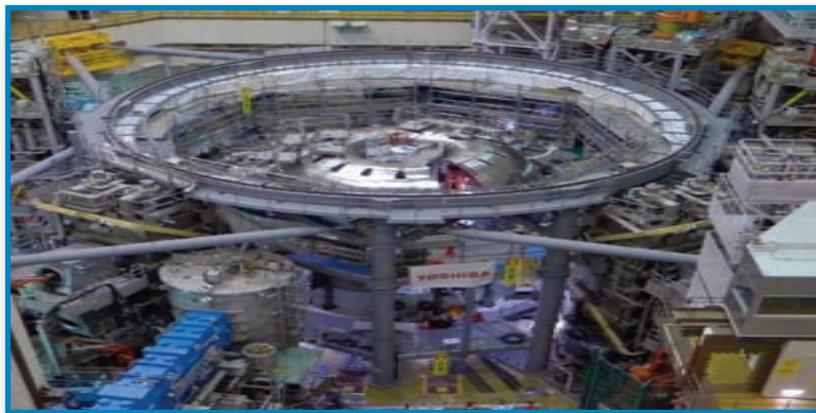


## Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

La fusione termonucleare controllata è considerata una opzione concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. A conferma, 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 le sperimentazioni di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica Europa e 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. L'accordo vede impegnati Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio con forniture "in kind" importanti e strategiche per il sistema industriale nazionale. Le attività del BA che prevedono la partecipazione dell'ENEA riguardano la costruzione di una macchina *Tokamak superconduttrice JT-60SA* e la realizzazione di una *facility* IFMIF per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti a un flusso di neutroni di energia da fusione.



### OBIETTIVI

#### Costruzione Tokamak JT-60SA

JT-60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m, in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, con singolo o doppio nullo. Il Tokamak JT-60SA sarà installato a Naka (Giappone) nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U.

L'ENEA è impegnata nella costruzione del magnete superconduttore di JT-60SA in collaborazione con il CEA, con la realizzazione di 9 delle 18 bobine superconduttrici di NbTi, delle casse di

contenimento in acciaio austenitico per tutte le 18 bobine, parte delle alimentazioni elettriche del sistema magnetico, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente, 4 sistemi di interruzione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) e 6 trasformatori.

#### IFMIF

La fusione termonucleare richiede materiali capaci di resistere ad alte temperature (fino a 800 °C) e a flussi di neutroni da 14 MeV con danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. Per condurre ricerche appropriate in questo campo, nel Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione di una *facility* di ricerca detta IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) costituita da una sorgente di ioni, due acceleratori lineari, per raggiungere l'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sul bersaglio di litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità.

L'ENEA partecipa al programma provvedendo allo sviluppo del target per la produzione dei neutroni

all'energia da fusione, 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.

## **RISULTATI** **Macchina JT-60SA**

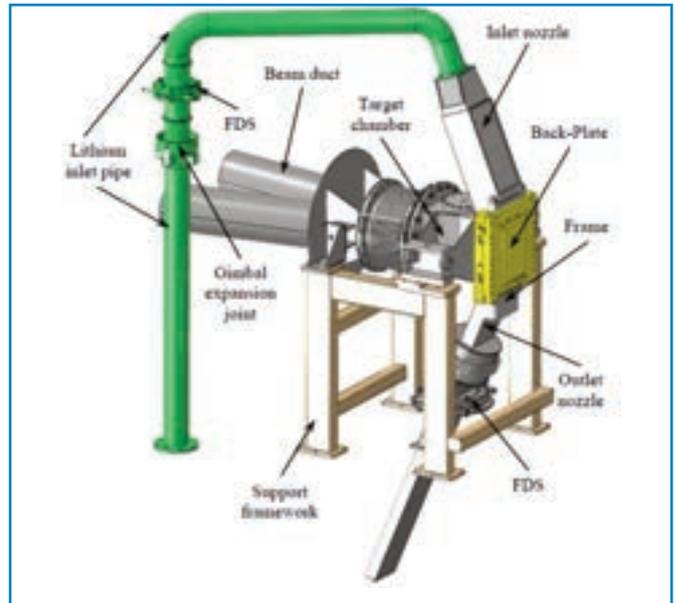
I moduli del sistema toroidale della macchina tokamak JT-60SA sono in fase di costruzione presso l'ASG Superconductors SpA di Genova sotto la supervisione di ENEA. È stata completata la realizzazione di tutti i nove avvolgimenti di bobina toroidale con le relative prove di accettazione. Il modulo di 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.

Nel corso del 2015 è stato completato l'inserimento, la saldatura e l'impregnazione in cassa del primo e del secondo modulo; inserimento e parziale saldatura del terzo modulo. Le attività che mancano al completamento dei primi tre moduli procedono parallelamente alle attività costruttive per i restanti moduli. Nella navata degli stabilimenti di produzione della ASG Superconductors sono disposti sette avvolgimenti di bobina già avvolti dalle tele di vetro previste per compensare lo spazio tra gli stessi e le relative casse di contenimento, e che verranno impregnati con resina epossidica sotto vuoto nella successiva fase di fabbricazione. Altri due avvolgimenti sono in fase di integrazione con la cassa.

In occasione del 23° Technical Coordination Meeting organizzato dall'ENEA per fare il punto sullo stato di avanzamento del progetto a Genova, circa 50 delegati europei e giapponesi hanno visitato l'ASG e il primo modulo di magnete toroidale.

Riguardo la realizzazione delle strutture di contenimento delle bobine toroidali JT-60SA, è stata completata la realizzazione dei primi 6 set di componenti per casse che sono stati consegnati per l'assemblaggio finale rispettivamente ad ASG (Genova) ed ad Alstom (Belfort).

La cassa è costituita principalmente da una gamba



*Modello del Target Assembly di IFMIF*



*Vista degli avvolgimenti in attesa dell'inserimento nelle casse di contenimento*



*Inserimento del primo avvolgimento nella cassa di contenimento*

dritta, una gamba curva e da tre coperchi per il contenimento della bobina come mostrato nel ciclo completo di produzione schematizzato nella figura a lato.

L'ENEA è impegnato anche nella fornitura degli apparati elettrici di potenza per l'alimentazione della macchina JT-60SA. Il Central Solenoid (CS) di JT-60SA è diviso in quattro moduli, ognuno dei quali è collegato ad un circuito di alimentazione e ad una unità di commutazione veloce (switching network unit, SNU) necessaria alla formazione del plasma di fusione.

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. Non essendo disponibili sul mercato soluzioni adatte allo scopo, è stato sviluppato un progetto dedicato, gestito dall'ENEA in coordinamento con i partner internazionali. Data la specificità della fornitura, si è stabilito di eseguire una serie esaustiva di prove su un prototipo a piena scala (primo della serie) nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati, in condizioni anche più onerose di quelle previste durante gli esperimenti di JT-60SA. Dopo l'esito positivo di tali prove, nel corso del 2015, sono stati completati tutti gli altri elementi delle ulteriori tre SNU.

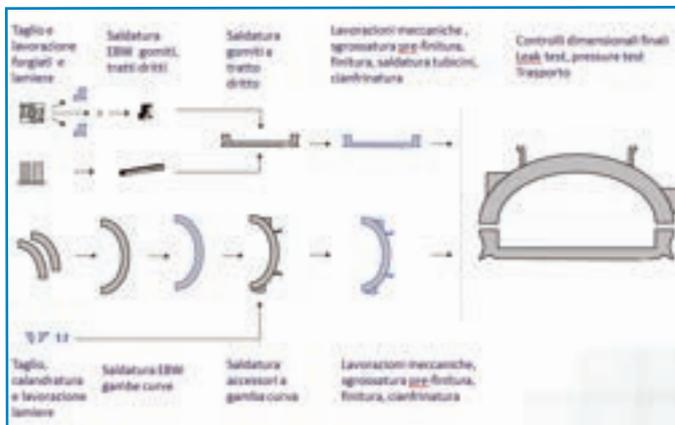
Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo del sistema di controllo locale (Local Control Cubicle, LCC) con la definizione di tutte le procedure di comunicazioni con il resto degli impianti.

Le prove del sistema di controllo sono state eseguite sul 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'installazione e la messa in servizio integrata con gli altri componenti dell'impianto, previste per il 2016.

Le alimentazioni di potenza comprendono 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 del Tokamak JT-60SA. La fase di ingegnerizzazione ha individuato i criteri di dimensionamento dei sistemi e di scelta dei componenti industriali. Nel 2014 è stato completato il design dei trasformatori, mentre nel 2015 sono stati approvati i design dei convertitori.

In linea con quanto programmato sono stati realizzati



*Ciclo di produzione delle casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA*



*Set completo dei componenti di una cassa di contenimento presso le officine Walter Tosto di Chieti Scalo: gamba curva, gamba dritta e coperchi di chiusura*



*Gamba dritta e gamba curva del 2° casing in fase di assemblaggio in ASG Superconductors SpA di Genova*

e collaudati i trasformatori per le bobine del Fast Plasma Position Control (FPPC) e relativi convertitori completi di collaudo.

Nel corso del 2015 è stata terminata la realizzazione di un prototipo del sistema di controllo di un convertitore per Central Solenoid (CS) completo di prove per garantire la comunicazione con il sistema di potenza; parallelamente si è provveduto alla costru-

zione di un prototipo di sistema Crowbar di un convertitore CS con relative prove.

Da ultimo sono stati realizzati i trasformatori per CS2 e CS3 completi di prove di accettazione e i quadri elettrici dei raddrizzatori a tiristori dei convertitori per CS1 e CS4.

### Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

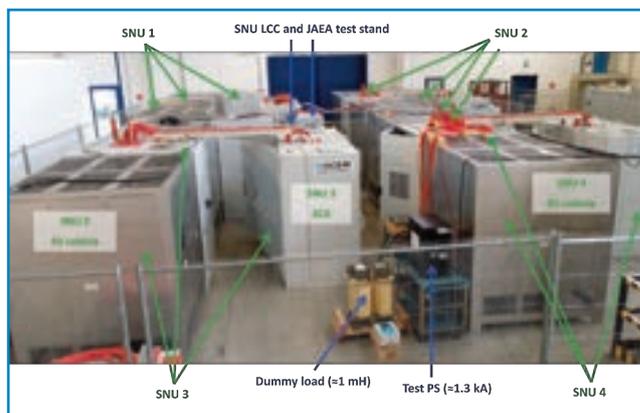
Nell'ambito delle attività IFMIF è stato completato il commissioning dell'impianto Lifus 6 per eseguire prove di resistenza alla corrosione-erosione da litio liquido fluente alla temperatura di 350 °C.

In una prima fase della purificazione, le concentrazioni di carbonio, ossigeno ed idrogeno sono abbattute da una Trappola Fredda; in una seconda fase l'utilizzo di una Trappola Calda, eseguita a partire da ottobre 2015, consente di ridurre anche la concentrazione di azoto.

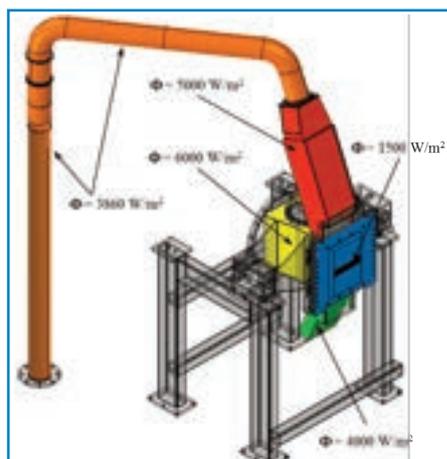
L'avvio delle prove di corrosione è subordinato alla preventiva purificazione iniziale del litio circolante nell'impianto. A tal fine sono state eseguite diverse analisi (offline) di campioni di litio per verificare le quantità di impurezze non metalliche disciolte nel litio circolante e per validare lo strumento di misura in tempo reale di tali impurezza.

Il contributo ENEA comprende lo studio del comportamento termomeccanico del target assembly in condizione transitorie e di start up. A tal fine è stato sviluppato un modello 3-D agli elementi finiti (FEM) in grado di simulare il comportamento termico del prototipo del target assembly nella fase di preriscaldamento. 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.

Per quanto riguarda la progettazione ingegneristica del target assembly di IFMIF, le analisi termomeccaniche condotte sul modello del target assembly hanno evidenziato che, sebbene in generale il sistema sia in grado di sopportare le sollecitazioni, alcune sezioni della backplate (BP) in corrispondenza dell'altezza mediana del canale di litio, risultano essere critiche. Si è pertanto evidenziata la necessità



Disposizione degli elementi per il test sul sistema completo



Posizionamento dei riscaldatori elettrici sul prototipo del TA e relativi flussi termici

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.

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).

La ricerca di nuovi materiali con alte prestazioni meccaniche e limitato infragilimento sotto flusso neutronico, rende necessario lo sviluppo di acciai ferritico-martensitico alternativo all'EUROFER per la realizzazione del target assembly di IFMIF. Utilizzando una piccola colata di acciaio inossidabile martensitico 7Cr si sono eseguite operazioni volte alla definizione del trattamento termico per identificare la migliore struttura austenitica in grado di sopportare gli alti flussi neutronici che investono il materiale.

Area di ricerca: *Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

Progetto *B.3.2: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER*

Referente: *A. Pizzuto, aldo.pizzuto@enea.it*



## Risparmio di energia nei settori Industria, Servizi e Civile

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Gli strumenti attuativi delle politiche europee, centrate sull'uso razionale dell'energia e sulla compatibilità ambientale dei sistemi energetici, hanno incrementato considerevolmente le conoscenze sulle singole tecnologie che, unite alla presenza di normative forzanti o incentivanti, rendono

economicamente attraente il ricorso alle tecnologie efficienti e alla integrazione delle fonti rinnovabili facendo crescere la domanda di tali tecnologie. Il Piano d'Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica intende

trasformare il mercato interno dell'energia in modo da fornire ai cittadini infrastrutture, prodotti, processi e servizi energetici che siano globalmente i più efficienti sul piano energetico. In quest'ambito si collocano le attività di adeguamento della normativa nazionale alla legislazione europea in merito a requisiti minimi (Eco-Design) ed etichettatura energetica.

Un ruolo fondamentale è assegnato allo sviluppo di strumenti e servizi per l'efficienza energetica – con lo scopo di trovare soluzioni innovative per la riduzione dei consumi (sistemi di controllo, reti attive di distribuzione, integrazione di sistemi di produzione di energia basati su fonti rinnovabili) – e l'abbattimento degli ostacoli e delle barriere che ancora si frappongono all'estensione del mercato, anche attraverso l'analisi di meccanismi di incentivazione normativi ed economici.



### OBIETTIVI

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 che sono state sviluppate in questo anno e che interesseranno anche i prossimi due si articolano in quattro linee: i) reti di poligenerazione; ii) gestione ottimale delle reti di edifici;

iii) sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione; iv) tecnologie per l'industria del freddo.

Le attività di questo progetto costituiscono la base per l'applicazione di soluzioni tecnologiche e lo sviluppo di strumenti di governance atti a favorire il consenso verso tali strategie e la loro diffusione capillare. È evidente che la disponibilità di poter usufruire di informazioni e soluzioni tecnologiche per l'efficienza energetica nei settori individuati dagli obiettivi elencati è un fattore di cui beneficia il sistema Paese, in generale, e l'utente finale, in particolare.

## RISULTATI

### Reti di poligenerazione distribuita

Le attività realizzate in questo ambito mirano allo sviluppo di strumenti per la simulazione e progettazione di reti di poligenerazione, che potrebbero essere sfruttati da operatori del settore (ESCo, municipalizzate ecc.) per rispondere ai requisiti imposti dalla normativa, oltreché incrementare la redditività economica e i risparmi energetici nella gestione di questi servizi.

I risultati ottenuti per questo obiettivo sono riassumibili in due punti: come prima cosa si sono sviluppati una serie di strumenti per l'ottimizzazione dei consumi energetici del sistema edifici-impianti nella configurazione di distretto energetico, attraverso la modellazione dinamica dei carichi termici ed elettrici.

In secondo luogo sono stati effettuati degli studi e delle caratterizzazioni di reti termiche distribuite, valutando i risparmi energetici conseguibili grazie all'integrazione di impianti basati su tecnologie non diffuse con ampi potenziali di efficientamento.

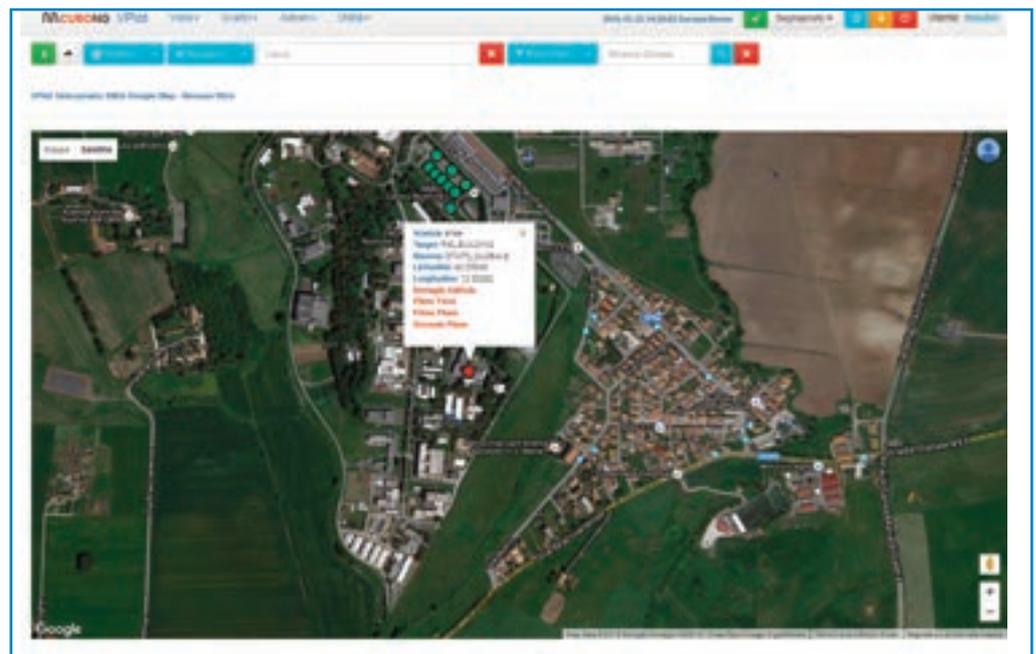
### Gestione di reti di edifici e "smart village"

Le attività di ricerca riguardano lo sviluppo di una metodologia per la gestione integrata di una rete di edifici terziari da applicare in uno Smart Village sperimentale, al fine di supportare il gestore energetico nell'attuare politiche di controllo della domanda basate su una modellistica avanzata che non penalizzi il comfort dell'utente evitando quanto più possibile distacchi dalla rete. In particolare l'idea di base è quella di dotare la rete di edifici di sensoristica, sistemi di attuazione e di trasmissione dati ed un sistema centrale dove viene sviluppata la modellazione della rete, la diagnostica su ogni edificio della rete, la comparazione tra le prestazioni dei vari edifici, la gestione ottimale e la gestione della domanda. Gli obiettivi che si sono perseguiti nel triennio



Configurazione e pianificazione territoriale di una rete di poligenerazione

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. Tali metodologie si sono concretizzate attraverso la realizzazione: di una piattaforma integrata di simulazione dei consumi finalizzata alla definizione di scenari di 'active demand' su reti di edifici, di un sistema on-line (Smart Village) per l'analisi dati avanzata (diagnostica), il controllo adattivo e l'ottimizzazione di reti di edifici, di una facility sperimentale per lo studio in condizioni reali di una rete locale di *smart building network*, *smart district* (Smart Village), *smart building* a diverso livello di sensorializzazione, *smart rooms/office*.



Interfaccia della piattaforma 'Smart Village'

## Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

L'attività svolte in questo ambito sono state articolate su tre linee di ricerca, tutte mirate all'aumento dell'efficienza energetica e al contenimento dei consumi con l'illuminazione artificiale: i) studio di materiali e di componenti per costruire prodotti efficienti (con gli OLED); ii) attività sperimentale di sistemi innovativi a LED in diversi ambiti applicativi, con sperimentazione su prototipi realizzati nelle precedenti annualità, studi preliminari per sviluppi futuri, realizzazione di nuovi prototipi di apparecchi, studi sull'integrazione della luce naturale con la artificiale e su altri effetti della luce sull'uomo, progettazione di un software per il calcolo del LENI (Lighting Energy Numeric Indicator, secondo la norma tecnica EN 15193:2015) e realizzazione un primo step sperimentale; iii) assessment delle linee guida e degli standard Lumière, trasferimento al sistema nazionale del modello di management



*Prototipo Asterism (ENEA – PoliMi, Dip. Design)*

sviluppato, applicazione ed eventuale perfezionamento dei standard di supporto realizzati, sviluppo di un tool di validazione dell'audit secondo il modello Lumière, giornate formative per amministratori pubblici. Nella figura in alto un esempio di prototipo realizzato: Asterism, apparecchio di illuminazione per uffici a LED, con quattro moduli per illuminazione indiretta e tre per diretta, permette la regolazione dei moduli individuale/a gruppi in intensità e tonalità di bianco e la programmazione in funzione di scenari di riferimento (riunione, lavoro individuale o altro).

## Tecnologie per l'industria del freddo

Circa l'80% dei prodotti alimentari avviati al consumo sono stati prodotti o trasformati presso stabilimenti dotati di attrezzature frigorifere. È evidente, dunque, che il settore della refrigerazione e in particolare tutti gli impianti fissi e mobili che fanno parte della catena del freddo, possono contribuire mediante una corretta progettazione, un'adeguata scelta dei componenti, una razionale gestione di esercizio all'ottimizzazione dei consumi energetici.

Le attività sono articolate su due direttrici principali: la validazione del sistema prototipale sviluppato nelle precedenti annualità, in particolare sono state realizzate campagne sperimentali dei nodi sensoriali per il monitoraggio dello stato di conservazione dell'ortofrutta ottimizzando il risparmio energetico delle celle frigorifero utilizzate per lo stoccaggio ed il trasporto dei prodotti alimentari freschi; l'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.

## Recupero di elementi pregiati presenti nei RAEE

L'eccezionale sviluppo tecnologico che ha contraddistinto l'ultimo decennio ha favorito la diffusione in ambito domestico e professionale delle più svariate apparecchiature hi-tech, determinando un deciso incremento della domanda globale di materie prime indispensabili per la produzione degli Apparati Elettrici ed Elettronici (AEE), materie che sono rapidamente diventate strategiche e oggetto di speculazione finanziaria: è quindi necessario chiudere il ciclo del recupero di materiali dai Rifiuti da AEE (RAEE) per trasformare questa tipologia di rifiuti da problema ambientale a valida risorsa economica.

L'eterogeneità dei RAEE, 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 essi contenute. Le tecniche idro-metallurgiche costituiscono un efficace strumento nel caso di matrici complesse per la separazione e la purificazione selettiva di specie chimiche diverse. Le attività hanno riguardato due linee di ricerca mirate allo sviluppo di processi eco-innovativi per il recupero di metalli ad elevato valore aggiunto da RAEE e alla valutazione della fattibilità del recupero

di elementi pregiati da AEE di ultima generazione. In particolare, lo studio ha coinvolto matrici come i microcircuiti ceramici, le lampade a fluorescenza, i magneti permanenti, lampade a LED e il refluo prodotto dal processo sviluppato da ENEA (brevetti n. RM2013A000549, 2013 e n. RM2015A000064, 2015).

Per ciascuna matrice il lavoro si è svolto nelle seguenti fasi: caratterizzazione; determinazione della cinetica e migliori condizioni di lisciviazione; valutazione della selettività e dell'efficacia delle tecniche di separazione selettiva (estrazione con solvente, precipitazione frazionata, elettrodeposizione, riduzione/cementazione) al fine di individuare processi efficienti di recupero e valorizzazione delle specie chimiche di interesse per la linea di attività E1 e di valutare le potenzialità di valorizzazione delle lampade a LED per la linea E2.

### **Realizzazione di una facility per la sperimentazione e verifica di motori elettrici ad alta efficienza**

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 in Italia sia attribuibile al funzionamento dei motori elettrici, valore che corrisponde a circa il 40% del consumo elettrico nazionale. Il Regolamento 2009/640/CE e la Direttiva 2012/27/UE, recepita dal D.Ls. 102/2014, prevedono che i Paesi Membri svolgano i controlli di conformità delle diagnosi energetica fatte nelle aziende energivore, dove spesso vengono impiegati motori elettrici e, più in generale, di stimolare le PMI all'uso di tecnologie efficienti. Dunque, l'obiettivo di questa linea di attività mira a realizzare una facility predisposta appositamente per la verifica dei motori elettrici sul mercato e il supporto alla sperimentazione di nuovi sistemi ad alta efficienza. In questo primo anno l'attività ha provveduto alla definizione delle specifiche per l'approvvigionamento dei principali componenti.

### **Analisi di soluzioni tecniche per l'efficientamento dei processi produttivi nelle PMI**

L'obiettivo di questa linea di attività è la valutazione dell'impatto potenziale derivante dalla implementazione di audit energetici all'interno di PMI del settore industriale, in termini di risparmio energetico e costi da sostenere per l'esecuzione dei necessari interventi di efficientamento.

Lo studio ha evidenziato quali misure siano state adottate 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). È stata, inoltre, avviata l'implementazione di un software per la valutazione delle opportunità di efficientamento energetico nelle PMI.

*Area di ricerca: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica  
Progetto C.1: Risparmio di energia nei settori Industria, Servizi e Civile  
Referente: [Iliaria Bertini, ilaria.bertini@enea.it](mailto:ilaria.bertini@enea.it)*



## Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

La Direttiva 27/2012/CE, riprendendo criteri presenti nella Direttiva 31/2010/CE, ha prescritto agli Stati membri una serie di azioni e interventi quali: la riqualificazione energetica del parco edifici della Pubblica Amministrazione Centrale (PAC) per una quota annuale, a partire dal 2014, del 3% della superficie utile del parco stesso; attività di formazione; promozione di sistemi per cogenerazione e teleriscaldamento; utilizzo di standard e strumenti in grado di assicurare e accelerare l'attuazione dei programmi per l'efficienza

energetica e raggiungere l'obiettivo del nearly Energy Zero Building (nZEB), per gli edifici pubblici, nuovi o soggetti a riqualificazione, dal 1° gennaio 2019, per tutti gli altri, anche privati, dal 1° gennaio 2021.

Il Ministero dello Sviluppo Economico ha predisposto un Piano di interventi per gli edifici della PAC e ha istituito una Cabina di Regia per gestirne la riqualificazione energetica e incentivare gli edifici nZEB.

### OBIETTIVI

Le attività hanno dato un forte contributo al raggiungimento degli standard europei e nazionali sull'efficienza energetica degli edifici, definire valori di benchmark e di riferimento prestazionali a supporto della normativa e delle politiche energetiche e sviluppare strumenti e modelli per supportare le Pubbliche Amministrazioni (PA) nelle scelte di interventi di efficienza energetica negli edifici e promuovere l'edificio nZEB. Per questo è stata

implementata la metodologia comparativa *cost-optimal*, che, in riferimento al Regolamento 244/2012/UE, ha approfondito le analisi sugli edifici di riferimento per il residenziale e non residenziale (uffici), per ulteriori verifiche dei valori di efficienza energetica raggiungibili.



Gli obiettivi specifici sono articolati come segue:

- Indagine sui consumi di complessi sportivi gestiti dal CONI Servizi, per definire indicatori per l'efficienza energetica.
- Sviluppo di una nuova procedura di ottimizzazione di

supporto alla progettazione di edifici a energia quasi zero, con riferimento alla norma europea EN 15251; definizione dei due indici di *discomfort* da utilizzare per le valutazioni dei consumi energetici negli edifici.

- Misura e analisi dei dati di consumo energetico nel complesso del Campus Bovisa del Politecnico di Milano.
- Analisi delle metodologie di diagnostica energetica degli edifici in campo illuminotecnico, per l'edilizia scolastica ed uffici.
- Realizzazione di un *tool* informatico con interfaccia grafica per promuovere gli audit energetici degli edifici e verificare la fattibilità degli interventi di riqualificazione.
- Sviluppo di modelli di modelli per la quantificazione del potenziale Ventilative Cooling nell'edilizia.
- Linee guida per la PA per indirizzare interventi di efficienza energetica negli edifici.
- Realizzazione di un sistema esperto mirato all'autodiagnosi energetica degli edifici della PA.

- Realizzazione di un sistema di controllo intelligente per la valutazione dei consumi energetici degli edifici e definizione di indicatori di prestazione ex ante ed ex post per la Building Automation.
- Sviluppo di un *tool* informatico per le diagnosi energetiche degli edifici; *tool* informatico per il controllo e la verifica dei risultati raggiunti in termini di efficienza energetica dalla PA, caratterizzazione delle tipologie di impianto nelle scuole e negli uffici.
- Sviluppo di un software dinamico per la certificazione energetica degli edifici del terziario.
- Sviluppo di una metodologia per valutare gli impatti occupazionali imputabili ad interventi di efficienza energetica.
- Realizzazione delle Linee Guida per gli Energy Performance Contract.
- Aggiornamento e sviluppo del software WinShelter espandendone le funzioni in termini di qualità del calcolo e funzionalità.
- Campagna sperimentale, per i cool material, con misurazione della funzione di riflessione bidirezionale su campioni di materiali per applicazioni in edilizia; su 16 prodotti per coperture è stata condotta una campagna sperimentale per caratterizzare e valutare i “cool pavement”.
- Sviluppo di modelli per un piano integrato di comunicazione e formazione sull’efficienza energetica, indirizzato all’utente finale e agli operatori del settore.
- Studio per la definizione, validazione e verifica di requisiti di ecodesign e di etichettatura energetica per gli apparecchi domestici bianchi, professionali e commerciali, del condizionamento/riscaldamento e dell’illuminazione.
- Sviluppo di uno strumento per rendere esplicite, all’utente, le modalità con cui viene a definirsi la spesa per le utenze elettriche, e sul modo di utilizzare gli elettrodomestici in casa.

## **RISULTATI**

### **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**

I temi affrontati sono quelli relativi alla realizzazione di edifici nZEB, le disposizioni introdotte in materia di monitoraggio dei consumi degli edifici, lo sviluppo della metodologia *cost-optimal*, 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 definizione di modelli di aggregazione della domanda rivolta alle PA di medie e piccole dimensioni. In particolare in questo obiettivo si segnalano i seguenti risultati:

*Analisi e strumenti:* analisi critica dei dati sui consumi elettrici del terziario con individuazione delle innovazioni per il contenimento dei consumi elettrici e in generale dei consumi energetici degli edifici e dei costi dei nZEB; sviluppo ed aggiornamento della metodologia *cost-optimal* per la valutazione della rispondenza degli standard energetici nazionali; analisi del comportamento dell’utenza sui consumi energetici finali degli edifici; studio di sistemi innovativi per l’involucro edilizio opaco; analisi della sostenibilità economica nell’adozione di soluzioni per l’efficienza energetica negli edifici della PA; sviluppo del software SEAS light per diagnosi energetiche degli edifici del residenziale ed un corso e-learning per l’utilizzo del SEAS.

*Caratterizzazione edifici:* ricerca sul territorio nazionale per determinare la dotazione degli impianti del parco edifici riferiti al residenziale; caratterizzazione degli edifici ad uso scolastico nel territorio del Sulcis in collaborazione con la Soc. Sotacarbo.

*Sviluppo sistemi:* potenzialità dell’accumulo termico dell’energia solare, per soddisfare la domanda di riscaldamento e raffrescamento ambienti, e integrazione nell’edificio delle tecnologie captanti la radiazione e l’accumulo dell’energia prodotta per edifici nZEB; studio per l’efficientamento energetico degli edifici con grandi volumi mediante l’utilizzo del gas come vettore energetico e con sistemi di micro generazione e valutazione tecnico-economica, con test su cella di prova presso l’Università la Sapienza di Roma; *tool* per un codice di calcolo dinamico per la certificazione energetica degli edifici del non residenziale; studi per la valutazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici.

### **Sviluppo modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni**

Risultati raggiunti: nuova metodologia, basata sul Local Energy Balance per la costruzione e l’analisi di bilanci energetici territoriali; studio e validazione

di un modello previsionale di consumo energetico per la verifica dell'efficienza energetica dei centri sportivi di medie e piccole dimensioni; analisi dell'impatto delle valvole termostatiche sui consumi finali di utenti collegati alle reti di teleriscaldamento dei Comuni montani di zona climatica E e F; sviluppo di una metodologia per la certificazione energetico-ambientale degli edifici.

### Analisi dei modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni

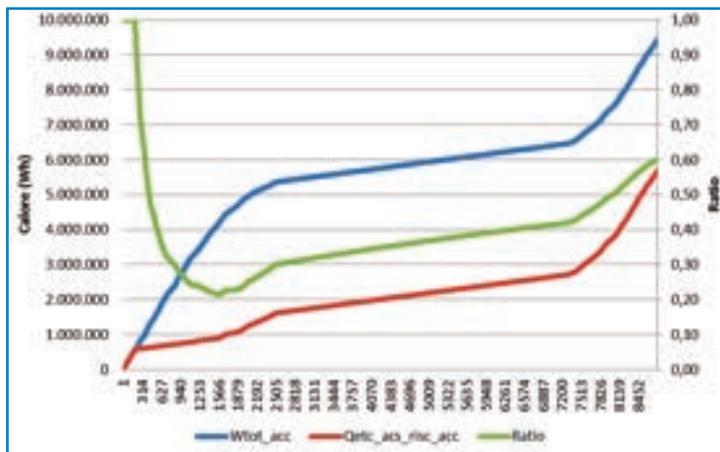
Risultati raggiunti: analisi delle barriere che ostacolano l'accesso, da parte dei Comuni italiani, ai fondi disponibili europei e locali per interventi di efficienza energetica; rapporto per la caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici; redazione delle linee guida per l'Energy Performance Contract, come da Dlgs 102/2014; modello per promuovere gli edifici nZEB, come definiti nel DM attuativo della Legge 90/13, con l'impiego di solare termico, dotato di accumulo stagionale, e di PdC integrate da PV.

### Verifica dei modelli e costruzione di un anno tipo per i dati di illuminamento globale e diffuso su piano orizzontale

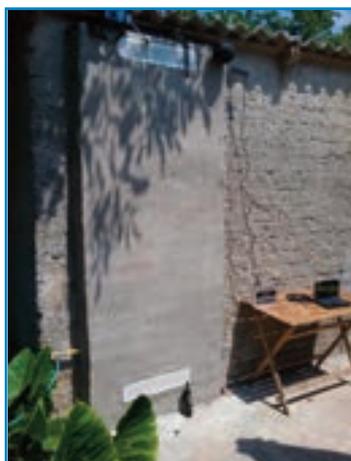
Primo studio per la realizzazione di mappe georeferenziate dei valori d'illuminamento, in maniera analoga a quanto già disponibile per i dati d'irradiazione solare; costruzione di anni tipo d'illuminamento orizzontale globale e diffuso per le città di Milano, Roma, Palermo utilizzando dati d'irradiazione solare, elaborati da ENEA, per calcolare i dati d'illuminamento.

### Definizione di condizioni al contorno per l'implementazione del metodo per il calcolo dei consumi elettrici per illuminazione artificiale

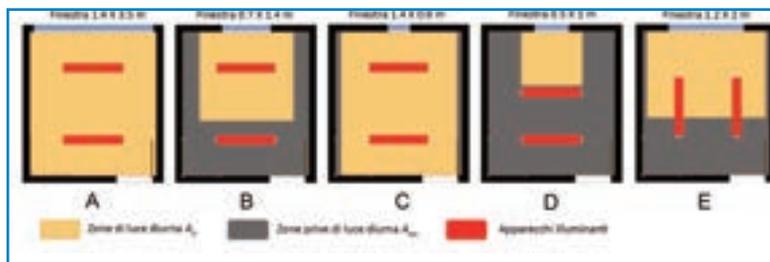
È stata definita una metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione degli edifici che consideri il contributo dell'illuminamento naturale e che superi i limiti della normativa tecnica di riferimento attualmente in vigore (UNI EN 15193 – 2008) che, per il nostro Paese, sovrastima tale fabbisogno.



Confronto tra le curve cumulative di fabbisogno termico (riscaldamento + acqua calda sanitaria, blu) e di quota soddisfatta tramite fonte solare (rosso). La curva in verde è il rapporto orario fra quota rinnovabile e fabbisogno



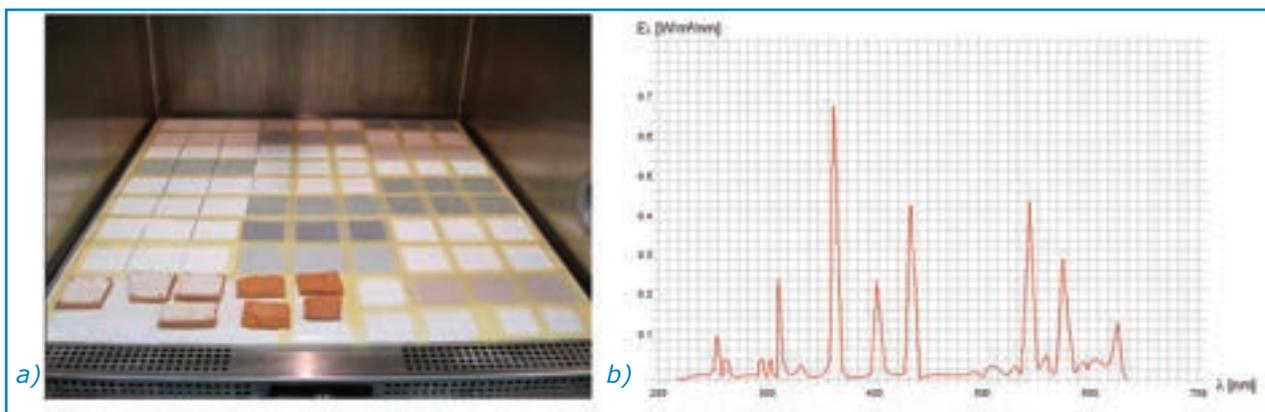
Sezione cella di prova strumentata del modulo di parete di altezza



Possibili ripartizioni delle potenze degli apparecchi nelle zone di luce diurna  $A_D$  e delle zone prive di luce diurna  $A_{ND}$  - Caso esemplificativo di un locale di dimensioni 3,5 x 4 m e finestra di dimensioni variabili

### Misura e analisi numerica della trasmittanza termica di vetrate isolanti con schermature in intercapedine

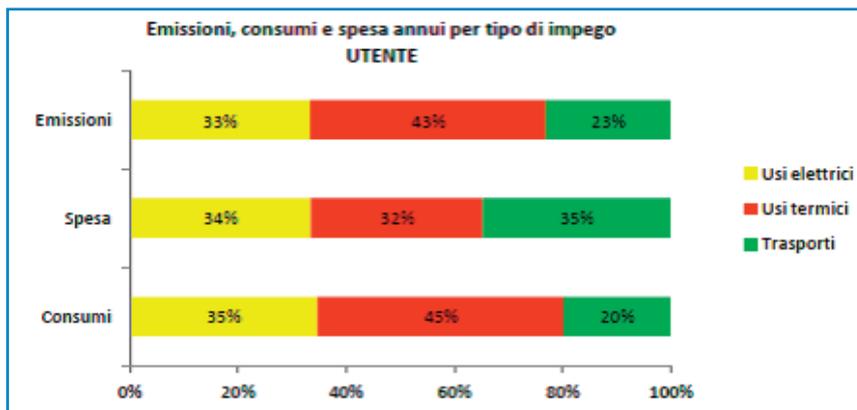
Analisi delle caratteristiche e delle prestazioni di schermature solari poste all'interno di vetrate isolanti, per caratterizzarle dal punto di vista ottico. I dati sono stati usati come input per la determinazione delle proprietà luminose, solari e termiche di sistemi semi-trasparenti evidenziandone limiti e benefici prestazionali.



a) campioni nella camera climatica;  
b) spettro della lampada UV utilizzata

### Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (cool materials)

Valutazione parametrica delle prestazioni dell'involucro edilizio semitrasparente per illuminazione artificiale e climatizzazione estiva nel contesto italiano e caratterizzazione dei cool material per le chiusure verticali dell'involucro edilizio con valutazione parametrica delle prestazioni dell'involucro edilizio semitrasparente nel contesto italiano.



Tool Informatico - Stima di consumi, emissioni e spesa annui dell'Utente per aree di indagine, in %

### Piano integrato per l'informazione e la diffusione delle tecnologie verso i cittadini, le aziende e le pubbliche amministrazioni

È stato sviluppato il piano integrato di comunicazione con successiva analisi dell'utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'Efficienza Energetica ed un tool informatico per l'uso efficiente delle apparecchiature elettriche nel residenziale. È stata effettuata la definizione, validazione e verifica di requisiti di ecodesign e di etichettatura per gli apparecchi bianchi, professionali e commerciali, in particolare nel settore refrigerazione, lavaggio, cottura, condizionamento e illuminazione.

### Comunicazione e diffusione dei risultati

È stata studiata una piattaforma in grado di implementare una comunicazione che si pone l'obiettivo di stimolare, promuovere ed aumentare la cultura del risparmio energetico, divenendo il punto di riferimento, specie per le PA, intenzionate a trasformare il risparmio energetico in un valore in grado di caratterizzare il comportamento dei suoi dipendenti.

Area di ricerca: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto C.2: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Referente: G. Fasano, gaetano.fasano@enea.it



## Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Secondo la Direttiva Europea 2010/31/UE del 19 maggio 2010, circa il 40% del consumo energetico globale nell'Unione Europea deriva dal comparto residenziale. Per questo motivo, afferma la Direttiva, "la riduzione del consumo energetico e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia costituiscono

misure importanti e necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Unione e le emissioni di gas a effetto serra". La crescente diffusione di impianti di condizionamento dell'aria ha tuttavia aumentato le richieste energetiche del

comparto residenziale. Questo, come riportato nella Direttiva succitata, "pone gravi problemi di carico massimo (in particolare nel periodo estivo, quando, più in generale, aumentano anche le necessità di alimentazione della catena del freddo), che causano un incremento del costo dell'energia elettrica e uno squilibrio del bilancio energetico". Per ridurre tali problematiche, oltre agli interventi suggeriti dalla Direttiva, finalizzati al miglioramento delle prestazioni termiche degli edifici durante il periodo estivo, il progetto di ricerca è indirizzato 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 il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili.

### OBIETTIVI

Il proposito del progetto di ricerca è quello di mostrare come l'utilizzo appropriato delle fonti di energia rinnovabili disponibili e l'adozione di sistemi

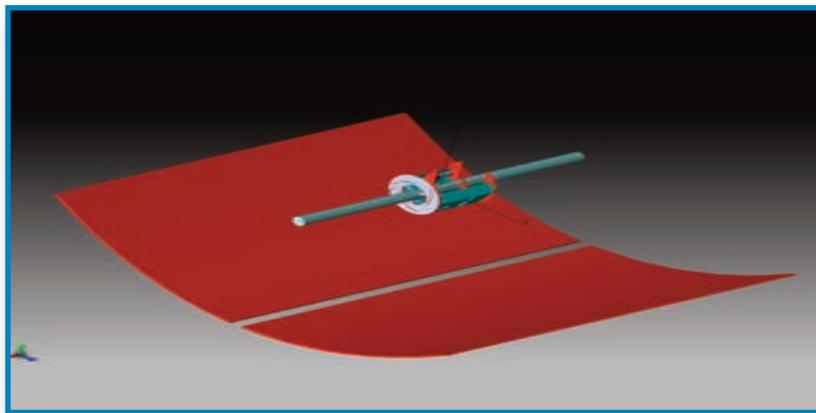
produttivi integrati, in grado di sfruttare in maniera ottimale tutti i flussi termici prodotti, consentano di ottenere i desiderati risultati di risparmio, efficienza energetica e salvaguardia ambientale. L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione

tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda di climatizzazione con la disponibilità di energia solare. Lo sviluppo delle tecnologie di solar heating & cooling e il raggiungimento di elevati livelli di

produttività e affidabilità può consentire l'impiego di tali sistemi anche in ambito industriale, laddove sia richiesta una produzione di calore di processo a media temperatura. Oltre che alla climatizzazione, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura possono contribuire allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità.

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.

In tale contesto l'obiettivo del progetto è quello di sviluppare componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti ed una varietà di soluzioni tecnologiche che consenta la scelta impiantistica ottimale in funzione della taglia dell'impianto, del tipo di fonte energetica disponibile, di output energetico richiesto e per ogni situazione climatica presente nel territorio nazionale.



## RISULTATI

### Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

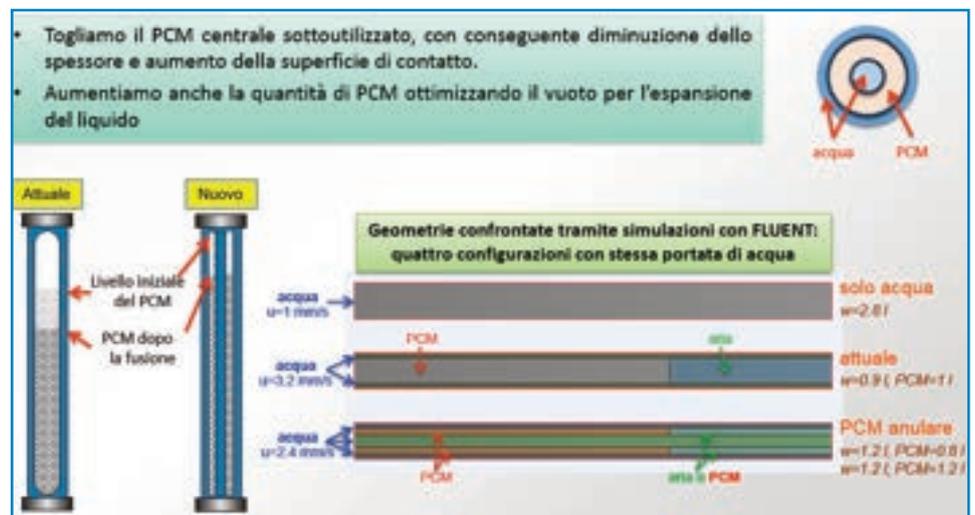
L'attività è stata sviluppata attraverso la progettazione, realizzazione, messa in funzione e quindi l'analisi sperimentale del funzionamento di prototipi di componenti innovativi costituenti il sistema integrato in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale.

“Evoluzione tecnologica di un accumulo termico del tipo a cambiamento di fase (Phase Change Material)”: durante l'attività di ricerca svolta nella precedente annualità, grazie all'utilizzo di una schiuma solida, è stata sensibilmente migliorata la conducibilità del PCM, il cui basso valore si è dimostrato il limite fondamentale all'efficienza del sistema di accumulo termico. In questa annualità sono stati studiati ulteriori miglioramenti di questo parametro, ottenuti intervenendo sulla porosità e sulla composizione della schiuma: quella di carburo di silicio (SiC) nei precedenti test aveva mostrato un buon aumento della conducibilità, ma non ancora sufficiente. Sono stati quindi analizzati gli effetti di altre grandezze, quali il calore specifico e la densità, valutando gli ulteriori miglioramenti apportabili al materiale. Infine sono stati valutati interventi sulla geometria del sistema, che hanno reso più conveniente l'utilizzo dei PCM.

L'adozione di un contenitore di tipo anulare (due tubi concentrici con passaggio dell'acqua anche all'interno) per il contenimento del PCM, la sostituzione delle pareti in plastica del contenitore con pareti metalliche (molto più conduttive) e l'ottimizzazione del riempimento (attualmente il 30% della candela è vuoto dopo la prima fusione) sono solo alcune delle principali modifiche valutate. Ciascuno di questi tre interventi ha portato a un sensibile incremento delle prestazioni ed il miglioramento ottenuto dal sistema completo supera abbondantemente quello massimo raggiungibile attra-verso le schiume, rendendo il sistema conveniente per transitori di temperatura con tempi minori di un'ora.



a) Cappa con all'interno il bagno termostato;  
b) blocchetto di schiuma nel contenitore in "coffee bag";  
c) blocchetti di schiuma riempiti di PCM: in alto Cu-10, in basso SiC



Contenitore di tipo anulare per il contenimento del PCM

“Test funzionali ed ottimizzazione delle performance di due prototipi di condizionatore d'aria compatti Solar DEC”. Le attività di ricerca hanno riguardato la prosecuzione del monitoraggio dei due prototipi solar DEC compatti (frescoo: acronimo di FREE Solar COOLing) e l'individuazione delle soluzioni tecniche atte a migliorarne le prestazioni. I dati prestazionali delle precedenti campagne sperimentali 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 è ottenuto da un upgrade di alcuni componenti del sistema di monitoraggio/controllo che hanno comportato un incremento del rendimento di regolazione. Da un esame dei risultati della campagna sperimentale si

evince che il sistema freescoo presenta notevoli vantaggi in termini energetici e 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.

Si sottolinea che le modifiche apportate sul prototipo hanno consentito di ottenere un EER (Energy Efficiency Ratio) incrementato del 48% rispetto al prototipo "base" testato nella precedente annualità ed un consumo medio dell'acqua che è passato dai 224 L/g agli attuali 45 L/g.

### **Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura**

L'attività è stata caratterizzata dall'analisi sperimentale e dalla qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura nella climatizzazione residenziale, commerciale e terziaria, alla produzione di freddo in ambito industriale e alla produzione di calore per alimentare processi co-generativi ad uso industriale. 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 di funzionamento. Dato il grado di accuratezza riscontrato, tali strumenti software potranno essere utilizzati a supporto della progettazione di componenti innovativi sia per la parte ottica sia per la parte termo-fluidodinamica. Come si evince dai risultati ottenuti, dettagliati nel rapporto tecnico specifico (RdS/PAR2014/232), il calcolo delle grandezze termo-fluidodinamiche mediante un'analisi in 3D permette di ottenere



a)



b)

*Impianti sperimentali su cui sono state eseguite le prove in campo dei due prototipi di condizionatore d'aria compatti Solar DEC*

*a) Modello freescoo residential*

*b) Modello freescoo office*

risultati accurati perché elimina le ipotesi semplificative che sono alla base dei modelli bidimensionali precedentemente utilizzati.

Sono state inoltre completate le attività di sviluppo, progettazione e realizzazione di due dispositivi prototipali per la mappatura del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura, caratterizzati sia da ricevitori a geometria cilindrica sia da ricevitori a geometria piana: tali dispositivi consentiranno di acquisire informazioni utili a caratterizzare sperimentalmente le efficienze ottiche di diverse tipologie di concentratori in applicazioni solari termiche nei settori civile ed industriale.



*Prototipo di dispositivo durante la fase di assemblaggio e verifica funzionale*

## Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione

“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”. Il principale vantaggio dell’uso dell’eiettore va individuato nel recupero del lavoro di espansione normalmente perduto nel processo di laminazione effettuato in una normale valvola di espansione. L’uso dell’eiettore è inoltre particolarmente adatto all’impiego in macchine a R744, usualmente funzionanti con cicli transcritici, caratterizzati da elevate differenze di pressione ai capi dell’organo di laminazione. Un eiettore presenta i vantaggi di un basso costo, assenza di parti in movimento, struttura semplice e bassi costi di manutenzione. Inoltre il suo utilizzo comporta una ridotta complicazione impiantistica, che conduce ad una miglior ottimizzazione del flusso del refrigerante



Prototipo PDC ad R744 reversibile (caldo/freddo) dotato di un eiettore: potenzialità 30 kW



Gruppo multi-eiettore

Area di ricerca: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica  
Progetto C.3: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione  
Referente: Nicolandrea Calabrese, [andrea.calabrese@enea.it](mailto:andrea.calabrese@enea.it)

e ad un incremento delle prestazioni degli altri componenti del circuito (in particolare evaporatore e compressore). I vantaggi dell’eiettore si riscontrano sia nel funzionamento come macchina frigorifera che in pompa di calore, in quanto l’effetto termodinamico ultimo del suo impiego risiedono in un incremento della capacità frigorifera (incremento del salto entalpico utile all’evaporatore) e in una riduzione del lavoro di compressione, che viene virtualmente svolto dall’energia recuperata nell’eiettore dall’espansione del refrigerante proveniente dal ramo di alta pressione.

La macchina testata è caratterizzata da un alto grado di innovazione: in particolare, è stato dimensionato un gruppo eiettori che dovrà 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 preliminari e che potranno essere migliorati considerevolmente anche senza modifiche strutturali alla macchina, ma semplicemente settando al meglio alcuni fondamentali parametri di funzionamento.

## Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati

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)”.



## Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Obiettivo generale dell'insieme di attività previste dal Piano Annuale di Realizzazione 2014-2015 permane quello di contribuire ad incrementare l'efficienza energetica complessiva della mobilità elettrica, di persone e merci, attraverso lo sviluppo e la sperimentazione di prodotti hardware e software. In particolare sono condotte a termine le attività del progetto elettromobilità previste nel triennio 2012-2014.

Nella aspettativa di una reale mobilità ad "impatto zero" non possiamo basarci esclusivamente sul veicolo, ma occorre aggiungere 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.

Questa considerazione trova riscontro nello sviluppo del mercato dell'elettrico "puro" che, grazie all'affidabilità e all'economia di esercizio di alcuni modelli, come la Nissan Leaf (che rappresenta il 58% del mercato americano dell'elettrico), sta imponendo un passo più veloce anche allo sviluppo delle infrastrutture necessarie per l'elettromobilità, a partire dalle colonnine di ricarica.

Questo quadro viene ribadito dalla recente pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale del DPCM relativo al "Piano infrastrutturale per i veicoli alimentati ad ener-

gia elettrica" (PNIRE) dove, testualmente, "l'aggiornamento del Piano dovrà incentrarsi sui seguenti temi:

a) strategia al 2030 secondo i nuovi obiettivi UE concernenti la riduzione dei gas ad effetto serra, l'incremento delle fonti energetiche rinnovabili ed il

miglioramento della qualità dell'aria ambiente;

b) uso dell'energia elettrica per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica con priorità di provenienza da fonti rinnovabili, attraverso una corretta modalità di gestione delle reti".

Quindi il quadro di ri-

ferimento si delinea su alcuni aspetti relativi alle infrastrutture di ricarica, estese anche a valutazioni di costo "end-of-life" delle batterie utilizzate con modalità di gestione a ricarica rapida, e alle interazioni tra la rete della mobilità e la rete energetica nazionale.

### OBIETTIVI

Gli obiettivi specifici si sono incentrati sulle infrastrutture di ricarica sia nella dimensione tecnologica che in quella di organizzazione ed erogazione del "servizio" di ricarica. Obiettivi in linea con quanto indicato dal PNIRE per gli aspetti di definizione delle infrastrutture (tecnologia), per il dimensionamento territoriale (numerosità) ed il loro posizionamento geografico (ottimizzazione).

Infatti il successo dell'elettromobilità è fortemente dipendente dall'abbattimento delle barriere derivanti dai tempi di ricarica e dalla diffusione delle stazioni di ricarica.

Questo è possibile organizzando le infrastrutture anche attraverso soluzioni differenziate integrando sistemi di accumulo stazionario e fonti rinnovabili.



Le proposte della 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 efficiente delle infrastrutture al servizio dell'elettromobilità.

## **RISULTATI**

### **Ricarica contactless**

Le tecnologie di ricarica "contactless", sono riconosciute essere in grado di facilitare l'uso "corrente" dei veicoli elettrici ed ibridi plug-in. In questa attività si distinguono due linee operative: 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 elettromagnetici irradiati in prossimità dei sistemi contactless. In questo caso lo scenario è uno scenario reale realizzato attraverso un sistema di ricarica contactless tipo "commerciale" a 3,7 kW installato su una Nissan Leaf. 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).

### **Stazione di ricarica rapida integrata con accumulo elettrico stazionario e fonti rinnovabili non programmabili**

I sistemi di conversione dell'energia multi-sorgente sono in grado di minimizzare, attraverso l'utilizzo di un sistema di accumulo elettrico e un generatore fotovoltaico, l'impatto delle ricariche veicolari sulla rete di alimentazione in termini di energia, potenza e di power quality. La piattaforma numerica consente di gestire le fonti di energia della stazione di ricarica ricercando il migliore piano di ammortamento dell'investimento iniziale dell'impianto. A completamento delle attività la piattaforma numerica di progettazione è stata potenziata con l'integrazione del V2G nella piattaforma e si è implementato il controllo real-time per l'ottimizzazione al variare delle condizioni operative. Tramite l'individuazione dell'andamento della percorrenza giornaliera media e le

misure di consumo su strada, attraverso l'analisi delle percorrenze reali, si è determinato il profilo di carico che potesse rappresentare una reale situazione di richiesta in una particolare zona della città. Il profilo di potenza istantanea è ricavato per il mercoledì (giorno tipo in genere per le analisi delle reti elettriche). Il profilo mostra la distribuzione giornaliera della potenza alla stazione di ricarica con una richiesta prevalentemente giornaliera per ridursi al minimo dopo le ore 24. I test hanno confermato le prestazioni del sistema di ricarica multi-sorgente evidenziando la collocazione ottima anche sotto il profilo del ritorno economico.

### **Effetti della ricarica rapida sulle batterie**

Indagine sperimentale sugli effetti da prodotti dalla ricarica rapida, 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. Le prove vita sono eseguite su moduli Li-FePO<sub>4</sub> 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 a 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.

È 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 km, che nei pochi minuti di sosta al capolinea carica le batterie



*Sistema di ricarica senza contatto*



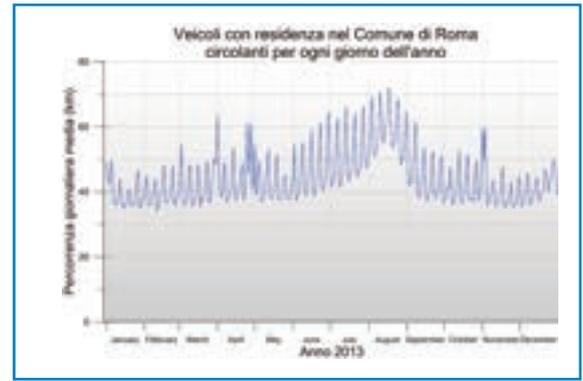
Sistema di ricarica senza contatto: bobina Rx

per la quantità di energia necessaria a compiere il percorso. 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.

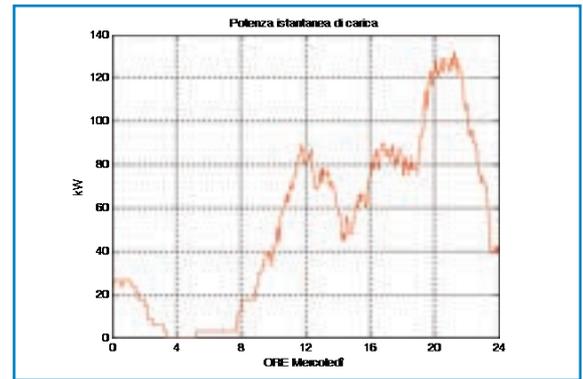
### La distribuzione delle infrastrutture per l'elettromobilità in ambito urbano

Metodologia di valutazione della numerosità e dislocazione utile delle aree di ricarica all'interno della rete stradale urbana in relazione ai consumi energetici dei mezzi a trazione elettrica, in un'ottica di medio termine. Questa metodologia è utile per il gestore della rete elettrica per programmare gli interventi necessari per l'implementazione delle strutture (potenziamento delle linee, accumuli elettrici nelle sottostazioni ecc.) con vantaggi all'utente finale che potrà avere garanzia di rifornimento. Il focus dello 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'utenza, 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. L'analisi utilizza una grande quantità di dati raccolti su strada. 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.

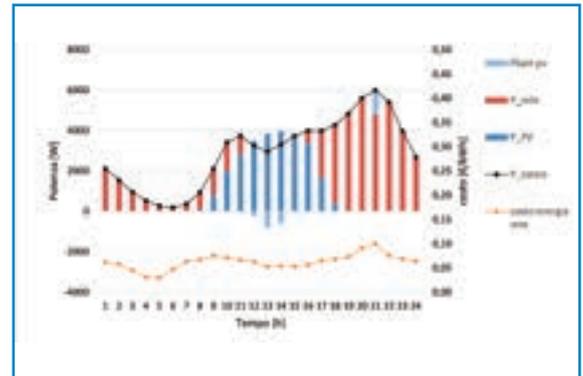
Essi rappresentano un dato significativo dell'andamento del traffico urbano, coprendo circa il 6% del parco vetture circolante all'epoca del rilevamento.



Percorrenze giornaliere



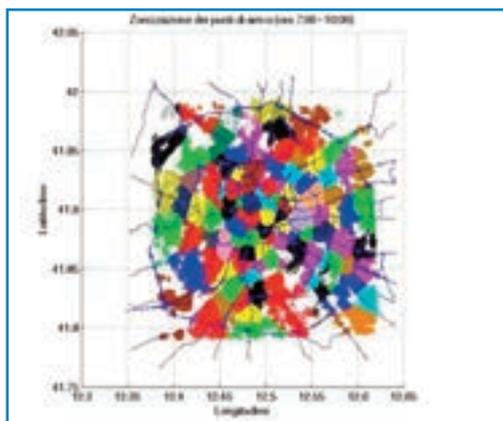
Profilo potenza istantanea di ricarica



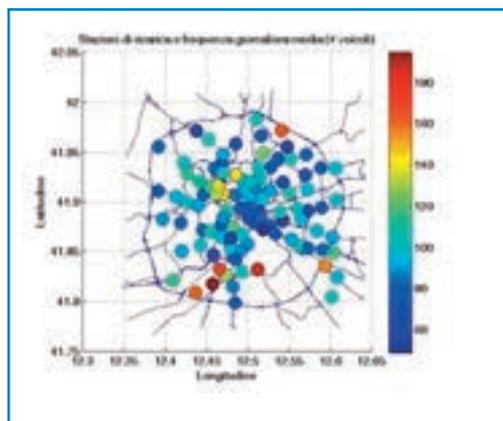
Distribuzione delle potenze medie delle sorgenti

Una opportuna tecnica di analisi di tipo statistico (la Cluster Analysis) è stata applicata alla distribuzione geografica dei punti di sosta entro il GRA 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. Il modello sarà 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. Per ciascuna zona identificata dalla Cluster Analysis si è provveduto a determinare la quota energetica elettrica spesa dal campione per arrivare dai suoi vari

punti di origine al punto di sosta tramite due modelli empirici di consumo per le vetture scelte, appositamente sviluppati.



Risultato della Cluster Analysis

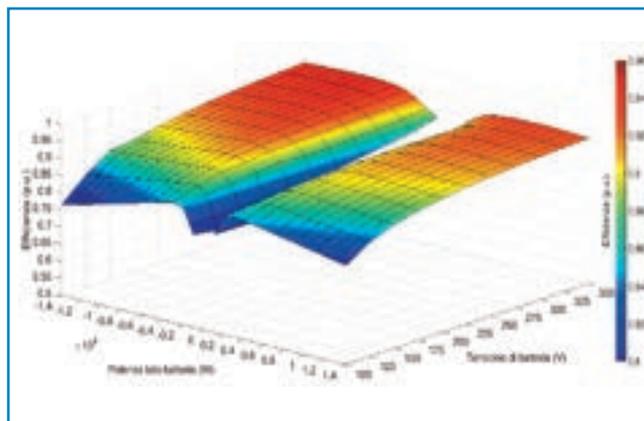


Affluenze per ciascuna zona

## V2G gli aspetti di rete e di interfaccia di potenza: impatto sul sistema di accumulo

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 a bordo veicolo come una fonte di stoccaggio distribuito dell'energia elettrica. Questa attività è 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 questo quadro le attività sono state rivolte alla validazione, per mezzo di prove di laboratorio, dello strumento di calcolo sviluppato. In particolare, le misure sperimentali hanno determinato le mappe di efficienza energetica del convertitore e di accumulatori al litio da trazione stradale. Le mappe di efficienza energetica rilevate 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.



Mappa di efficienza determinata sperimentalmente per il convertitore prototipale

## Comunicazione e diffusione dei risultati

L'attività ha riguardato la partecipazione attiva ad alcune iniziative internazionali sui veicoli elettrici ed ibridi, 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). Le principali partecipazioni a gruppi di lavoro internazionali hanno riguardato:

- EVI (Electric Vehicle Initiative)
- Implementing Agreement "Hybrid and Electric Vehicle Technologies" (IA-HEV) dell'International Energy Agency (IEA)
- AVERE
- CEI CT69

Area di ricerca: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Progetto C.4: Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità-

Referente: A. Genovese, antonino.genovese@enea.it



**ENEA**

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



*Ministero dello Sviluppo Economico*