



ENEA

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



Ministero dello Sviluppo Economico

**Accordo di
Programma MSE/ENEA
2012-2014**

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

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

Febbraio 2014

Edito dall'ENEA – Servizio Comunicazione
Revisione testi: Antonino Dattola
Copertina: Cristina Lanari
Stampato presso il Laboratorio Tecnografico ENEA – Frascati
Finito di stampare nel mese di marzo 2014

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 CO₂ 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

La richiesta di sistemi di accumulo nelle reti elettriche cresce di pari passo con l'evoluzione tecnica ed economica del sistema di generazione, distribuzione e usi finali dell'energia elettrica. La necessità di garantire un maggiore controllo delle fasi di produzione, con l'introduzione massiva di fonti energetiche rinnovabili per loro natura intermittenti, e soddisfare la domanda di energia, anche nell'ottica di un mercato aperto e libero dell'energia elettrica, rendono le tecnologie dell'accumulo sempre più indispensabili per migliorare il rendimento, la gestione, la qualità e ridurre i costi dell'energia elettrica prodotta e utilizzata.

Meritano immediato interesse i sistemi di accumulo per applicazioni alla generazione distribuita e alle smart grid, con prevalenza per l'accumulo elettrochimico (con sistemi a base di litio ma anche con sistemi redox a flusso e ad alta temperatura che dovrebbero risultare più competitivi nelle varie applicazioni) e per quello dell'idrogeno, con l'obiettivo di accelerare l'individuazione di soluzioni più rapidamente applicabili e, in alcuni casi, particolarmente interessanti e competitive. È opportuno valutare anche la fattibilità tecnica ed economica di soluzioni completamente innovative come gli SMES (accumulo in magneti superconduttori) e i sistemi integrati per la generazione, l'accumulo e l'utilizzo dell'idrogeno. Inoltre è necessario promuovere a livello industriale le batterie al litio e valutare in condizioni di reale utilizzo le soluzioni più convenienti da un punto di vista tecnologico ed economico, sia per l'utente finale che per il settore industriale e il

gestore/fornitore del servizio, in linea con quanto previsto dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale.

L'accumulo di energia è considerato da circa un secolo come uno dei principali sistemi in grado di aumentare la flessibilità e l'efficienza delle reti elettriche. I sistemi di accumulo presentano numerosi vantaggi in relazione alle molteplici funzioni che sono in grado di svolgere nell'intero sistema elettrico, giacché possono essere utilmente collocati a livello del sistema di generazione (impianti multiMW) e della rete di trasmissione

e distribuzione fino agli usi finali, con un posizionamento economicamente ed energeticamente conveniente da ambo i lati del "contatore". Nel caso specifico della crescente integrazione delle fonti rinnovabili nelle reti elettriche, l'uso dei sistemi di accumulo può significativamente migliorare le prestazioni tecniche ed economiche delle smart grids in cui tali sistemi sono inseriti. In tal caso, ci sono altre funzioni, aggiuntive a quelle già note (power quality, peak shaving, regolazioni di tensione o frequenza ecc.), che i sistemi di accumulo possono svolgere per rendere ancora più favorevole l'utilizzo delle fonti rinnovabili.

La forma più diffusa di accumulo dell'energia elettrica (non però per le reti elettriche), particolarmente indicata per applicazioni di alta potenza e di bassa energia, è certamente quella elettrochimica (batterie e supercondensatori). Diverse soluzioni sono state proposte e utilizzate, ma sono necessarie ulteriori attività di ricerca e di validazione sperimentale in ap-



plicazioni reali alle reti elettriche con fonti rinnovabili, in modo da coprire diverse taglie di applicazioni e differenti funzioni. Le batterie più interessanti sono attualmente, oltre a quelle ormai convenzionali al piombo e alcaline, quelle al litio, ad alta temperatura e a flusso.

Oltre a questi sistemi, nel corso del triennio si vuole studiare e possibilmente sviluppare altri metodi di accumulo innovativi che riguarderanno l'utilizzo dell'idrogeno, con l'analisi preliminare dell'intera filiera dalla produzione, all'accumulo fino al riutilizzo finale, ed eventualmente sistemi più avanzati, quali gli SMES.

Sono state avviate importanti attività di studio su sistemi di accumulo alternativi sia di tipo elettrochimico (batterie redox a flusso e metallo – aria) che basati sull'idrogeno e sui magneti superconduttori, per meglio sostenere i programmi di sviluppo della rete e dell'industria associata.

Infine si vogliono aumentare le attività di ricerca relative agli aspetti ambientali e di sicurezza, cercando di intervenire e di proporre soluzioni migliorative all'intera filiera dalla produzione alle fasi di utilizzazione e riciclaggio finale dei vari sistemi di accumulo. Nella fase di ricerca e produzione si sceglieranno sempre più materiali con ridotto o nullo impatto ambientale; inoltre si amplierà la verifica sperimentale della possibilità di garantire una "seconda vita applicativa nelle reti" alle batterie usate nei veicoli elettrici.

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 na-

zionali, 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. Inoltre, l'ENEA è da anni impegnata in progetti europei (tra gli altri, ASTOR, SCOPE, LIBERAL, ILHYPOS, ILLIBATT, HELIOS, HCV) per la ricerca, lo sviluppo e la caratterizzazione di batterie al litio per applicazioni prevalentemente mobili. L'ENEA rappresenta l'Italia nell'alleanza europea EERA e partecipa a iniziative dell'IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia).

OBIETTIVI

L'obiettivo generale di questo progetto è la ricerca, la realizzazione e la verifica sperimentale, di sistemi di accumulo elettrico con prevalenza per quelli di tipo elettrochimico basati sul litio e quelli ad alta temperatura e redox a flusso. Particolare attenzione è data all'integrazione tra i sistemi di accumulo e le fonti rinnovabili. Il raggiungimento dell'obiettivo si basa su un approccio sistemico che consenta di sviluppare non solo le batterie al litio, ma anche le tecnologie di integrazione e interfaccia con la rete, nell'ottica di un notevole incremento delle fonti rinnovabili intermittenti e, eventualmente, dell'introduzione di una crescente flotta di veicoli a trazione elettrica.

Infine, la ricerca di nuovi materiali e sistemi per l'accumulo include un'attenta analisi, anche sperimentale, degli aspetti ambientali, cercando di intervenire e di proporre soluzioni migliorative all'intera filiera, dalla produzione delle batterie al litio alle fasi di utilizzazione e riciclaggio finale. Nella fase di ricerca e



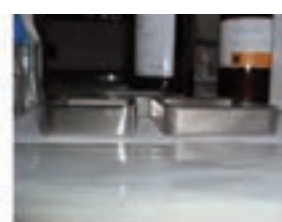
1. Miscelatore utilizzato nella miscelazione materiale attivo/carbone



2. Mulini utilizzati nella preparazione dello slurry



3. Giare in teflon utilizzate nella preparazione dello slurry



4. Ottavini a fessura calibrata utilizzati nelle stese dell'elettrodo



5. Stesa dell'elettrodo



6. Essiccamento sotto la cappa



7. Calandra



8. Elettrodi pronti per il montaggio in batteria

Processo di preparazione degli elettrodi di celle al litio

produzione si sceglieranno materiali con ridotto o nullo impatto ambientale, mentre durante e alla fine dell'uso delle batterie al litio si vuole valutare sperimentalmente la possibilità di garantire una "seconda vita applicativa nelle reti" alle batterie usate nei veicoli elettrici. Lo studio degli aspetti ambientali e di sicurezza potrà essere esteso a tutte le tipologie di accumulo potenzialmente promettenti per le reti elettriche.

RISULTATI

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

L'attività ha riguardato la realizzazione e la caratterizzazione di celle complete al litio-ione, opportunamente progettate in scala da laboratorio e in taglia significativa (circa un centinaio di mAh), per la verifica delle prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale dei nuovi materiali anodici e catodici più recenti e innovativi. In parallelo, è proseguita l'attività di ricerca, in collaborazione con le Università di Camerino e Bologna, su materiali anodici e catodici innovativi, a base di silicio, titanio, grafene, manganese in grado di migliorare le prestazioni e, soprattutto, di ridurre i costi di acquisto e operativi delle batterie al litio, senza peraltro dimenticare gli aspetti ambientali e di sicurezza nella scelta dei materiali e nelle condizioni operative



Celle ENEA litio-ione da circa 75 Ah pronta per le prove

di uso.

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

Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio

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

Sono state inoltre completate le attività di studio e sperimentazione, in collaborazione con le Università di Palermo e Pisa, sulle logiche di gestione e interfaccia dei sistemi di accumulo in rete con impianti a fonti rinnovabili e sulle potenzialità applicative dell'accumulo in utenze particolari, quali la metropolitana leggera di Bergamo e un'utenza domestica con fonti rinnovabili.

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

Le attività di ricerca sono state estese ad altri sistemi di accumulo elettrichimico e chimico, alternativi a quelle litio-ione. In particolare sono state avviate attività di ricerca, in via esplorativa, su sistemi metallo-aria e su sistemi redox a flusso. La scelta è motivata dall'enorme crescita delle prestazioni che si prevede possano ottenersi con i sistemi metallo-aria, mentre le batterie redox a flusso sono già prossime alla commercializzazione, anche se necessitano ancora di miglioramenti nella scelta dei materiali e nell'ottimizzazione del funzionamento. Pertanto le attività hanno riguardato una prima valu-

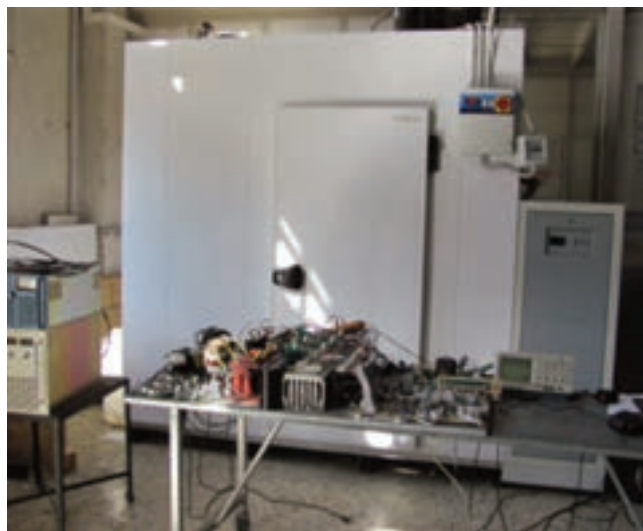
tazione dei materiali e dei sistemi più innovativi, con particolare attenzione alla membrana delle celle redox e all'elettrodo gassoso, e dei metalli più promettenti delle celle metallo-aria. Inoltre, riguardo all'uso dell'idrogeno come accumulo chimico dell'energia elettrica, l'attività si è concentrata nell'analisi di fattibilità comparativa di diversi metodi, con lo scopo di valutarne la convenienza sia tecnica che economica. Le conclusioni raggiunte anche sperimentalmente hanno fornito elementi utili per selezionare i sistemi più promettenti nel breve e medio termine.

Studio di sistemi di accumulo avanzati basati su magneti superconduttori

Le attività riguardanti i sistemi di accumulo in magneti superconduttori (SMES) sono state incentrate nell'individuazione e nell'acquisizione di due materiali superconduttori, e la loro successiva caratterizzazione sperimentale in termini di proprietà di trasporto alle basse temperature, per selezionare il materiale più adatto ad essere utilizzato in un prototipo dimostrativo. È stata inoltre fatta una progettazione di massima di un prototipo in MgB_2 da 1 MJ.

Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

Le attività hanno riguardato la partecipazione a diverse iniziative internazionali, fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni mobili e stazionarie. È proseguita la partecipazione alle attività dell'International Energy Agency (IEA) su "Energy Conservation through Energy Storage" e "Hydrogen". Si è intensificata la partecipazione all'alleanza europea EERA, contribuendo principalmente al tema "Energy storage" e marginalmente a quello sulle "Smart Grid". Infine, si è partecipato alle collaborazioni scientifiche e tecnologiche sull'accumulo, promosse dal circuito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica a livello europeo) con l'azione MP1004 "Hybrid-ES – Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications".



Camera climatica di prova per la batteria al litio



Criostato equipaggiato con magnete superconduttore da 14 T



Contro criostato per misure in azoto liquido

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

Le biomasse, una risorsa energetica ben distribuita e spesso ampiamente disponibile a livello locale, possono essere trasformate in energia o combustibili mediante diverse tecnologie. In particolare, le biomasse fermentescibili possono essere convertite in biogas tramite il processo di digestione anaerobica (DA), mentre quelle legnose possono essere utilizzate come combustibili o gassificate per ottenere syngas.

Il biogas e il syngas possono essere impiegati in sistemi cogenerativi di piccola taglia (potenza massima di qualche centinaio di kW), per la produzione distribuita di energia elettrica e calore. Il biogas, se sottoposto a opportuni trattamenti di purificazione e rimozione della CO₂, può anche essere immesso nella rete di distribuzione del gas naturale. Anche il syngas, dopo adeguati processi di pulizia, può essere utilizzato per la produzione di biocombustibili liquidi (BTL) o gassosi (SNG) mediante specifici processi di conversione catalitica.

I sistemi cogenerativi devono basarsi su impianti affidabili, di facile gestione e competitivi, e il loro sviluppo richiede l'ottimizzazione dei processi di produzione e purificazione del gas, la messa a punto di tecnologie di cogenerazione ad elevata efficienza e l'integrazione tra i vari sottosistemi. La produzione di biometano richiede invece l'ottimizzazione dei processi di DA e lo sviluppo di sistemi di trattamento che consentano di ottenere un gas combustibile della qualità necessaria per l'immissione in rete.

Nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, l'ENEA ha condotto numerose attività di ricerca e

sviluppo tecnologico nel campo dei processi di produzione del biogas e delle tecnologie per il clean-up e l'upgrading del biogas e del syngas, con l'obiettivo di arrivare alla loro validazione in impianti pilota, su cui testare processi, materiali e componenti innovativi.



OBIETTIVI

L'obiettivo principale del progetto è contribuire alla messa a punto di sistemi per la valorizzazione energetica delle biomasse, sia incrementando la produzione di biogas ottenibile, sia migliorando l'efficienza di trasforma-

zione di uno spettro più ampio di matrici organiche (uso di biomassa algale, scarti e residui lignocellulosici, specie vegetali coltivabili in terreni marginali), da utilizzare per la co-generazione di elettricità e calore in sistemi decentralizzati di piccola-media taglia o, previo un opportuno trattamento di clean-up e upgrading, per l'immissione come biometano nella rete nazionale di distribuzione.

L'obiettivo include l'ottimizzazione di sistemi di cogenerazione pre-commerciali ad elevato rendimento basati sulla tecnologia della gassificazione, anche con acqua in condizioni supercritiche, o della combustione in dispositivi innovativi (caldaie a sali fusi) per disporre in prospettiva di vettori energetici ad alta temperatura, anche oltre i 450 °C, con valutazioni di cicli termodinamici innovativi per incrementare sia le rese elettriche che quelle cogenerative. Un altro obiettivo è quello di ridurre i livelli di emissioni del particolato fine dagli impianti di combustione di biomasse solide di piccola-media taglia, individuando

nuovi sistemi di abbattimento basati su processi di rimozione catalitici dei suddetti inquinanti.

RISULTATI

Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili

Le attività svolte si possono sintetizzare in sei punti. Il primo ha visto lo sviluppo, la verifica e il potenziamento di funzionalità della piattaforma web A.I.D.A. (Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants, <http://aida.casaccia.enea.it/aida/default.asp>). Un secondo punto ha riguardato la sperimentazione sull'impianto pilota DMM6000® di processi di codigestione anaerobica di differenti miscele di matrici organiche, incluse alcune tipologie di rifiuti e biomasse prodotte da colture dedicate, al fine di valutare l'incremento della velocità e dell'efficienza di trasformazione di diversi substrati. Il terzo punto ha visto lo sviluppo e la sperimentazione in reattori da laboratorio di processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano e miscele di metano e idrogeno mediante l'ottimizzazione delle condizioni di reazione sia della fase idrolitica/acidogenesi che della metanogenesi e/o produzione di idrogeno.

Il quarto punto riguardava prove sperimentali di pretrattamenti chimico-fisici o biologici di substrati con elevato contenuto di materiale lignocellulosico o biomasse algali, con valutazione dell'effetto di tali pretrattamenti sulla successiva fase di degradazione microbica per la produzione di biogas. Un quinto punto consisteva nello studio e valutazioni comparative di sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di DA, per ridurre il contenuto in nutrienti degli effluenti liquidi e massimizzare la produzione di biomassa algale da riciclare nei reattori di DA. Il sesto punto ha riguardato l'esecuzione di prove sperimentali di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di biomasse ad elevato tenore di umidità con un dispositivo sperimentale in scala laboratorio reso idoneo a operare a

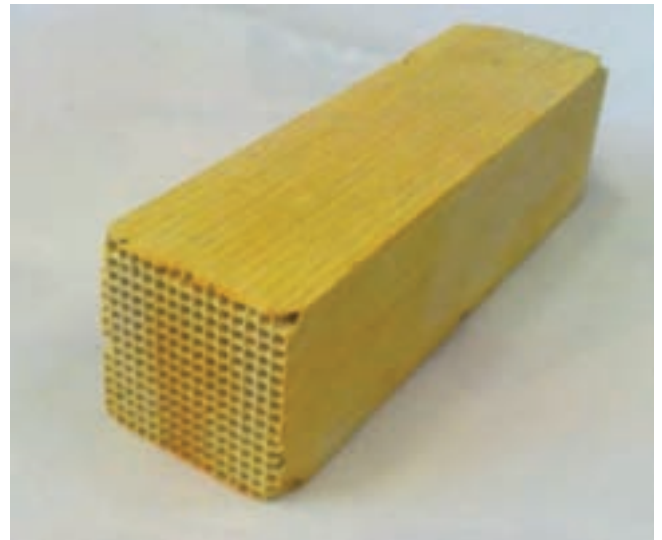


Sacchi di coltura

temperature superiori ai 500 °C.

Sviluppo dei sistemi di clean-up e upgrading dei biocombustibili e di riduzione dell'impatto ambientale

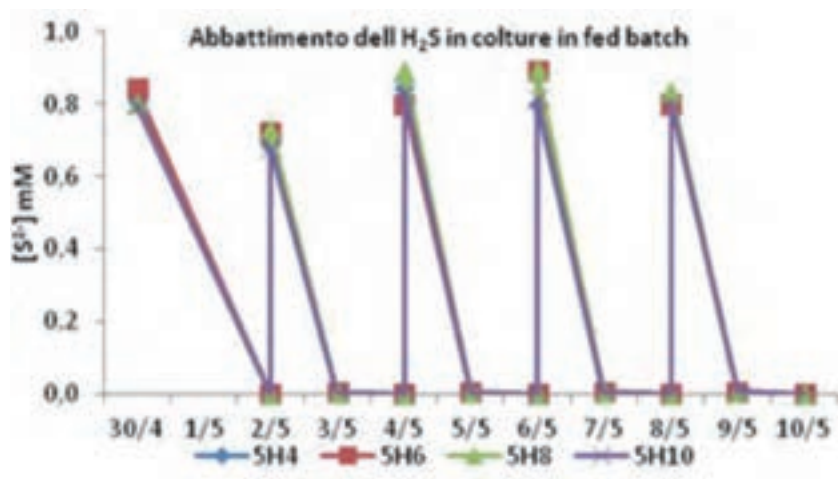
Le attività hanno riguardato in primo luogo lo studio, la sperimentazione e la caratterizzazione di un supporto strutturato a base di cordierite su cui è stato depositato con due metodi differenti un catalizzatore con carichi diversi di V_2O_5 . Il catalizzatore, da utilizzare per la desolforazione del biogas in un apposito reattore, è caratterizzato da una struttura a nido d'ape in configurazione "through-flow", con 225 canali e uno spessore medio di washcoat pari a 130 micrometri.



Catalizzatore strutturato per reattore pilota ENEA

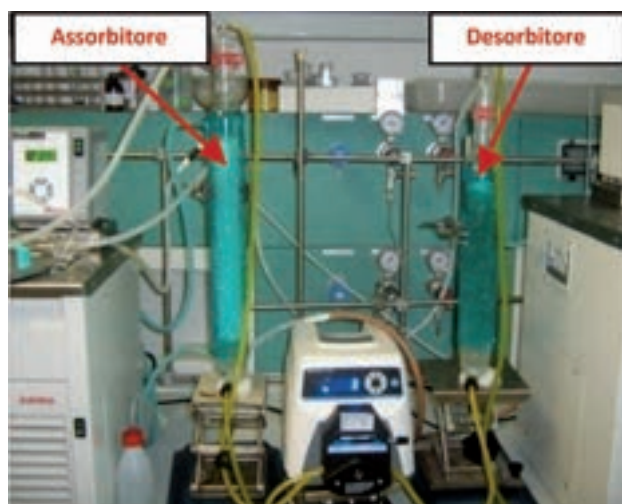
Un secondo studio ha riguardato l'abbattimento di H_2S presente nel biogas mediante un processo di fotosintesi anossigenica operato dal solfobatterio *Chlorobium limicola*. I risultati ottenuti hanno evidenziando una notevole riduzione nei tempi di abbattimento, visto che in tutti i casi già dopo 24 ore il contenuto di H_2S è fortemente ridotto ($< 0,006$ mM nella fase liquida, < 57 ppm nello spazio di testa), mentre l'abbattimento totale si ottiene nell'arco di tempo di due giorni.

È continuata, inoltre, l'attività di verifica dei sistemi di separazione della CO_2 mediante l'uso di membrane polimeriche commerciali, mentre lo studio teorico e la sperimentazione in laboratorio di sistemi innovativi per la rimozione della CO_2 dal biogas sono stati indirizzati sull'impiego di ammine in solvente organico e sulla formazione di idrati.



Trend di abbattimento dell'H₂S da parte di colture fed batch

Nel primo caso l'efficienza di assorbimento di CO₂ è risultata del 91-96%, impiegando i parametri operativi migliori, e la stabilità termica delle ammine impiegate nei cicli è elevata, mentre nel secondo dai risultati ottenuti emerge che la possibilità di effettuare l'upgrading del biogas a biometano mediante la formazione di gas idrati sembra essere ben supportata, perché con soli 2 stadi di separazione si può ottenere una frazione del gas con un rapporto CH₄/CO₂ pari a 92/8, partendo da una composizione iniziale di 60/40.



Sistema di assorbimento e desorbimento di CO₂ in continuo

Sono state inoltre eseguite sperimentazioni di upgrading e conversione del syngas prodotto dalla gassificazione di biomasse lignocellulosiche con un dispositivo per la rimozione della CO₂ mediante adsorbimento con sorbenti solidi commerciali e impiego di catalizzatori su supporti in materiale ceramico per l'ottimizzazione del processo di produzione di metano di sintesi sull'impianto pilota di metanazione BIOSNG.

Infine, per la rimozione del particolato fine (<10 micron) presente nelle emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida, si è proceduto allo sviluppo, realizzazione e verifica di funzionalità di prototipi da laboratorio di sistemi di filtrazione ceramici attivati.

La sperimentazione ha dimostrato che la tecnologia wall-flow può essere applicata efficacemente anche per la pulizia dei fumi della combustione della biomassa solida, in cui il particolato è essenzialmente formato da particelle

<1 micron, per cui i filtri wall-flow dovrebbero essere costituiti da materiali con dimensione dei pori >1 micron, come ad esempio il carburo di silicio.



Stazione di controllo BIOSNG



Colonna di derivazione dei fumi e forno tubolare

Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica

La prima attività di ricerca svolta riguarda lo studio e la caratterizzazione termo-fluidodinamica di miscele di sali fusi e la definizione dei parametri progettuali per il dimensionamento di caldaie alimentate con biomassa lignocellulosica.

Riguardo lo studio dei tipi di sali usati come vettore termico si può concludere che due miscele ternarie possono essere oggetto di sperimentazione come possibili fluidi termovettori per caldaie a biomasse:

1. La miscela contenente nitrato di litio ($\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3/\text{LiNO}_3$ nella percentuale in peso di 18/52/30), sicuramente più costosa, ma le cui quantità di utilizzo potrebbero non incidere in maniera significativa sul costo totale di un impianto.

2. La miscela Na-K-Ca, che presenta un costo sensibilmente inferiore rispetto alla precedente, pur con un punto di inizio congelamento paragonabile.

Studiando la caldaia, gli aspetti presi in considerazione sono quelli termodinamici, fluidodinamici, termofisici e reologici introdotti dall'impiego dei sali fusi come fluido termico. Sono state individuate le sezioni sottoposte a maggiore sollecitazione e sono state valutate le temperature delle superfici metalliche più a rischio, sottoposte ai fenomeni di ossidazione-erosione a caldo.

È stata effettuato anche uno studio sulla definizione e l'analisi dei cicli termodinamici di fluidi in grado di operare a temperature superiori a quelle attualmente in uso (NORC), al fine di avere sistemi energetici più performanti di quelli basati su soluzioni di fluido organico comunemente utilizzate.

L'analisi svolta ha evidenziato i significativi vantaggi ottenibili operando a temperature più elevate rispetto i valori usuali. In particolare si è:

- individuato il TiCl_4 come potenziale fluido di lavoro che, oltre a possedere la stabilità termica a temperature molto elevate e ad avere costi estremamente contenuti, presenta caratteristiche termodinamiche (punto critico ecc.) ideali per l'accoppiamento con la sorgente termica considerata;
- identificato uno schema di impianto che prevede l'adozione di un ciclo di potenza ipercritico e un circuito intermedio ad olio fra il tetracloruro di titanio e l'acqua destinata al teleriscaldamento;

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

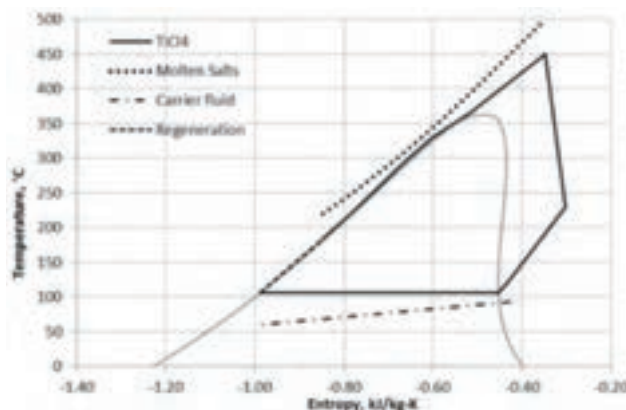
Referente: V. Pignatelli, vito.pignatelli@enea.it

- effettuato il pre-dimensionamento dei principali componenti di impianto, che ha dato luogo a risultati promettenti, basati principalmente su una soluzione innovativa per il recuperatore di calore.

Fra le diverse soluzioni esaminate, le più promettenti portano ai seguenti risultati:

- un rendimento netto dell'impianto NORC dell'ordine del 24-25%, superiore di circa 6 punti (e quindi del 30%) rispetto all'attuale "stato dell'arte"
- costi dell'energia elettrica prodotta dell'ordine di 165-170 €/MWh
- il mantenimento di elevati rendimenti di conversione anche ai carichi parziali, che garantisce una buona elasticità operativa dell'impianto.

Caratterizzazione Impianto C6		
Variabili indipendenti		
P Max	bar	50
T Max	°C	450
T max Sali	°C	500
T min sali	°C	220
Variabili dipendenti		
η Ciclo, lordo	%	29,62
η_{el} Ciclo, netto	%	25,60
Tout Rig	°C	183,21
ΔT hot Rig	°C	105,60
ΔT cold Rig	°C	73,96
UA Rig	kW/K	27,01
UA Primario	kW/K	160,76
ΔT Primario	°C	13,0
UA Cond	kW/K	104,13
Pot scambiatori Rig	kW	751,87
(Vout/Vin)turb	-	116,25
$\Delta h_{s,turb}$	kJ/kg	109,38



*Ciclo termodinamico con pressione massima di 50 bar e temperatura massima di 450 °C
Temperatura sali fusi 500-220 °C
Rappresentazione del ciclo termodinamico*



Energia elettrica da fonte solare Celle fotovoltaiche innovative

SCENARIO DI RIFERIMENTO

L'attività di ricerca punta a innovare alcune delle attuali tecnologie fotovoltaiche (FV) per ottenere dei prodotti che abbiano caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi.

Negli ultimi anni i prezzi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie soprattutto all'incremento della produzione, con la creazione di grandi unità produttive in Asia che ha determinato una diminuzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia solo l'abbassamento di tali costi a valori inferiori a 0,5 €/Wh potrà favorire l'affermarsi di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti.

Le tecnologie fotovoltaiche basate su film sottili di materiale semiconduttore presentano grandi potenzialità di riduzione di costo attraverso il miglioramento delle prestazioni degli attuali moduli a film sottile, superando le difficoltà di alcune tecnologie legate all'utilizzo di materiali scarsamente disponibili, e grazie allo sviluppo di nuovi moduli basati su materiali organici.

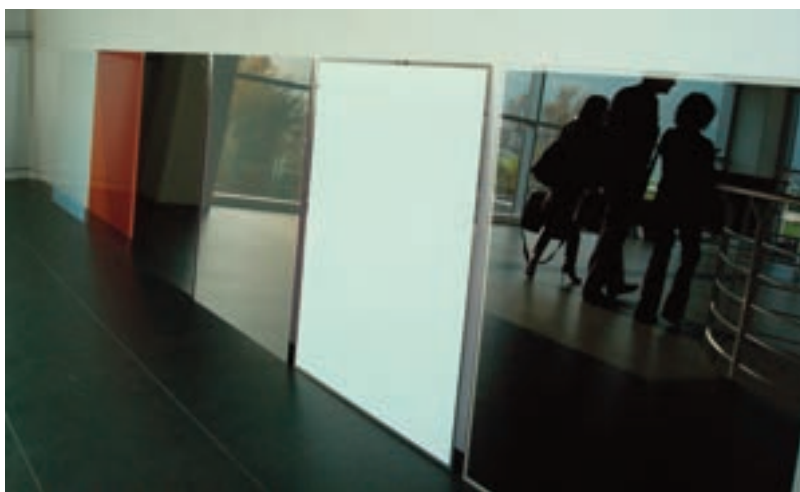
I moduli a film sottile di silicio hanno acquistato un rilievo crescente grazie a una nuova generazione di dispositivi, le cosiddette celle solari a base di silicio "micromorfe", che consentono di ottenere prodotti più efficienti. Questo tipo di dispositivo ha una struttura piuttosto complessa nella quale la geometria del substrato e ciascuno degli strati attivi che la compongono hanno un impatto sull'intero dispositivo. Il miglioramento delle prestazioni e la riduzione dei costi di produzione possono essere ottenuti ottimizzando l'intrappolamento della radiazione solare all'interno

del dispositivo, anche grazie allo sviluppo di nuove architetture di dispositivo, e utilizzando materiali innovativi che consentano di semplificare il processo di fabbricazione. Sempre nell'ottica di utilizzare piccole quantità di silicio e processi a bassa temperatura, è interessante studiare dispositivi a eterogiunzione (a-Si/c-Si) che

utilizzino wafer sottili di silicio cristallino. Anche in questo caso l'architettura del dispositivo è determinante per ottenere un buon assorbimento della radiazione solare.

L'attività sui film sottili policristallini di $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$ parte dall'idea di valutare la possibilità

di sostituire l'indio utilizzato nella tecnologia fotovoltaica a film sottile basata sulla lega CIGS (Copper-indium-gallium-selenide) con coppie di elementi II-IV della tavola periodica, conservando alti valori di efficienza del dispositivo. Questo potrebbe favorire un'espansione del mercato per tale tecnologia, risolvendo i potenziali problemi dovuti alla scarsità dell'indio. L'argomento proposto presenta anche altre potenzialità, visto che la famiglia dei composti $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$ è ancora poco studiata e presenta un intervallo di variabilità delle gap molto ampio. È quindi anche possibile, in linea di principio, utilizzare questi materiali per la fabbricazione di celle a multi-giunzione a basso costo. D'altro canto, lo sviluppo di celle organiche è auspicabile per ottenere dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e l'abbondanza dei materiali precursori. Per dimostrare il potenziale di tale tecnologia per la produzione di energia in applicazioni di potenza è necessario ottenere celle solari con adeguate efficienze di conver-



sione stabili nel tempo. Le attività proposte su tale tema puntano a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi, utilizzando nuovi materiali polimerici che assorbono la radiazione solare in modo più efficiente e modificando l'architettura di cella per ottenere un efficiente trasferimento di carica tra i materiali costituenti lo strato attivo.

OBIETTIVI

Il progetto ha l'obiettivo di promuovere lo sviluppo di tecnologie ritenute potenzialmente interessanti per la realizzazione di moduli fotovoltaici caratterizzati da buone efficienze di conversione e bassi costi di produzione. 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 tecnologie FV a film sottile di materiali semiconduttori, prestando attenzione all'utilizzo di materiali a basso costo, ampiamente disponibili e non tossici. In particolare le attività sono state concentrate sullo sviluppo di celle solari a film sottili inorganici a base di silicio e di film policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) e sullo sviluppo di celle solari organiche.

Nell'ambito delle attività sui film sottili di silicio è previsto lo sviluppo di uno strato innovativo di tipo *p* a base di ossido di silicio microcristallino con caratteristiche migliori in termini di trasparenza rispetto ai tipici film utilizzati. Inoltre, per migliorare l'assorbimento della radiazione solare, si intende implementare soluzioni innovative sviluppate sia per il contatto frontale che per quello posteriore della cella. Riguardo le celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili l'intento è quello di individuare i punti critici di fabbricazione del dispositivo e ottimizzare sia i materiali che i processi per la realizzazione delle varie in-

terfacce. Si lavora all'ottimizzazione del contatto frontale e allo sviluppo di riflettori posteriori e di processi di testurizzazione dei wafer. Sono, inoltre, studiati emitter innovativi di tipo *n* a base di ossido di silicio, grazie anche alle competenze acquisite su tale tipo di materiale negli ultimi anni.

Riguardo allo sviluppo di celle a film sottili policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, a valle di un'analisi delle varie tecniche di crescita del CZTS, si vuole sviluppare un nuovo processo che consenta di ottenere un materiale assorbitore di migliore qualità. Parallelamente si intende investigare una tecnica alternativa per la deposizione del CZTS da soluzioni.

L'attività prevista nell'ambito dello sviluppo di celle fotovoltaiche organiche riguarda sia la sintesi di nuovi materiali polimerici che il loro test come materiali attivi nei dispositivi. Sono sperimentate, inoltre, strutture a elevato grado di ordine da utilizzare per sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali attivi ed è previsto uno studio sulla stabilità di tali dispositivi.

In sintesi gli obiettivi della ricerca sono:

- Sviluppare materiali e architetture di dispositivo per celle solari tandem micromorfe
- Sviluppare TCO ad alta efficienza di confinamento ottico per celle a film sottile di silicio
- Sviluppare celle a film sottile di silicio cristallino
- Sviluppare materiali e celle a film sottili policristallini a base di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.
- Sviluppare celle organiche.



Impianto multicamera utilizzato per la fabbricazione di materiali e celle solari a film sottile di silicio

RISULTATI

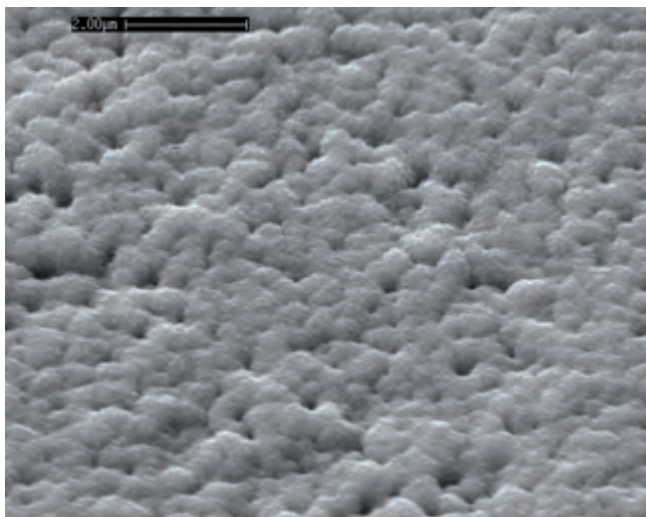
La linea sullo sviluppo di celle a film sottile di silicio ha avuto come primo obiettivo la realizzazione di film drogati di tipo *p* a base di ossido di silicio microcristallino con tecnica PECVD ad alta frequenza. Grazie alle peculiari proprietà ottiche di tali strati innovativi è stato possibile migliorare in termini di corrente di corto circuito le prestazioni della cella.

Sono state poi progettate architetture per migliorare l'assorbimento della radiazione solare e sono stati eseguiti test preliminari di realizzazione di celle solari su tali strutture. Per quanto riguarda la parte frontale della cella, parallelamente allo sviluppo di ossidi trasparenti e conduttivi (TCO) naturalmente testurizzati, sono stati messi a punto processi di strutturazione del vetro, utilizzando due possibili tecniche: la nanostrutturazione auto-organizzata tramite Proiezione Ionica Litografica (IPL) e l'Aluminium Induced Texture (AIT). In entrambi i casi sono stati ottenuti risultati incoraggianti. I dispositivi fabbricati sui substrati nanostrutturati hanno infatti mostrato una migliore risposta spettrale, e quindi una corrente di corto circuito più alta, rispetto a quella misurata sul substrato non trattato. È stata avviata un'attività sulla modellizzazione ottica dei substrati testurizzati con lo scopo di valutare l'influenza della morfologia superficiale sull'intrappolamento della radiazione. Sono stati inoltre progettati riflettori posteriori in configurazione aperiodica, proponendo varie strutture di cella con lo scopo di massimizzare l'assorbimento della luce nei dispositivi. Per verificare la fattibilità e le potenzialità delle strutture proposte è stata avviata una sperimentazione con un sistema di nanolitografia avanzato, quale il Focused Ion Beam (FIB), che

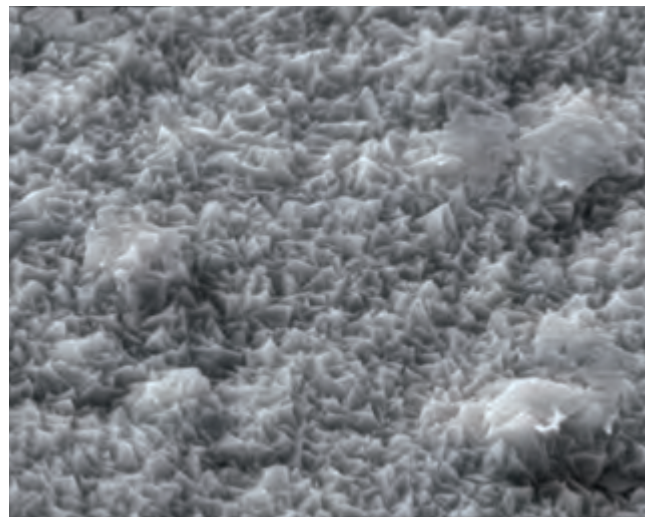
ha consentito di realizzare alcuni prototipi di celle.

Per quanto riguarda la ricerca condotta sullo sviluppo di celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili si è lavorato all'ottimizzazione dell'ossido trasparente e conduttivo frontale, valutando la possibilità di introdurre un multistrato ZnO/Ag/ZnO con idonee caratteristiche ottiche ed elettriche. È continuato il lavoro sullo sviluppo di riflettori posteriori a multistrato in configurazione Bragg ottenuti alternando strati di silicio amorfo e nitruro di silicio e sullo sviluppo di processi di testurizzazione dei wafer. Sono stati ottimizzati emitter innovativi di tipo *n* a base di ossido di silicio che hanno consentito di migliorare la risposta spettrale dei dispositivi nella regione dello spettro solare a basse lunghezze d'onda. Sono stati messi a punto processi di screen printing a bassa temperatura di sintering e a bassa resistività specifica di contatto per la realizzazione di griglie metalliche su diversi tipi di TCO. La massima efficienza misurata sui dispositivi è pari al 15,8%, ma, simulando il comportamento di una cella a eterogiunzione con tutte le migliorie di processo finora prese in considerazione, è stato mostrato che è possibile ottenere efficienze di conversione fotovoltaica maggiori del 22%. Riguardo la realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, il principale obiettivo dell'attività è stato quello di mettere a punto il processo di crescita del CZTS per co-sputtering, effettuando un confronto critico con la tecnica precedentemente utilizzata (evaporazione e-beam).

La tecnica del co-sputtering ha consentito di sviluppare un nuovo processo in cui i tre solfuri metallici (per esempio ZnS, CuS e SnS) vengono depositati contemporaneamente; in tal modo i metalli nei precursori sono distribuiti fin dall'inizio in maniera uniforme e già



(a)



(b)

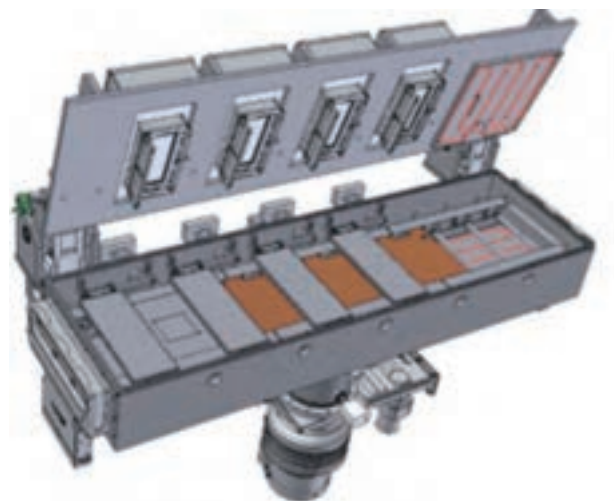
Immagini SEM della morfologia superficiale di un film di ZnO:Ga depositato per sputtering su vetro rugoso (a) e di un film di ZnO:B depositato per MOCVD su vetro rugoso (b).

sostanzialmente solforizzati. A seguito dell'installazione di un nuovo sistema di sputtering per la deposizione dei contatti (Mo, ZnO) è stata necessaria una nuova ottimizzazione dei processi di crescita che ha determinato un miglioramento delle caratteristiche di questi materiali. Il lavoro svolto su tutti i materiali costituenti il dispositivo ha dato risultati molto soddisfacenti, consentendo di ottenere un'efficienza massima sul dispositivo del 5,6%.

Le attività precedentemente svolte sullo sviluppo di celle fotovoltaiche polimeriche ha consentito di ottenere un'efficienza di conversione del 6,3%, utilizzando materiali disponibili in commercio. In questa annualità

sono stati realizzati nuovi materiali polimerici, alcuni dei quali sono stati testati in dispositivi fotovoltaici.

Le efficienze raggiunte sono piuttosto basse rispetto a quelle ottenute con materiali più convenzionali. Tuttavia la sintesi di nuovi materiali è uno tra i temi di ricerca ritenuti strategici nel contesto generale dello sviluppo di celle FV a base organica. Sono state inoltre sperimentate strutture a elevato grado di ordine da utilizzare per sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali organici. Infine è stato avviato anche uno studio sulla stabilità dei dispositivi organici per determinare i fattori che limitano le prestazioni delle celle.



Impianti per il co-sputtering di solfuri binari (configurazione confocale, a sinistra) e per lo sputtering in linea di Mo, ZnO e ZnO:Al (configurazione planare, a destra)



Glove Box per lo sviluppo di celle solari polimeriche in ambiente privo di umidità e ossigeno

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



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 ad un fluido. Questo calore può essere integrato con

altra fonte esterna di energia (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 parabolici 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 SR), da parte di ENEL, dell'impianto da 5 MW "Archimede" integrato con un ciclo combinato a gas. La ricerca sul solare termodinamico ha come obiet-

tivo 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.

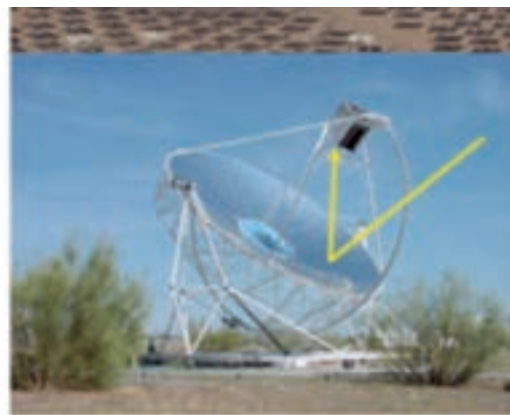
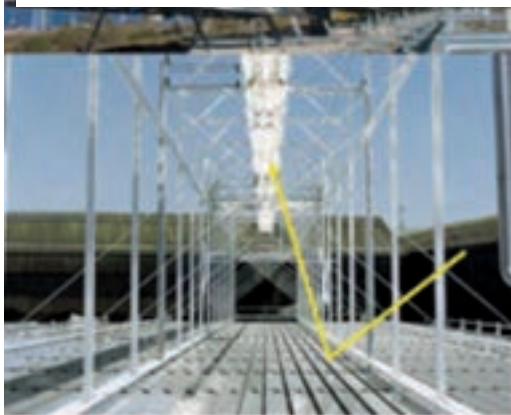
- Lo sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti solari termodinamici di piccola e media

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.

Collettore lineare parabolico



Torre solare



Collettore lineare Fresnell

Disco parabolico



Impianto Archimede (Priolo Gargallo SR)



RISULTATI

Il risultato principale raggiunto è stato quello di sviluppare nuovi coating “solari” per tubi ricevitori, con la sostituzione della consolidata tecnologia del coating a base di strati “cermet” (nano-compositi ceramico-metallici) del tipo “graded” con la più innovativa tecnologia dei “filtri ottici di tipo interferenziale” a partire da stratificazioni di film sottili ceramici e metallici fabbricati con tecnica di deposizione del tipo sputtering opportunamente modificata. A questo scopo è stata apportata una modifica all’impianto di sputtering multicatodo del Centro Ricerche Portici dell’ENEA con installazione di una sorgente a fascio ionico in camera di processo in prossimità ad una delle “stazioni di sputtering”. È stata condotta un’attività di progettazione ottica per la simulazione di una serie di strutture multistrato dielettrico-metallo al fine di valutare i valori massimi teorici dei parametri foto-termici raggiungibili, e lo studio della dipendenza delle prestazioni foto-termiche dalle proprietà ottiche dei materiali utilizzati. Sono stati prodotti dei campioni che costituiranno il riferimento per il processo di ottimizzazione degli stessi materiali prodotti con tecnica sputtering+IBAD.

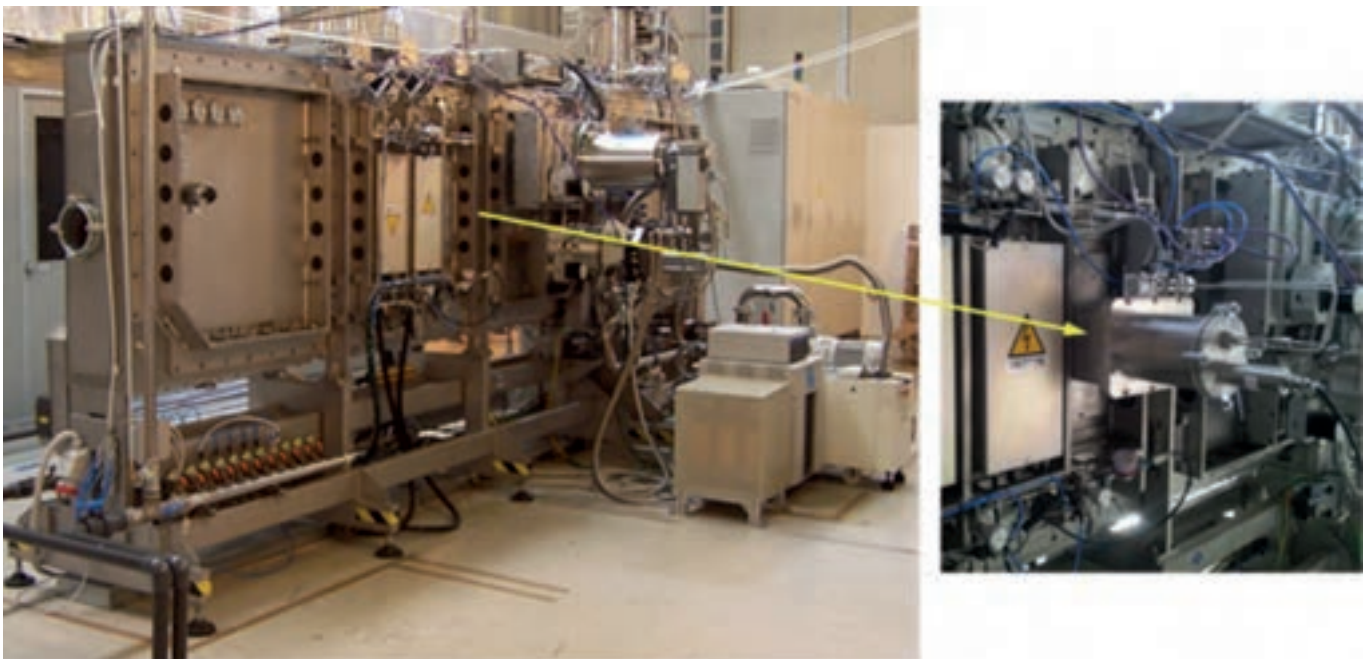
Nell’ambito degli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, sono presenti due diverse configurazioni impiantistiche in

funzione del fluido utilizzato nel campo solare per la raccolta del calore.

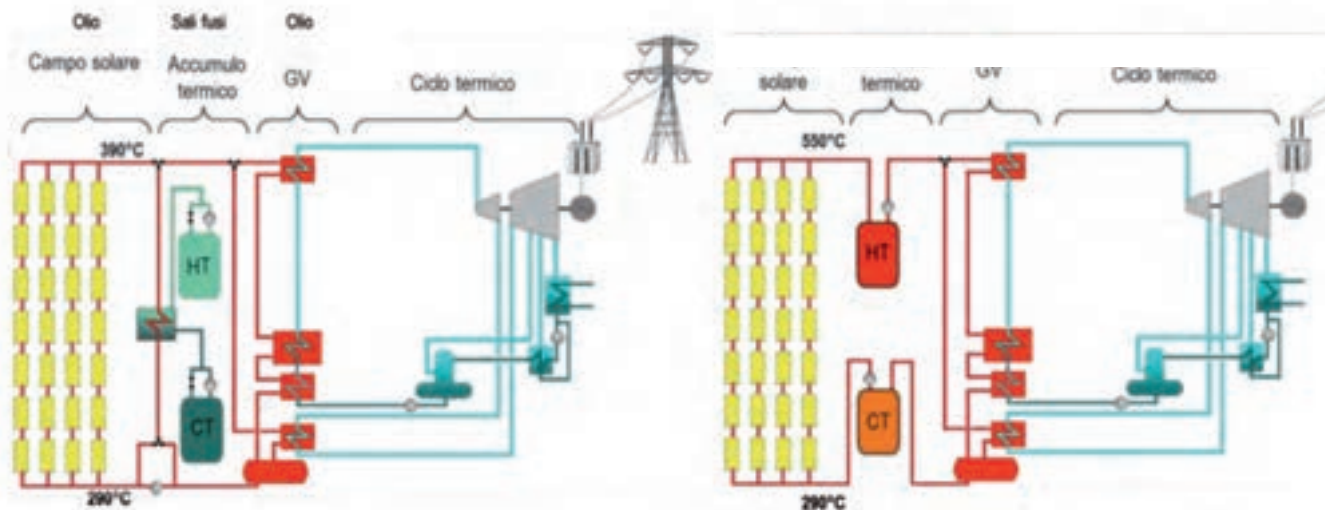
La prima, quella più diffusa, riguarda impianti che utilizzano un olio diatermico (Therminol VP1), tossico e pericoloso per l’ambiente, che permette una temperatura massima di esercizio di circa 390 °C. La seconda tecnologia, sviluppata dall’ENEA, prevede invece l’utilizzo di una miscela di sali fusi (nitrato di sodio e potassio) che è alla base dei comuni fertilizzanti per l’agricoltura, non è tossica né dannosa per l’ambiente e permette di raggiungere temperature operative di circa 550 °C. La tecnologia a sali fusi oltre a migliorare il rendimento di conversione elettrica, consente di realizzare sistemi diretti di accumulo termico, in cui lo stesso fluido è utilizzato sia nel campo solare che nel sistema di accumulo, ottenendo capacità specifiche di accumulo sensibilmente più elevata, 190 kWh/m³ rispetto a 70 kWh/m³ nel caso di impianti ad olio, con sensibile riduzione delle dimensioni e dei costi del sistema di accumulo.

Sono state prese in esame tre diverse soluzioni impiantistiche:

1. olio come fluido termico e sali binari come mezzo di accumulo;
2. sali ternari (con ridotta temperatura di solidificazione), come fluido termico e sali binari come mezzo di accumulo;
3. sali binari come fluido termico e mezzo di accumulo (tecnologia ENEA).



Impianto di sputtering multicatodo dell’ENEA di Portici



Impianto ad olio con accumulo a sali fusi

Sono stati analizzati impianti di taglia commerciale da 50 MWe localizzati nel sud dell'Italia, è stata stimata la produzione elettrica, valutata l'efficienza e i relativi costi di costruzione e produzione. È stata valutata inoltre la possibilità di utilizzo di un fluido gassoso, analizzando alcune soluzioni impiantistiche per le quali sono state determinate le condizioni ottimali di funzionamento e valutate le relative prestazioni. Si è studiata la possibilità di sostituzione dei tradizionali sistemi di accumulo termico a calore sensibile con sistemi alternativi che utilizzano materiali in cambiamento di fase con aggiunta di nanoparticelle.

Nell'ambito delle applicazioni del solare termodinamico a sistemi co-generativi di piccola e media taglia, l'ENEA ha sviluppato una tecnologia modulare TREBIOS (TRigenerazione con Energie rinnovabili: BIOmasse e Solare termodinamico), con integrazione di biomasse e di altre componenti rinnovabili. Questa filiera si basa sull'utilizzo di una miscela di sali fusi, sia come fluido di trasporto del calore prodotto dall'impianto solare a concentrazione che come fluido di immagazzinamento dell'energia termica, impiegando però un unico serbatoio di accumulo con il generatore di vapore integrato al suo interno.

Per studiare questi sistemi è stato utilizzato come sistema di accumulo termico il serbatoio presente nell'impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) sito nell'area Capanna del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

Impianto a sali fusi (tecnologia ENEA)

Il serbatoio contiene circa 10.000 kg di sali che possono essere riscaldati sia attraverso il calore solare raccolto dai due collettori solari da 50 m presenti nell'impianto che da sistemi elettrici alternativi. Nel serbatoio è installato un generatore di vapore elicoidale della potenza termica massima di 300 kWt. Sono stati caratterizzati il serbatoio e il GV determinando i range operativi per temperatura, pressione e portata di vapore prodotto. Con questi dati è stata definita la tipologia di impianto più adatto, non solo dal punto di vista tecnologico ed economico, ma anche per l'affidabilità di servizio, per la semplicità di impiego e manutenzione, ed è stata effettuata la progettazione preliminare dei principali componenti.



Serbatoio presente nell'impianto sperimentale PCS

*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*



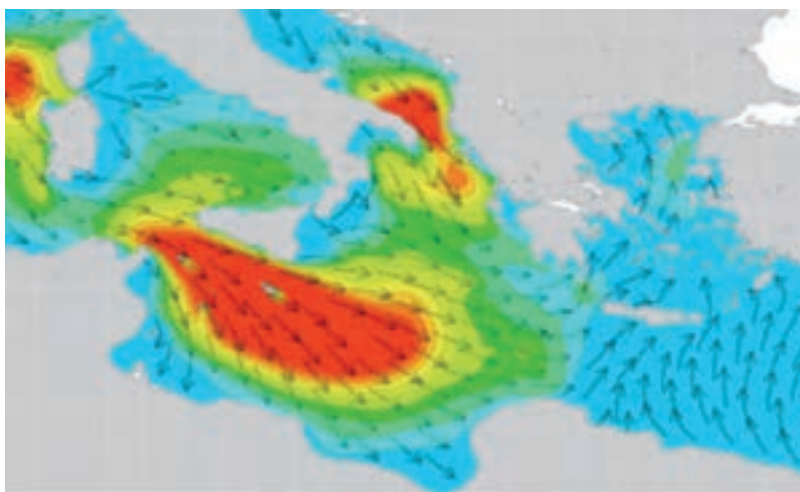
Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

SCENARIO DI RIFERIMENTO

L'idea di convertire in energia elettrica l'energia associata al moto ondoso e alle correnti di marea non è recente; nel tempo sono stati sviluppati diversi progetti finalizzati alla realizzazione di dispositivi per la generazione di energia elettrica dal mare. Molti di essi sono attualmente in attività e hanno dimostrato di poter essere operativi anche in condizioni difficili, come in occasione di mareggiate oceaniche. Essi sono installati sia in paesi Europei che in altri continenti, come ad esempio Australia e Asia.

Lo sfruttamento dell'energia dal mare è a uno stadio meno avanzato rispetto a quello di altre risorse rinnovabili quali il vento o il sole, anche perché presenta un grado di complessità operativa più elevato. Tuttavia, esso può essere di grande interesse per un Paese come l'Italia, con forte sviluppo costiero e limitate disponibilità di altre fonti energetiche. Sistemi di produzione di energia dal mare possono essere particolarmente interessanti per le numerose isole presenti in Italia, in molte delle quali l'approvvigionamento energetico, realizzato comunemente da centrali termoelettriche a gasolio, risulta oneroso dal punto di vista economico e di non trascurabile impatto ambientale. Inoltre, lo sviluppo dei sistemi di assorbimento e conversione energetica di tipo costiero, sia di tipo galleggiante che a barriere sommerse poggiate su bassi fondali, può avere una valenza significativa anche per la riduzione dei fenomeni di erosione costiera.

Le attività di ricerca rivolte allo sfruttamento del moto ondoso e delle correnti di marea vedono primariamente i centri di ricerca del nord Europa, quindi i



sistemi la cui fase di sviluppo è più avanzata sono stati progettati per operare con condizioni oceaniche, dove l'altezza delle onde è decisamente elevata. Nel caso dell'Italia, le sue coste sono bagnate da onde di piccola altezza e minor periodo. È quindi necessario cercare di sviluppare dispositivi che siano in grado di sfruttare al massimo queste caratteristiche. La ricerca in ambito italiano nel settore è attiva da circa dieci anni, con progetti mirati allo sviluppo di dispositivi atti a funzionare nel Mar Mediterraneo in particolare e in zone oceaniche in genere. Il rapido espandersi di tecnologie per lo sfruttamento delle correnti marine e delle onde rende necessaria una stima accurata delle risorse naturali potenzialmente disponibili nei mari italiani, e di quelle realmente sfruttabili dalle diverse tecnologie che si stanno affacciando sul mercato.

Il rapido espandersi di tecnologie per lo sfruttamento delle correnti marine e delle onde rende necessaria una stima accurata delle risorse naturali potenzialmente disponibili nei mari italiani, e di quelle realmente sfruttabili dalle diverse tecnologie che si stanno affacciando sul mercato.

Le attività di ricerca mirano a quantificare l'energia che può essere immessa nella rete elettrica, ricavabile da appositi convertitori del moto ondoso e delle correnti marine in siti specifici della costa italiana. Un primo obiettivo ha riguardato la stima del potenziale energetico in tali siti, basata sulla valutazione dell'energia associata al clima ondoso e sulla valutazione dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi (dati determinanti durante la fase di progettazione e installazione dei dispositivi di conversione), e lo sviluppo di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso su tutto il Mediterraneo.

Le attività di ricerca mirano a quantificare l'energia che può essere immessa nella rete elettrica, ricavabile da appositi convertitori del moto ondoso e delle correnti marine in siti specifici della costa italiana. Un primo obiettivo ha riguardato la stima del potenziale energetico in tali siti, basata sulla valutazione dell'energia associata al clima ondoso e sulla valutazione dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi (dati determinanti durante la fase di progettazione e installazione dei dispositivi di conversione), e lo sviluppo di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso su tutto il Mediterraneo.

OBIETTIVI

Le attività di ricerca mirano a quantificare l'energia che può essere immessa nella rete elettrica, ricavabile da appositi convertitori del moto ondoso e delle correnti marine in siti specifici della costa italiana. Un primo obiettivo ha riguardato la stima del potenziale energetico in tali siti, basata sulla valutazione dell'energia associata al clima ondoso e sulla valutazione dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi (dati determinanti durante la fase di progettazione e installazione dei dispositivi di conversione), e lo sviluppo di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso su tutto il Mediterraneo.

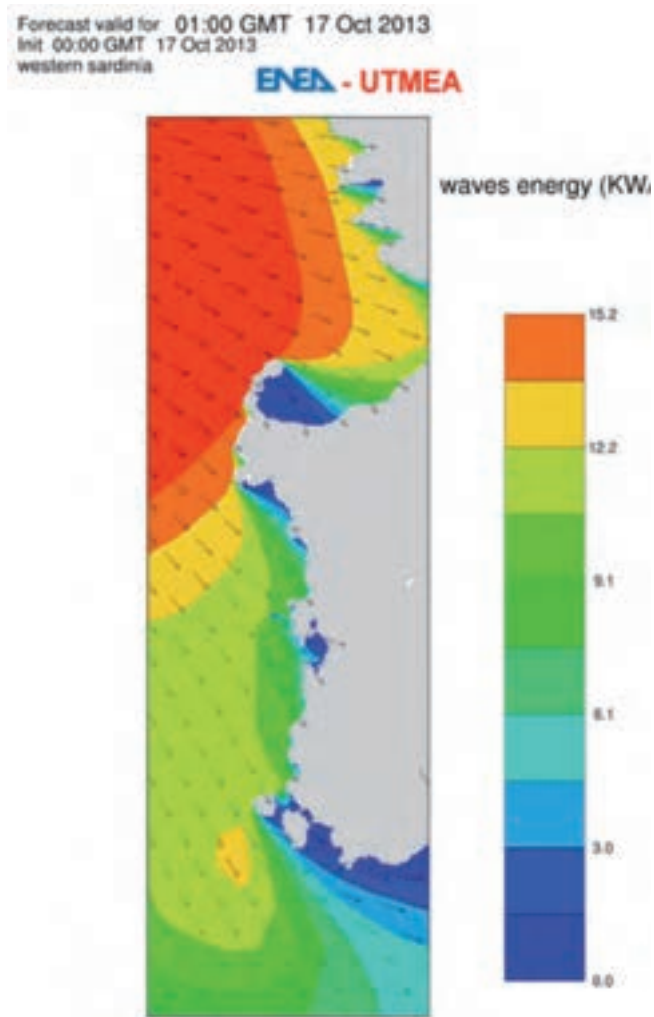
Un secondo obiettivo riguardava il miglioramento dei dispositivi di conversione del moto ondoso del tipo a colonna d'acqua oscillante (Oscillating Water Column OWC), in particolare di un U-OWC, implementando un modello matematico di tipo CFD per la riproduzione dell'idrodinamica da validare poi con attività sperimentali su modello in scala. Altro obiettivo era la progettazione in scala reale di un dispositivo di conversione ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) di tipo point absorber di potenza 60 kW, con l'ottimizzazione di tutte le parti del sistema (scafo, gruppo giroscopico e generatore elettrico) per il miglior compromesso tra costi di realizzazione e prestazioni del dispositivo.

Per quanto riguarda l'energia da correnti di marea l'attività prevedeva una campagna di misure delle correnti nello Stretto di Messina nell'area relativa al punto di massima energia. L'area è stata individuata grazie ai dati prodotti dalla simulazione numerica sviluppata in precedenza (2011) e le misure sono finalizzate alla validazione del modello numerico.

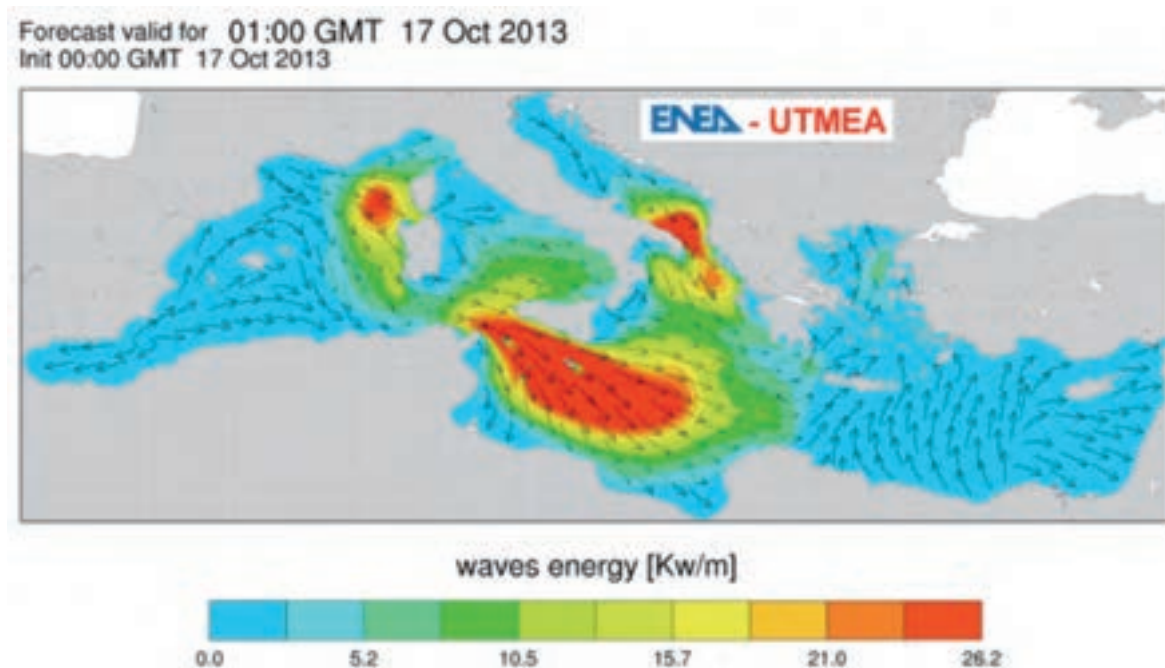
RISULTATI

Sviluppo di un sistema operativo per la previsione dello stato del mare e dell'energia a esso associato

Una prima parte delle attività era rivolta alla creazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso su tutto il Mediterraneo come supporto modellistico all'applicazione di tecnologie innovative di estrazione dell'energia.



Esempio di previsione del valore dell'energia e della direzione per la costa Occidentale della Sardegna



Esempio di previsione del valore dell'energia e della direzione per l'intero Mediterraneo

Il prodotto è un sistema operativo di tipo rilocabile multi-nesting (annidato) in grado di fornire in maniera regolare le previsioni dello stato del mare e dell'energia a esso associato su tutto il bacino del Mediterraneo ad una risoluzione di circa 3-4 km, e per le aree di interesse fino a 800 m di risoluzione. All'interno delle aree di interesse un ulteriore livello di nesting consente di fornire la previsione nelle immediate vicinanze della costa (poche decine di metri). Particolare attenzione è stata rivolta allo sviluppo di siti web e web-gis dedicati alla presentazione e diffusione dei dati delle previsioni.

Studio dei dispositivi di tipo OWC (Oscillating Water Column) in generale, e dei convertitori del tipo U-OWC in particolare

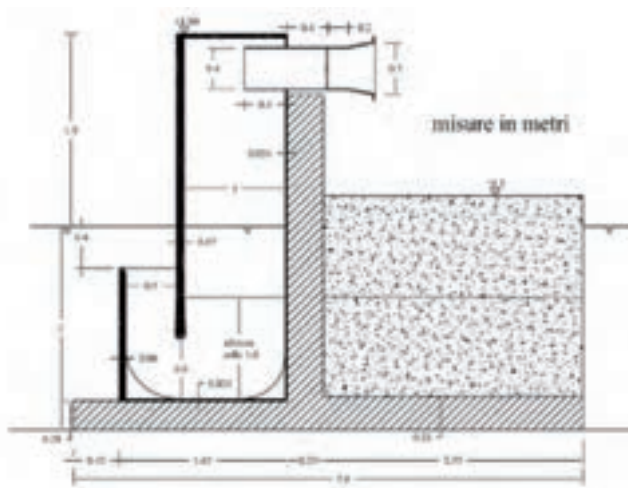
Si è fatto riferimento a uno specifico impianto per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica

appartenente alla famiglia degli OWC (Oscillating Water Column), denominato U-OWC. Gli OWC sono dispositivi muniti di una camera di assorbimento con imboccatura posta al di sotto del livello di medio mare, che contiene nella parte inferiore acqua e nella parte superiore aria, la quale è posta in collegamento con l'atmosfera mediante un condotto in cui è alloggiata una turbina, generalmente di tipo Wells.

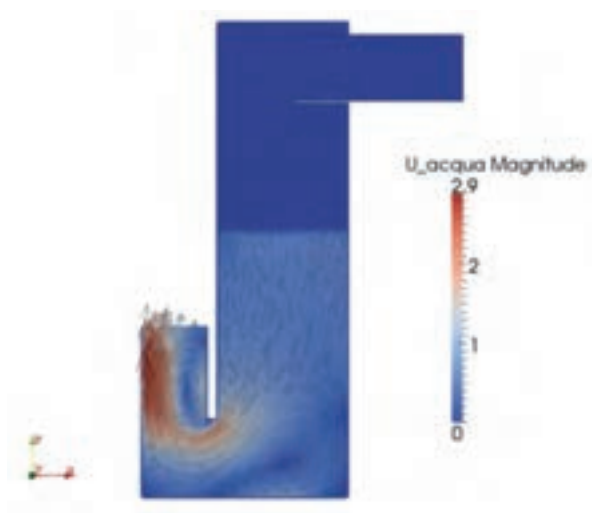
Nel progetto è stata condotta un'analisi puntuale e dettagliata per il dimensionamento ottimizzato di un impianto U-OWC in funzione dello stato del mare. È stato inoltre realizzato un modello numerico di tipo CFD del convertitore da validare in seguito attraverso test sperimentali da eseguire su un modello in scala installato in mare. Il modello è in fase di allestimento presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory, www.noel.unirc.it) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.

Campagna di misura delle velocità di marea nelle vicinanze del punto più energetico dello Stretto di Messina

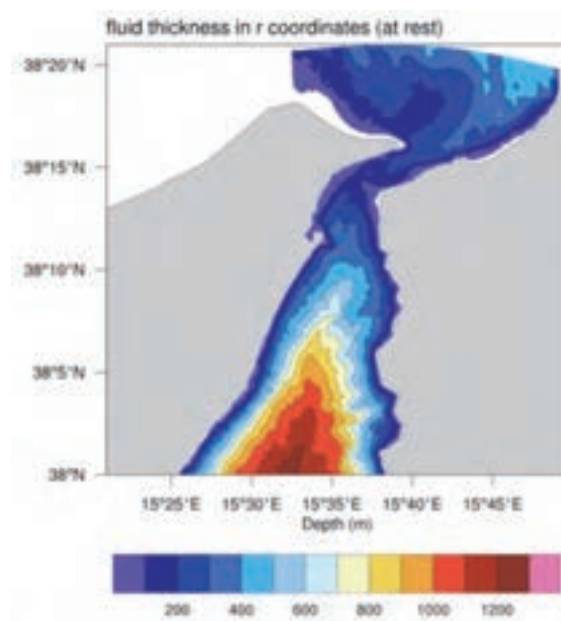
Lo studio condotto ha avuto per oggetto il rilievo sperimentale della velocità della corrente marina in uno specifico sito di misura. In particolare si è preso in esame un sito posizionato nell'area dello stretto di Messina. Utilizzi fondamentali dei dati ricavati dalla misura delle correnti possono essere trovati nella stima della producibilità energetica nell'area di studio e nella verifica di modelli numerici per la predizione del comportamento delle correnti, come ad esempio quello messo a punto da ENEA.



Andamento della velocità dell'acqua all'interno di un U-OWC come simulato dal modello CFD



Schema sistema modello U-OWC



Batimetria del modello numerico

Lo strumento utilizzato per le rilevazioni è un profi-
lometro sonico. Tale strumento appartiene ad una
classe di strumenti nota come correntometri doppler
monostatici. Il termine monostatico si riferisce al
fatto che lo stesso trasduttore funziona sia come tra-
smettitore che come ricevitore. Un rilevatore Doppler
monostatico usa un set di trasduttori acustici di cui
sono noti esattamente il posizionamento e l'orienta-
zione, ciascuno dei quali produce uno stretto fascio
di onde sonore emesse normalmente alla superficie
del trasduttore.

I dati rilevati dal sensore rappresentano la velocità e
la direzione della corrente a varie profondità che,
riportate in celle di misura definibili dall'utente, con-
sentono di ricostruire il profilo di velocità in funzione
della profondità, aumentando il livello di dettaglio
dello studio della corrente.

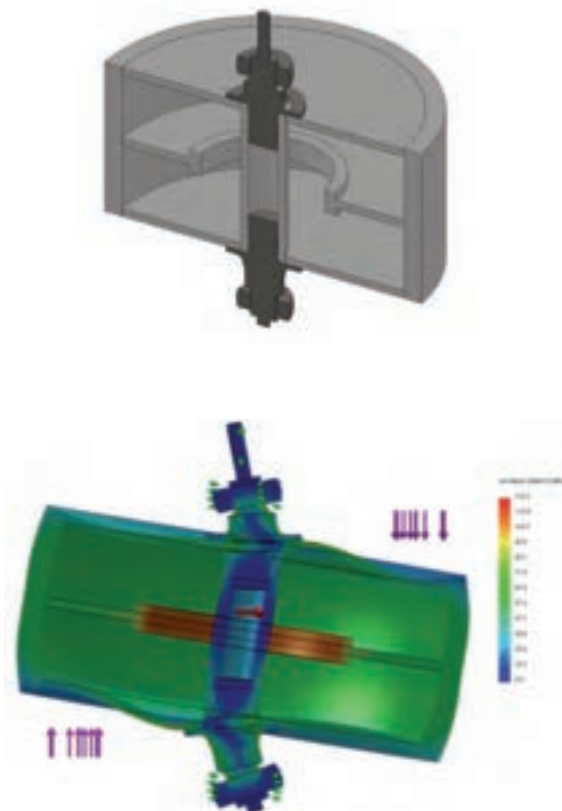
Le misure acquisite durante la campagna di misura
sono state successivamente utilizzate per validare il
modello numerico MITgcm. Da un primo confronto
qualitativo emerge che il modello è in grado di ripro-
durre l'andamento reale. Il modello però mostra dei
valori di corrente leggermente più alti rispetto ai dati
sperimentali e le differenze sono dovute principal-
mente alle condizioni al contorno scelte per forzare il
modello oceanografico. Il modello, infatti, è forzato
solo dalla corrente barotropica di marea. Tuttavia
nello Stretto di Messina agiscono anche la compo-
nente eolica e la pressione atmosferica che sono ca-
paci di modificare localmente l'andamento delle
correnti di marea e di mascherare il loro carattere se-
midiurno. Da questo confronto emerge quindi la ne-
cessità di introdurre il vento e la pressione
atmosferica come ulteriori condizioni al contorno del
modello numerico.

Studio di un convertitore di tipo point absorber e alla sua progettazione in scala reale

Le attività hanno riguardato il progetto del sistema
ISWEC in scala reale con taglia di potenza 60 kW,
che è stato sviluppato a partire dai dati di onda ac-
quisiti per il sito di Pantelleria. La procedura di pro-
getto inizia con la scelta di una condizione "tipo",
detta "onda di progetto", per ricavare un primo di-
mensionamento di massima del sistema. Il progetto è
stato suddiviso in 4 fasi: i) nella prima fase sono state

analizzate diverse geometrie di scafo, variandone sia
le dimensioni sia il materiale, nonché la forma e la
distribuzione della massa di zavorra; ii) nella seconda
fase è stato analizzato il gruppo giroscopico e il suo
accoppiamento con il generatore elettrico; iii) la terza
fase è stata caratterizzata dall'ottimizzazione del
gruppo giroscopico/generatore elettrico in termini di
taglia del generatore elettrico e dell'elettronica di
gestione della potenza, velocità angolare del volano,
dissipazioni energetiche; iv) nella quarta fase è stato
analizzato il volano dal punto di vista strutturale.

A valle della progettazione fisica del dispositivo è
stata affrontata la definizione di una logica di con-
trollo per l'ottimizzazione delle prestazioni del
sistema durante il funzionamento in mare, in condi-
zioni reali.



*Soluzione scelta per il volano e
rappresentazione grafica delle sollecitazioni
del volano sottoposto alle azioni centrifughe
e giroscopiche*

Area di ricerca: 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

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



Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

SCENARIO DI RIFERIMENTO

È condivisa a livello internazionale la consapevolezza che sarà impossibile sostituire, almeno per qualche decennio, quote significative di combustibili fossili con fonti alternative a basse o nulle emissioni di CO₂, e che quindi è sempre più necessario adottare soluzioni che limitino l'impatto sull'ambiente conseguente al loro utilizzo, e che siano compatibili con gli obiettivi di contenimento delle alterazioni climatiche.

Queste considerazioni valgono per il metano e ancor più per il carbone che è il principale combustibile impiegato a livello mondiale per la produzione di energia elettrica (ge-

nera circa il 30% dell'elettricità dell'UE, il 50% in USA, il 75% in Cina) e anche quello a maggiore intensità di carbonio.

Il ricorso al carbone per la generazione elettrica, necessario per soddisfare la domanda sempre maggiore di energia, risulta condizionato, oltre che dall'impiego di tecnologie pulite sempre più efficaci nella riduzione delle emissioni di macro e micro inquinanti, anche dall'introduzione di soluzioni in grado di abbattere radicalmente le emissioni di anidride carbonica. Da questo punto di vista, occorre puntare da un lato al miglioramento delle efficienze energetiche, legate all'innovazione dei cicli termodinamici e all'utilizzo di materiali innovativi, dall'altro allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie di cattura e confinamento della CO₂ (tecnologie CCS).

L'utilizzo di tecnologie CCS può ridurre dell'80-90% le emissioni di CO₂ causate dagli impianti di potenza, a scapito però di una riduzione dell'efficienza energetica di circa 8-12 punti percentuali. Molte delle tec-

nologie CCS sono già disponibili ma hanno bisogno di essere ottimizzate dal punto di vista sia energetico che di processo, e di essere testate su scala dimostrativa, al fine di ottenere indicazioni precise sui costi aggiuntivi e sulle perdite energetiche associate.

Altre tecnologie, concettualmente più avanzate, devono essere sperimentate e testate su scala significativa.

In linea con gli indirizzi europei e nazionali (con riferimento al Documento di Strategia Energetica Nazionale), una adeguata attività di R&S svolta dall'ENEA e dal sistema della ricerca pubblica, consentirà di conseguire alcuni obiettivi di in-

teresse strategico che si concretizzano nel contribuire efficacemente alla riduzione delle emissioni italiane di CO₂, nel consentire al sistema nazionale di limitare i costi della produzione di energia elettrica nel prossimo futuro e di porre l'industria nazionale in grado di competere sul mercato internazionale e, in particolare, in quello delle economie emergenti.

Nel settore della R&S sulle tecnologie CCS, vi è un forte impegno internazionale - seppur contrastato dalla crisi economica internazionale e dalla ridotta efficacia dei dispositivi finanziari - rivolto da una parte alle problematiche di ottimizzazione impiantistica, ai fini di una applicazione immediata delle CCS nei futuri dimostrativi, dall'altra alla messa a punto di tecnologie completamente nuove che consentano di ottenere risultati in termini di efficienza e di costo sempre più prossimi a quelli delle tecnologie convenzionali attuali.

Un altro settore in espansione è quello relativo alle tecnologie di "riutilizzo" della CO₂ una volta sepa-



rata, al fine di produrre nuovi combustibili o “chemicals”, in contesti ove la disponibilità di energia (leggi surplus da fonti rinnovabili), o la disponibilità ad esempio di idrogeno, rendono la cosa economicamente sostenibile. In tale ottica si preferisce parlare di tecnologie CCUS ossia “Carbon Capture Utilization and Storage”.

OBIETTIVI

Il Progetto ha per finalità lo sviluppo, la dimostrazione, la validazione teorica e sperimentale, su scala significativa, di un ventaglio di tecnologie innovative per l'impiego sostenibile di combustibili fossili, siano esse indirizzate alla produzione di elettricità con ridotte emissioni di gas serra, o alla produzione di combustibili gassosi e liquidi e al riutilizzo della CO₂, in alternativa allo stoccaggio.

Le attività perseguono il duplice obiettivo di risolvere le principali problematiche tecniche connesse alle nuove tecnologie e di ridurre le penalizzazioni, in termini di costo e di rendimento, che l'attuale stato delle tecnologie di cattura e sequestro implicano.

Il Progetto comprende sia attività di nuova impostazione che la prosecuzione e/o il completamento di attività avviate negli anni precedenti.

Il grado di maturità delle tecnologie proposte è assai differente: a fianco a soluzioni tecnologiche più mature, applicabili nel breve-medio termine, per le quali lo sforzo è principalmente rivolto alla riduzione degli extra-costi, vengono studiate metodologie più avanzate che consentano, sul lungo termine, soluzioni tecnologiche caratterizzate da prestazioni energetiche e ambientali maggiori.

Nello specifico settore di ricerca l'ENEA è da tempo fortemente impegnata in tutte le principali filiere tecnologiche di cattura della CO₂ (pre-, oxy- e post-combustione) e del successivo sequestro geologico. Tali attività hanno portato al consolidamento di un significativo know-how in materia e alla realizzazione di importanti infrastrutture sperimentali sia in ENEA che presso la partecipata SOTACARBO S.p.A. Di recente sono state avviate attività relative al “riutilizzo” della CO₂ per la produzione di combustibili.

Una particolare attenzione è rivolta allo sfruttamento di carboni di basso rango, caratterizzati da alto contenuto di Zolfo e TAR, e tra questi al carbone del Sulcis, per le ovvie implicazioni di carattere economico e sociale. In questo ambito, una specifica menzione merita lo studio di fattibilità di una piattaforma dimostrativa che, partendo dalla combustione di un car-

bone estratto dalle miniere del Sulcis, consenta la separazione e il sequestro geologico della CO₂ nel locale bacino carbonifero.

RISULTATI

Tecnologie innovative per la cattura della CO₂ in post-combustione

Le attività sono state indirizzate allo sviluppo di nuovi solventi liquidi caratterizzati da più elevate efficienze e minor tossicità. È opportuno sottolineare che tali solventi possono e saranno applicati anche al “lavaggio” di syngas in configurazioni di cattura pre-combustione.

Nel complesso delle attività, particolare attenzione viene rivolta alla valutazione dell'efficienza di cattura, della capacità di assorbimento specifico di CO₂ all'interno del singolo solvente, e della sua capacità di rigenerazione, del degradamento delle prestazioni del solvente utilizzato al variare del numero di cicli, della quantità specifica di energia necessaria alla rigenerazione. Tutte queste grandezze sono determinate variando i principali parametri di processo quali la tipologia e la concentrazione di solvente, la tipologia e la composizione delle correnti gassose trattate, le portate delle correnti liquide e gassose, la temperatura di rigenerazione.



*Reattori a bolle per la cattura della CO₂
Impianto Pilota SOTACARBO*

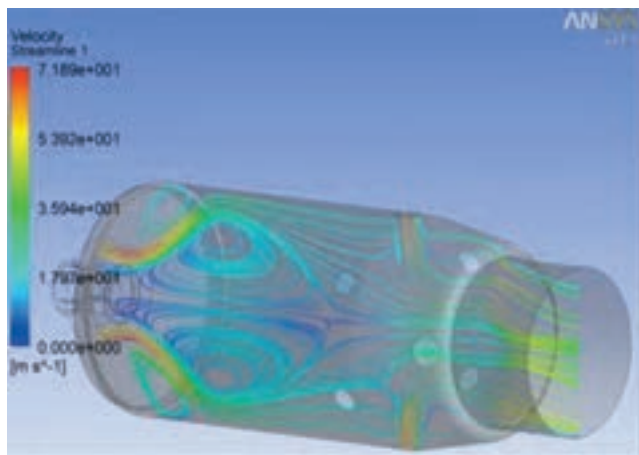
Tecnologie per la cattura della CO₂ in pre-combustione attraverso la produzione e il trattamento di combustibili gassosi e liquidi dal carbone

Per quanto riguarda le tecnologie di cattura pre-combustione, comportando generalmente il passaggio attraverso una fase di pre-trattamento del combustibile (gassificazione e clean-up), l'attività si è articolata in tre linee di ricerca: i) ottimizzazione della tecnologia nota di gassificazione, trattamento e conversione del

syngas, e al parallelo sviluppo di un innovativo processo di pirolisi e gassificazione separate; ii) produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS; iii) cattura della CO_2 con sorbenti solidi basati su Ossidi di Calcio. Questi ultimi possono e saranno testati anche in configurazioni di cattura post-combustione su fumi.



Piattaforma sperimentale ZECOMIX per lo sviluppo dell'omonimo ciclo di cattura della CO_2



Iso-superficie di temperatura e velocità relative a un bruciatore di turbina a gas alimentato a $CO_2/O_2/CH_4$

Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione

Si è cercato di rispondere alle questioni relative alla cattura in pre-combustione e in ossi-combustione e al ruolo estremamente significativo giocato dall'ottimizzazione del processo di combustione, nel primo caso legato all'impiego di syngas molto ricchi di idrogeno in turbo-gas, nel secondo caso in relazione all'impiego di ossigeno puro in luogo di aria come comburente relativo. Le attività si sono articolate secondo due stadi: il primo relativo allo sviluppo di metodologie numeriche per la simulazione e la progettazione di componenti; il secondo relativo allo sviluppo di bruciatori innovativi per turbine a gas operanti con syngas. Per il primo stadio l'attività ha riguardato lo studio della combustione, in processi monofase e multifase, rivolto alla messa a punto di tecniche e modelli numerici, per simulazioni di tipo LES (Large Eddy Simulation), sviluppati all'interno del codice proprietario HeaRT, e, in relazione allo sviluppo dei metodi di simulazione predetti, lo studio delle fenomenologie di instabilità di combustione, l'individuazione di eventi precursori di instabilità e la definizione di metodi di controllo di processo di tipo attivo o passivo. Nel secondo stadio è stata affrontata la problematica dello sfruttamento energetico, efficiente e a basse emissioni, del syngas prodotto da gassificazione, e più in generale di NG (natural gas).

Cicli energetici ad alta efficienza "capture ready"

Sono stati studiati cicli turbogas non convenzionali in riferimento alle tecnologie CCS, caratterizzati da elevata efficienza, operanti con miscele comburenti di tipo CO_2/O_2 , e quindi "capture ready"; a tal fine è stato realizzato l'impianto sperimentale AGATUR (Advanced GAs TURbine Rising).

AGATUR è un impianto concepito per la sperimentazione su sistemi di conversione dell'energia basati su turbina a gas. L'impianto è particolarmente versato per il testing di cicli turbogas non convenzionali che utilizzano miscele gassose diverse dall'aria come fluido di lavoro. Esso è costituito da tre sezioni principali mutuamente connesse: la microturbina, il vessel e il generatore di vapore.



Generatore di vapore

Tecnologie per la rimozione permanente della CO₂

L'attività, attinente al tema centrale del sequestro definitivo della CO₂, di tipo geologico, chimico o connesso al suo utilizzo, si è articolata in tre linee di ricerca: i) realizzazione e sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico della CO₂ e alla elaborazione di linee guida per la progettazione di una generica rete di monitoraggio; ii) utilizzo o alternativo fissaggio chimico della CO₂; iii) attività di advisor nazionale per le tecnologie di Cattura e Sequestro della CO₂.

La rete ha per obiettivo la misura diretta al suolo e

all'interno di pozzi, delle concentrazioni e del flusso di CO₂, CH₄ e di altri parametri di interesse (quali temperatura, umidità, pH, Eh, concentrazioni in falda ecc). La finalità è quella di definire le variazioni naturali dei valori di flusso e/o di concentrazione nei suoli della CO₂ prodotta da processi biologici (background o baseline) quali termini di riferimento per l'individuazione di eventuali fughe di CO₂ profonda. Parallelamente a metodi di indagine più tradizionali, sono stati messi a punto metodi di analisi isotopica del carbonio e/o del radiocarbonio, tipicamente di tipo off-line, per la caratterizzazione delle condizioni baseline e post iniezione.



Dislocazione delle sei stazioni di monitoraggio all'interno della concessione mineraria "Monte Sini" della Carbosulcis S.p.A.

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

Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

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



Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

SCENARIO DI RIFERIMENTO

In Occidente è forte la necessità 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.

In Italia, dove da tempo le centrali dotate di reattori di GEN II sono state fermate, non si ha necessità diretta nel procedere a studi e ad applicazioni per il miglioramento dello standard di funzionamento di questo tipo di sistemi.

Nondimeno, come paese tecnologicamente sviluppato e allineato agli standard degli altri paesi occidentali, l'Italia ha l'obbligo di mantenere vive le conoscenze scientifiche nel campo della fissione nucleare, dando priorità assoluta al mantenimento delle conoscenze nel settore della sicurezza e concentrando i propri sforzi nei settori della ricerca e della cooperazione internazionale per l'impiego sicuro, anche oltre i suoi confini geografici, degli impianti esistenti e del nucleare di prossima generazione.

Il nuovo quadro di riferimento delineatosi in Italia a seguito dell'incidente di Fukushima, e del successivo referendum, ha portato ad una rimodulazione delle attività di R&S previste nell'ambito del programma triennale 2012-2014. In particolare, si è ritenuto necessario che le esigenze primarie fossero la conservazione nel Paese di un sistema di competenze scientifiche sotto il profilo della sicurezza e delle attività rivolte allo sviluppo di sistemi di IV generazione.

Il problema della sicurezza nucleare coinvolge tutti i Paesi, a prescindere dall'esistenza nel proprio territorio di centrali elettronucleari in esercizio, e nel caso dell'Italia esso si presenta in modo molto concreto, vista la presenza di diverse centrali nucleari entro il limite di 200 km dai confini nazionali. La stessa

Commissione Europea ha stabilito che ciascuna nazione si attrezzi per essere in grado di operare valutazioni indipendenti dello stato di sicurezza di queste centrali.

La partecipazione alle iniziative e piattaforme Europee come SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology

Platform) ed ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) per la definizione di una strategia europea sulla produzione economica, sicura e sostenibile dell'energia nucleare, ha permesso all'ENEA di essere presente in diversi progetti europei del VII Framework Program EURATOM, indirizzati allo sviluppo/validazione di strumenti e metodi innovativi per l'analisi della sicurezza negli impianti nucleari, tra cui si ricordano i progetti SARNET2, SARGEN-IV, JASMIN, CESAM, NURESAFE.

Le attività di ricerca fanno riferimento a esperienze acquisite nell'ambito di accordi internazionali di collaborazione con vari enti e università e ad accordi bilaterali, in particolare stipulati con le organizzazioni francesi CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) e IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), e con la US-NRC (United States Nuclear Regulatory Commission).

Grazie a questo background è ora possibile aumen-



tare le conoscenze di base e arricchire l'esperienza precedentemente maturata. Le attività riguardano l'acquisizione di strumenti, metodologie e tecnologie avanzate che permettano una valutazione indipendente circa la sicurezza, sostenibilità e affidabilità delle concezioni innovative oltre che delle installazioni nucleari attuali.

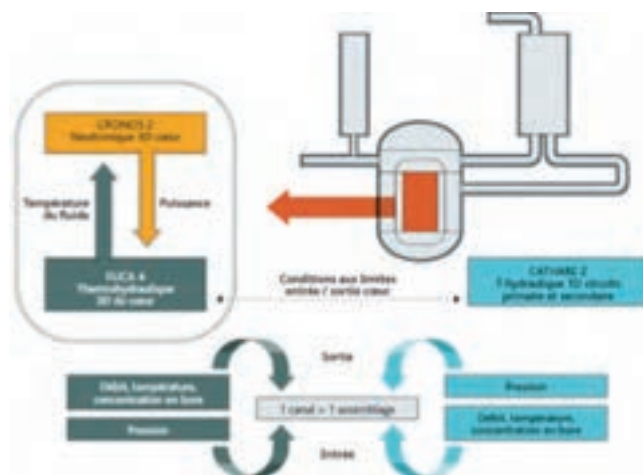
OBIETTIVI

L'intento del progetto è quello di contribuire a mantenere 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 e della sostenibilità anche grazie ad accordi bilaterali con grandi istituzioni di ricerca quali il CEA e l'IRSN francesi, i laboratori del DOE americano 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.). Parallelamente, si supporta 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, mantenendo ad alto livello le competenze sul nucleare da fissione per rendere possibile la valutazione di progetti di reattori innovativi proposti in ambito internazionale. Gli obiettivi proposti sono:

- Acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi e analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro corretto utilizzo.
- Sviluppo di metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari tenendo conto dell'evento di Fukushima Dai-ichi e delle risultanze degli stress test europei.
- Realizzazione di attività sperimentali e di studi a supporto della qualifica di sistemi, strumentazione e componenti innovativi e della validazione della modellistica per l'analisi incidentale di reattori innovativi.

RISULTATI

Con riferimento allo sviluppo di competenze sulla sicurezza nucleare, le attività di ricerca hanno riguardato l'acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi e analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro cor-



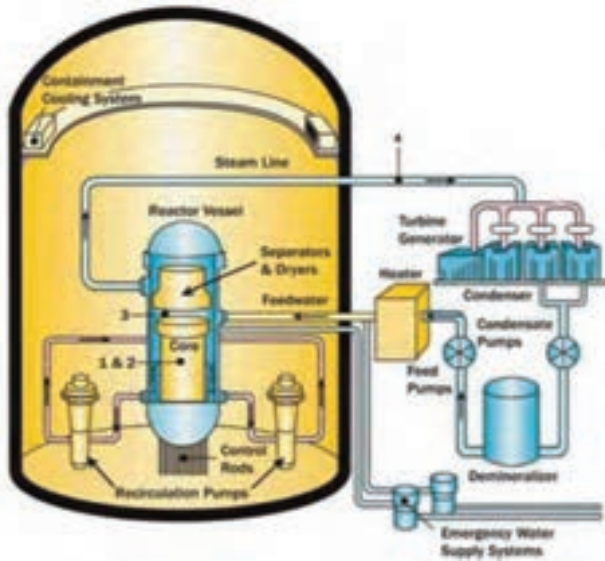
Accoppiamento neutronico-termoidraulico nella catena di calcolo HEMERA

retto utilizzo. Questi strumenti, in gran parte oggetto di accordi di collaborazione con gli enti francesi CEA e IRSN, riguardano le diverse tematiche implicate nel funzionamento di un sistema estremamente complesso come un impianto nucleare: modellistica di base per la realizzazione di librerie di dati nucleari; codici di neutronica deterministici e Monte Carlo per l'analisi neutronica del reattore; piattaforme di calcolo avanzate con capacità "multi-scale" e "multi-physics" per la simulazione T/H dell'intero impianto e di specifici componenti; codici di calcolo, meccanicistici e integrali, per la valutazione delle conseguenze di incidenti gravi; modellistica per la valutazione del rilascio e della diffusione dei contaminanti radioattivi; metodi per la valutazione degli impianti nucleari sotto l'aspetto della resistenza alla proliferazione nucleare e degli aspetti tecnici ed economici di interfaccia safety-security.

Sono state sviluppate metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari tenendo conto dell'evento di Fukushima Dai-ichi e delle risultanze degli stress test europei. In particolare si è operato per la realizzazione di una struttura di base finalizzata alla creazione di un sistema esperto a supporto delle valutazioni di sicurezza per i reattori europei, per l'applicazione di approcci di tipo probabilistico, deterministico e integrato (probabilistico-deterministico) per la sicurezza di reattori innovativi che tenga conto dell'affidabilità dei sistemi di sicurezza passivi.

Infine sono state svolte attività sperimentali e di studio a supporto della qualifica di sistemi, strumentazione e componenti innovativi e della validazione della modellistica per l'analisi incidentale di reattori innovativi. Queste attività sono state principalmente

indirizzate al completamento dell'impianto integrale SPES-3 in corso di realizzazione presso la SIET e alla progettazione/realizzazione di campagne sperimentali in mock-up di componenti realizzati nel corso del precedente piano triennale.



Schema di centrale con reattore BWR (Boiling Water Reactor)

Di seguito sono sinteticamente riportati i principali risultati ottenuti nell'ambito di questa linea progettuale.

Riguardo il primo obiettivo, sono stati svolti i seguenti quattro studi fondamentali:

1. Dati nucleari e librerie per schermaggio e dosimetria.
2. Metodi Monte Carlo e deterministici per analisi di sicurezza del nocciolo e stoccaggio combustibile.
3. Acquisizione, sviluppo e validazione di strumenti di calcolo per la valutazione delle conseguenze di incidenti gravi.
4. Metodi per valutazioni di sostenibilità.

I risultati ottenuti sono:

- Approfondimento e definizione avanzata degli effetti di struttura nucleare sulla fissione neutronica di ^{239}Pu .
- Realizzazione di una libreria di dati nucleari: BUGCENDF70.BOLIB – An ENEA-Bologna ENDF/B-VII.0 Cross Section Library (47 n + 20 n) in FIDO-ANISN Format for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications.
- Produzione di uno stato dell'arte sull'uso di codici Monte Carlo nel progetto di reattori PWR: Studio del Tilt nell'ambito del PWR Benchmark presso NEA UAM e prova di nuovi algoritmi in calcoli Monte Carlo agli autovalori con l'uso del metodo

“Source-Iteration”.

- Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up di un PWR da 900 MWe.
- Acquisizione del codice FLICA: Metodi di calcolo utilizzati nei codici francesi per l'analisi termoidraulica di nocciolo dei PWR.
- Calcoli e valutazioni di sequenze incidentali rilevanti ai fini di studi di sicurezza in impianti esistenti e di nuova concezione con l'uso di codici di calcolo, meccanicistici e integrali, specifici per l'analisi degli incidenti gravi.
- Metodi per valutazioni di sostenibilità legati a resistenza alla proliferazione, ciclo del combustibile, interfaccia safety/security e scenari energetici.
- Mappa delle emissioni specifiche e del costo medio di generazione di diversi mix elettrici.

Nell'ambito del secondo obiettivo sono stati svolti i tre seguenti studi fondamentali:

1. “Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni di pre-emergenza o incidentali”.
2. “Applicazione di metodologia PSA e IDPSA del tipo “Risk-Informed per la stima del rischio da eventi esterni”.
3. “Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori innovativi”.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Calcoli di inventario di nocciolo: affinamento della metodologia e applicazione ai reattori frontaliери.
- Calcoli per la caratterizzazione dei vari impianti nucleari in differenti condizioni di incidente grave.
- Definizione delle basi attraverso SOAR e successivo avanzamento nella realizzazione di un database esperto per supportare la gestione di una situazione di crisi.
- Sviluppo di una catena di simulazione fast-running per le fasi avanzate dell'incidente.
- Metodologie di analisi degli eventi esterni e stima del rischio.
- Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori a fronte di sequenze incidentali significative ai fini della sicurezza.

Per il terzo obiettivo sono stati svolti due studi:

1. Studi per il completamento della facility SPES-3 presso la SIET.
2. Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi.

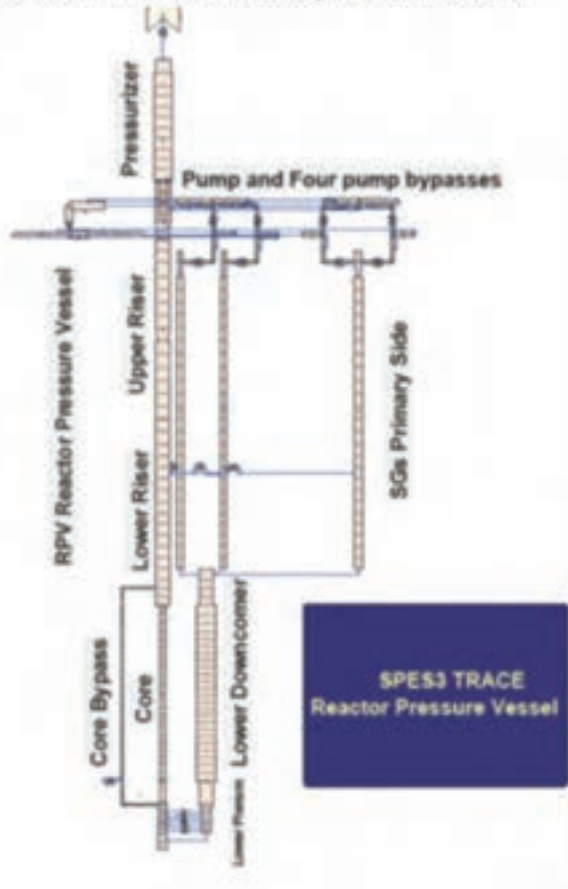
I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Valutazione dei costi per la realizzazione della configurazione originale della Facility SPES-3 presso la SIET.
- Fattibilità di una diversa configurazione della

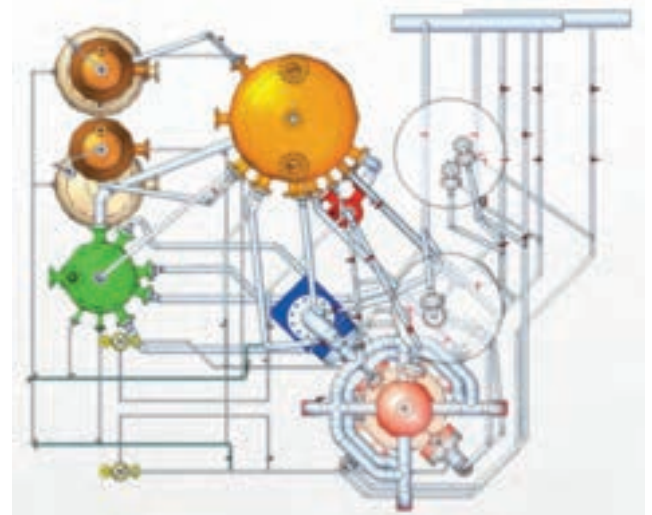
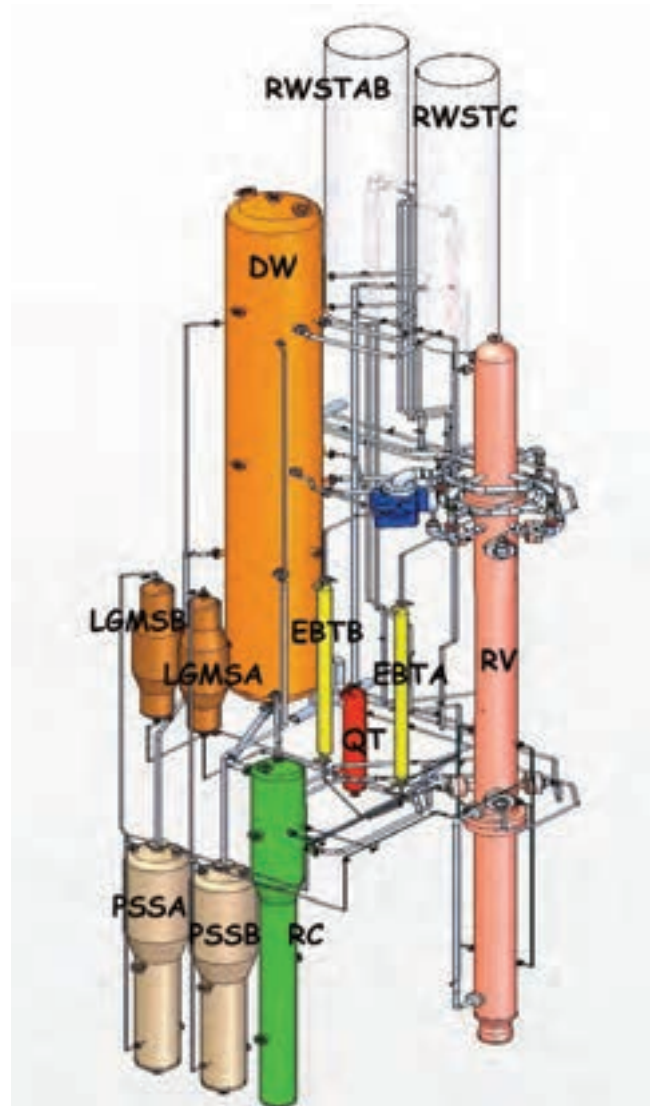
facility SPES-3.

- Prove sperimentali e modello numerico dello Spool Piece (costituito da Venturi e misuratore di grado di vuoto) in deflusso bifase.
- Messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES-3.
- Validazione codici e qualifica modelli per problematiche di miscelamento e scambio termico in reattori innovativi.

SPES - Simulatore Pressurizzato Esperienze di Sicurezza



Nodalizzazione del circuito primario per calcoli col codice TRACE



Vista generale di SPES-3

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: F. De Rosa, felice.derosa@enea.it



Collaborazione ai Programmi Internazionali per il Nucleare di IV Generazione

SCENARIO DI RIFERIMENTO

Nell'ambito dell'iniziativa europea ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative), emanazione dello Strategic Energy Technology-Plan (SET-Plan), di cui ENEA è membro, si è rilanciato in Europa lo sviluppo tecnologico di sistemi nucleari veloci di quarta generazione.

Tra i sistemi di quarta generazione considerati nella strategia europea, particolare interesse rivestono i sistemi refrigerati a sodio (SFR – ASTRID, sviluppo di breve termine) o a metallo liquido pesante (LFR – ALFRED, ADS – MYRRHA, sviluppo di medio termine), in fase di

progettazione avanzata, in vista di richiedere all'autorità di sicurezza dei singoli stati membri l'autorizzazione alla costruzione ed esercizio nel periodo 2014-2020. I sistemi nucleari di quarta generazione devono rispondere ai seguenti requisiti:

- sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- economicità, ovvero basso costo del ciclo di vita dell'impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- sicurezza e affidabilità, in termini di bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e ampia tolleranza anche a gravi errori umani, con l'obiettivo finale di non dover richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, escludendo qualsivoglia scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito;
- resistenza alla proliferazione e protezione fisica tali da rendere non conveniente il furto o la produzione non dichiarata di materiale nucleare o l'uso illecito



della tecnologia e da assicurare un'aumentata protezione contro attacchi terroristici.

In particolare i sistemi a spettro neutronico veloce permettono la chiusura del ciclo del combustibile e quindi la minimizzazione del volume di scorie e della loro radiotossicità.

In tale contesto, l'impegno italiano è focalizzato ai sistemi LFR – Lead cooled Fast Reactor (anche del tipo SMR – Small Modular Reactor) nella configurazione a piscina integrata, poiché potenzialmente soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di quarta generazione.

L'uso di un refrigerante chimicamente compatibile con aria e acqua, con ottime proprietà intrinseche di schermaggio delle radiazioni e di ritenzione dei prodotti di fissione tipicamente responsabili della contaminazione ambientale in caso di incidente severo, e operante a bassa pressione, permette di aumentare sensibilmente la protezione fisica della popolazione residente nelle zone limitrofe alla installazione nucleare, riducendo inoltre la necessità di robusti e complessi sistemi di protezione contro eventi catastrofici (anche terroristici).

OBIETTIVI

Le attività di ricerca sono focalizzate sulla tecnologia dei reattori a piombo sia in una prospettiva futura di sviluppo del nucleare, sia per l'interesse e le competenze espresse dall'industria Italiana.

L'obiettivo principale è quindi il supporto alle attività di ricerca e sviluppo finalizzate alla costruzione

del reattore dimostrativo a piombo, di concezione ENEA-ANSALDO, denominato ALFRED. Sono state individuate tre macro aree di intervento, tutte afferenti allo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR refrigerati a piombo, che rappresentano altrettanti ambiti di criticità per ALFRED.

La prima macro area di intervento è denominata “progettazione di sistema e analisi di sicurezza”. Il progetto di un sistema LFR di grande o di piccola taglia (ALFRED, SMR-Lead), deve rispondere ai tre requisiti fondamentali di sicurezza, sostenibilità ed economicità per essere accettato e attuato. Vengono quindi approfonditi gli aspetti di sostenibilità, e tramite il reattore TAPIRO (ENEA) si sono avviati studi di dinamica neutronica in sistemi veloci. Si prosegue con le attività di concettualizzazione e progettazione del nocciolo del DEMO-LFR, e sono attivati studi e analisi di sicurezza sia sul sistema LFR che sul combustibile nucleare. Infine proseguono le attività di studio relativamente al rilascio e migrazione dei prodotti di fissione in caso di scenari di “core degradation” e dell’interazione “fuel-coolant”.

La seconda macro area ricade nell’area dei materiali e studi di fabbricazioni, ed è principalmente dedicata a esplorare l’applicabilità di differenti tecnologie di protezione dei materiali strutturali quando proposti per la realizzazione di guaine di combustibile per reattori refrigerati a piombo. Si tratta di tecnologie sviluppate da centri di ricerca italiani che verranno applicate e qualificate sperimentalmente in condizioni simili a quelle operative.

La terza macro area, afferente alla termoidraulica del refrigerante, ha carattere teorico-sperimentale e viene condotta con gli impianti di prova (NACIE, CIRCE, HELENA) del centro Brasimone. Le attività si articolano su: preparazione delle esperienze, conduzione delle prove, analisi numerica dei risultati, messa a punto e accoppiamento dei metodi di calcolo.

In sintesi gli obiettivi proposti sono:

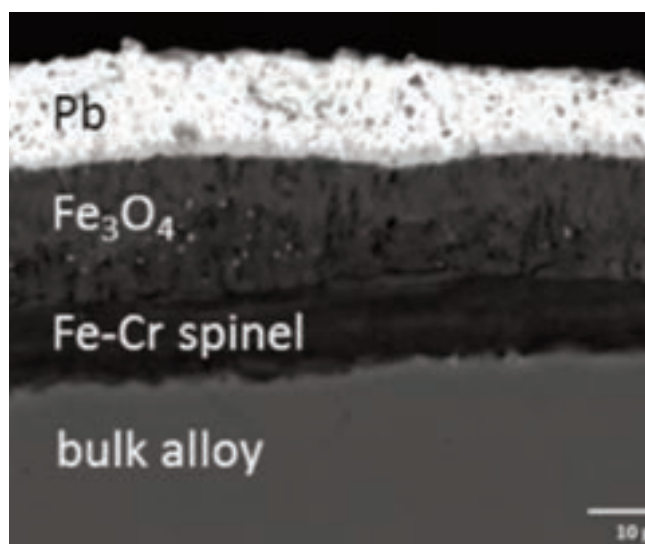
- qualifica e caratterizzazione sperimentale di componenti critici e strumentazione prototipica; realizzazione di campagne sperimentali per la validazione di modellistica e codici di calcolo;
- sviluppo e validazione di codici di calcolo per l’analisi termo-fluidodinamica dei sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo; progettazione di dettaglio del nocciolo del dimostratore; studi di dinamica spaziale; progettazione del sistema primario e dei sistemi di rimozione del calore (SG, DHR, RVACS)
- caratterizzazione di acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da



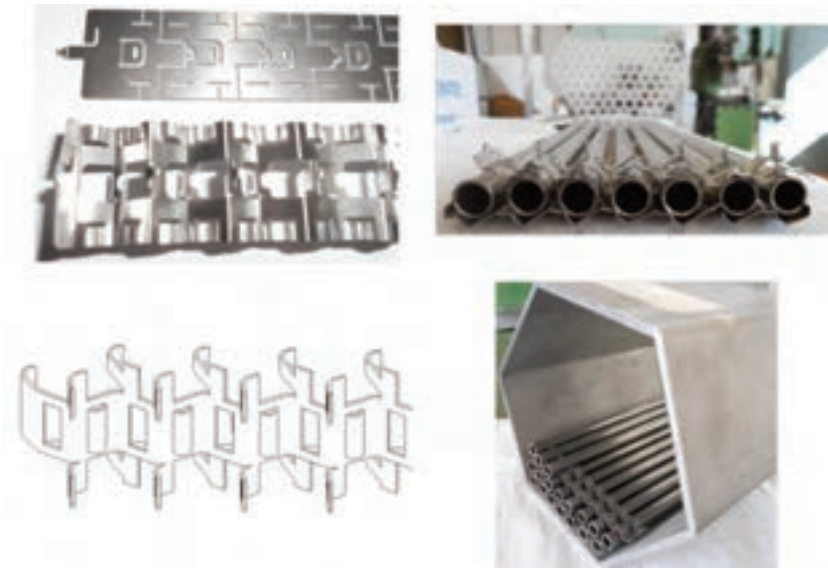
Vista del laboratorio di chimica del piombo presso il CR ENEA Brasimone

piombo;

- implementazione di infrastrutture di ricerca (HELENA), e aggiornamento di infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE), per la caratterizzazione del fascio di barrette, la caratterizzazione sperimentale dei sistemi di trasporto termico (DHR, SG), l’implementazione e la qualifica di strumentazione proto tipica; implementazione del laboratorio di termoidraulica dei metalli liquidi per la completa caratterizzazione dei refrigeranti per sistemi nucleari veloci;
- studi e sperimentazione in supporto alla progettazione del combustibile nucleare per reattori veloci, interazione refrigerante-combustibile-camicia.



Analisi SEM di acciaio strutturale soggetto a corrosione in piombo stagnante (550 °C, 1000 h)



Vista griglia spaziatrice del DEMO-LFR ALFRED (FN SPA)

RISULTATI

I principali risultati delle attività hanno riguardato lo sviluppo e validazione di codici di calcolo per l'analisi termo-fluidodinamica e la progettazione di dettaglio del nocciolo, la progettazione del sistema primario e dei sistemi di rimozione del calore (SG, DHR, RVACS) e lo sviluppo di strumentazione e sistemi di controllo a supporto del progetto.

Si è inoltre provveduto ad avviare, e in parte completare, la caratterizzazione di acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo, di particolare rilevanza per lo sviluppo della tecnologia degli LFR.

Infine si sono implementate infrastrutture di ricerca di enorme rilevanza (HELENA), e aggiornate le infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE), con lo scopo sia di caratterizzare lo scambio termico nel nocciolo, sia di caratterizzare sperimentalmente i sistemi di trasporto termico (DHR, SG).



Fuel Pin Bundle Simulator, Impianto NACIE

Riguardo la progettazione del nocciolo LFR sono stati affrontati diversi aspetti della ricerca che hanno condotto ai seguenti risultati:

- l'esperimento GUINEVERE critico con combustibile metallico e analisi coefficienti di correlazione con MHYRRA;
- la caratterizzazione neutronica e termoidraulica del nocciolo di AFRODITE. Nell'ambito delle analisi di sicurezza sono state avviate attività di supporto alla progettazione del combustibile nucleare e i risultati ottenuti si possono riassumere secondo il seguente elenco:
 - modelli di rilascio dei gas di fissione per combustibili MOX ad elevato burnup, validazione mediante database sperimentali; analisi del comportamento del combustibile in condizioni nominali e incidentali;
- qualifica di codici di calcolo dedicati alle analisi di sistema avanzati, con determinazione dei parametri di sicurezza del core e dell'andamento del burnup di un reattore veloce refrigerato a metallo liquido;
- analisi di uno scenario di flow-blockage, parziale congelamento e "core compaction" in un sistema LFR.

Per il rilascio e la migrazione dei prodotti di fissione i principali risultati ottenuti consistono in:

- studio sulle tecniche di abbattimento degli off-gas e studi sulle interazioni fra gas di fissione e refrigerante in un reattore LFR; studi di interazione combustibile-refrigerante;
- tecniche di ri-processamento del combustibile irraggiato per sistemi "adiabatici", e sperimentazione pirometallurgica sull'impianto pilota Pyrel III.

Riguardo la qualifica di coating e materiali strutturali per sistemi LFR sono stati riportati, descritti e discussi i risultati relativi alla realizzazione e alla successiva caratterizzazione microstrutturale, morfologica e meccanica di rivestimenti di FeAl, FeCrAl e Al_2O_3 per la protezione degli acciai dalla corrosione da metalli liquidi pesanti. I risultati ottenuti sono:

- sviluppo di sistemi multilayer per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo;
- sviluppo di layer per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo mediante tecniche

di ablazione laser;

- caratterizzazione di coating realizzati mediante ablazione laser, attraverso prove di irraggiamento con ioni pesanti.

Nell'ambito degli studi sulla chimica del refrigerante e sulla fabbricazione di componenti prototipici si è proceduto con gli studi di fabbricazione relativi a componenti prototipici del sistema primario di un sistema LFR progettati da ENEA. I risultati ottenuti sono:

- fine fabbricazione di elementi prototipici del sistema primario dell'LFR;
- implementazione del laboratorio della chimica del piombo.

Sono stati svolti studi per la sperimentazione e la modellazione della termoidraulica del metallo liquido refrigerante nei reattori di IV generazione che hanno condotto ai seguenti risultati:

- progettazione e fornitura di un generatore di vapore per sistemi LFR con tubi a baionetta a doppia parete;
- prove sperimentali di termoidraulica in sistemi integrali a piscina (Impianto CIRCE);
- prova e analisi dei risultati sperimentali ottenuti per la qualifica del prototipo di GV a spirale piana per sistemi LFR;
- accoppiamento di codici CFD e codici di sistema, sviluppo di codici di calcolo (FEM-LCORE).

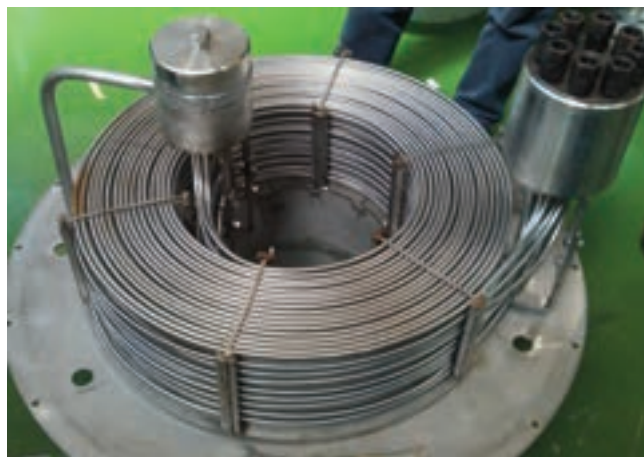
Gli studi sperimentali per lo scambio termico nei sistemi LFR e SMR hanno riguardato sperimentazioni sullo scambio termico nei sistemi LFR e SMR e hanno condotto ai seguenti risultati:

- completamento del circuito primario dell'impianto HELENA e progettazione del circuito secondario ad acqua in pressione; progettazione e realizzazione del sistema di controllo e potenza;
- up-grade impianto a metallo liquido NACIE, e progetto del circuito secondario ad acqua in pressione.

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

Progetto B.3.1 – L.P.2: Collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione

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



Vista del Generatore di Vapore (GV) a spirale piana per applicazione in sistemi a piombo



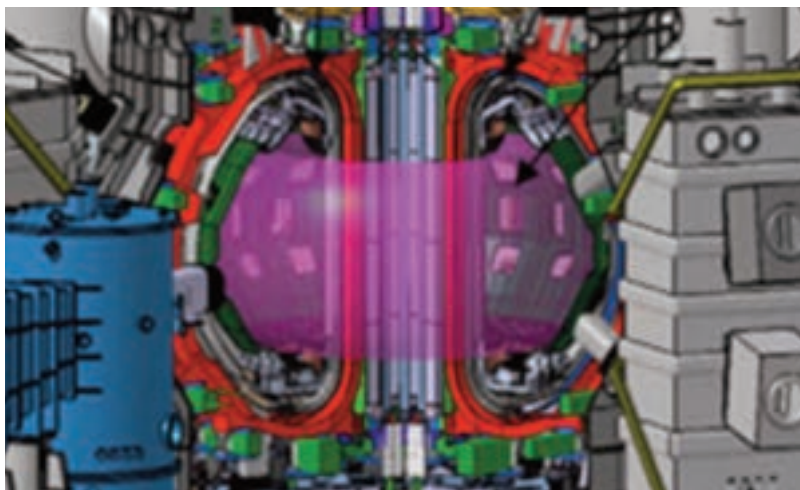
Vista sezione di prova impianto CIRCE



Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

SCENARIO DI RIFERIMENTO

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata una opzione molto concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. La ricerca sulla fusione vede impegnati tutti i Paesi tecnologicamente più avanzati (Europa, Giappone, USA, Russia, Cina, Corea e India) che 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 accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione, l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno ratificato un accordo di collaborazione per un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare a ITER. L'accordo, regolato da specifici Agreement of Collaboration con l'Agenzia Europea Fusion For Energy, 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, la realizzazione di una facility IFMIF per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti a un flusso di neutroni di energia da fusione e la creazione dell'International Fusion Energy Research Center (IFERC) che include un centro di supercalcolo e lo sviluppo di materiali avanzati come il SiC/SiC. Viene anche avviata una attività di ricerca finalizzata alla realizzazione di un esperimento di fusione denominato



FAST che ha lo scopo di preparare scenari operativi di ITER permettendo di studiare un plasma che brucia senza ricorrere all'uso del trizio.

OBIETTIVI

Costruzione

Tokamak JT-60SA

Si tratta di un Tokamak superconduttore di raggio pari a circa 3 m, in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA. Il JT-60SA sarà installato a Naka 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 4 trasformatori. Il sistema magnetico di JT-60SA è costituito da tre sotto sistemi: i 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale (TF), i 4 moduli che costituiscono il solenoide centrale (CS) in Nb3Sn necessario per indurre la corrente nel plasma, i 6 magneti in NbTi che generano il campo poloidale necessario per stabilizzare il plasma (EF). In particolare, i 18 moduli di magnete toroidale TF saranno di forma a D avvolti con un cavo in NbTi. Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare

la continuità elettrica; l'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico ed è caratterizzato da precisioni molto accurate per il corretto accoppiamento con la bobina. La cassa delle bobine toroidali è una struttura saldata di piastre metalliche e costituirà il supporto meccanico per tutto il sistema magnetico di JT-60SA.

IFMIF e IFERC

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 complessa facility di ricerca detta IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility). L'ENEA partecipa al programma provvedendo allo sviluppo del target per la produzione dei neutroni ad alta energia, alle relative attività di manutenzione remotizzata, allo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione dei metalli in presenza di litio e alla validazione dei sistemi di purificazione per il litio.

IFERC

Lo studio di compositi di SiC/SiC è una delle attività di ricerca e sviluppo di DEMO condotte nell'ambito del progetto IFERC. L'ENEA ha il compito di studiare le proprietà meccaniche e chimico-fisiche di tali compositi e di sviluppare un'analisi di modello in grado di simulare e interpretare le prove meccaniche su campioni.

FAST

Si intende realizzare un esperimento di fusione denominato FAST, tokamak compatto, in grado di realizzare scenari di elevate prestazioni con impulso lungo. FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER. Lo scopo è quello di preparare gli scenari operativi di ITER simulando l'effetto delle particelle alfa mediante ioni accelerati da sistemi di riscaldamento ausiliario. L'uso di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti ad alto flusso termico, sviluppate in ENEA, e le scariche di lunga durata consentono di provare componenti in condizioni rilevanti per il funzionamento di ITER e DEMO.

RISULTATI

Tokamak JT-60SA – Sono stati completati 6 doppi pancake con la composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione, e approvigionati e installati gli impianti di integrazione per l'assemblaggio finale delle bobine. Sono stati acquisiti impianti e attrezzature per la movimentazione e il posizionamento della bobina e dei componenti della cassa, impianto di saldatura TIG dedicato per la saldatura finale della cassa, sistemi per l'impregnazione e attrezzature di contenimento e riscaldamento per il processo di impregnazione nella cassa.

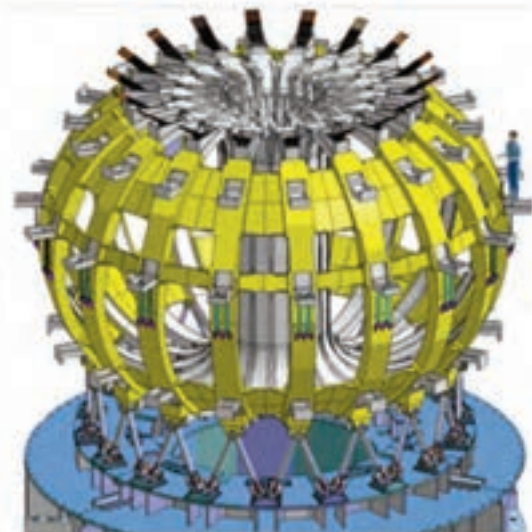
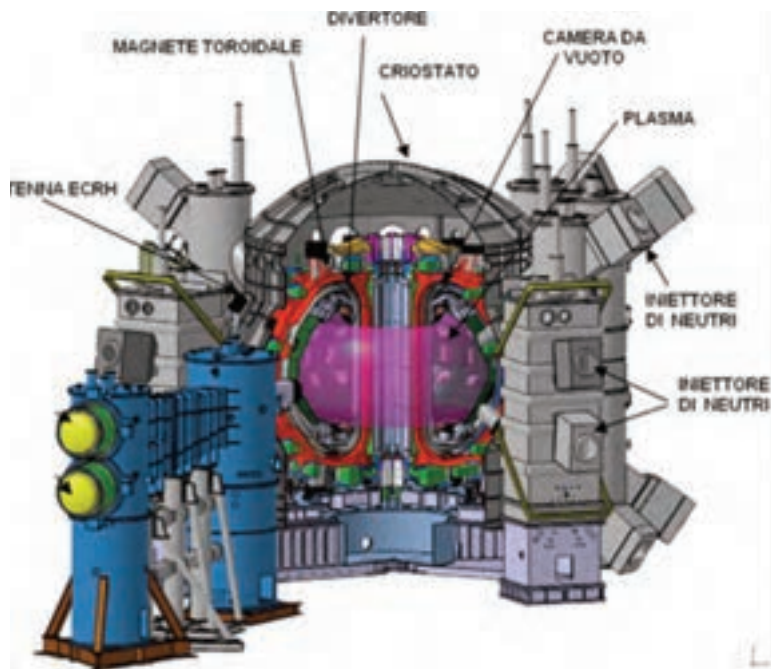
Sono stati completati gli studi sulla qualifica dei processi speciali e la realizzazione e fornitura dei componenti necessari alla composizione di tre casse di contenimento, inclusa l'ottimizzazione dei procedimenti costruttivi, la definizione dei trattamenti superficiali e delle tecniche mirate alla mitigazione degli stress residui.

È stata completata l'ingegnerizzazione di 4 Switching Network Unit per la commutazione rapida della corrente delle bobine del solenoide centrale. L'ingegnerizzazione consiste nell'identificazione dei componenti industriali, della strumentazione di corredo e dello sviluppo dei disegni di fabbrica. Inoltre, a valle dell'attività d'ingegnerizzazione, questa fase comprende l'assemblaggio e la disposizione negli armadi di alimentazione e controllo del primo SNU detto anche prototipo.

Riguardo la realizzazione degli 8 alimentatori AC/DC e dei sei trasformatori per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della Macchina JT-60SA è prevista l'ingegnerizzazione con componenti industriali di 6 alimentatori per le bobine poloidali e 2 alimentatori di controllo e nello sviluppo dei disegni di fabbrica di 6 trasformatori. Tutto questo è oggetto di un contratto stipulato con l'A.T.I. POSEICO-JEMA

In sintesi i risultati ottenuti sono:

- impianto di movimentazione e posizionamento della bobina e dei componenti della cassa e sistema di impregnazione e attrezzature di contenimento e riscaldamento per il processo di impregnazione nella cassa;
- realizzazione dei primi 2 doppi pancake;
- completamento di 6 doppi pancake e relativa composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione (contratto ASG);
- componenti meccanici per la composizione di tre casse di contenimento (contratto Walter Tosto);
- realizzazione del primo elemento delle SNU detto



Vista anisometrica della macchina Tokamak JT-60SA e del sistema magnetico toroidale)

anche prototipo (contratto OCEM);

- ingegnerizzazione di 6 alimentatori per le bobine poloidali e 2 alimentatori di controllo e nello sviluppo dei disegni di fabbrica di 6 trasformatori (contratto POSEICO-JEMA).

IFMIF

L'attività prevista consiste nell'installare i sistemi di monitoring, forniti da ENEA, per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone). In tale ambito, prima del trasferimento dei componenti presso il centro di Oarai, sono state apportate alcune migliorie al sistema di controllo della temperatura per il misuratore di resistività. I componenti spediti in dicembre 2012 sono attualmente stoccati presso il centro di Oarai.

È stata portata avanti l'attività sperimentale sui fenomeni di corrosione ed erosione per IFMIF interamente di responsabilità ENEA. Tale programma fornisce i dati attesi di corrosione ed erosione per la corretta esecuzione della progettazione dell'intero impianto a litio di IFMIF. Le attività svolte hanno portato alla realizzazione e qualifica dell'impianto sperimentale per prove di corrosione/erosione in litio (LiFus6).

L'impianto LiFus6 utilizzato per lo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione è fornito di un sistema di purificazione delle impurezze disciolte nel litio. È noto infatti che la concentrazione dell'azoto nel litio è l'elemento che promuove i fenomeni di corrosione degli acciai e pertanto la sua concentrazione deve essere mantenuta entro limiti accettabili. Per IFMIF tale

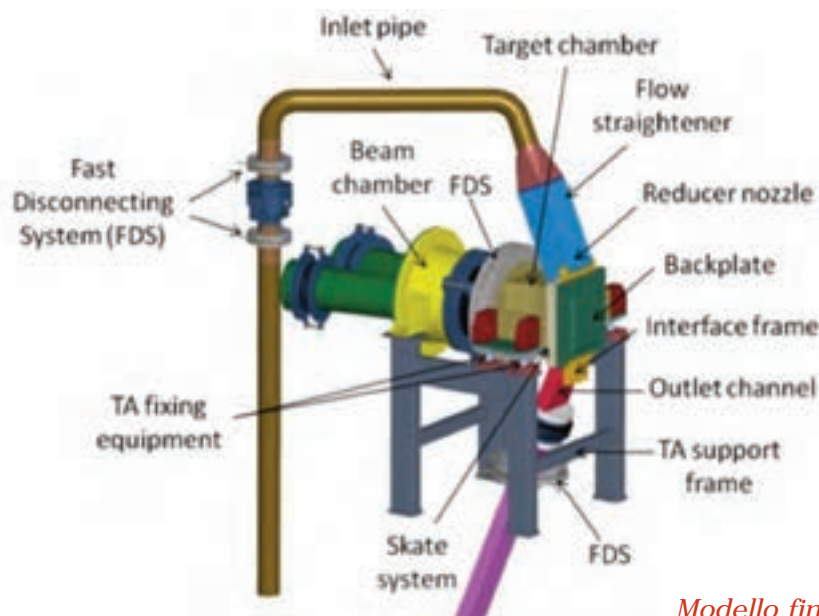
limite è stato fissato in 10 ppm. Il sistema di monitoring attualmente in uso si basa sulla misura della resistività elettrica del litio ed è conosciuto come resistivity meter. L'obiettivo dell'attività è stato quello di fornire le curve di calibrazione della resistività ρ (T °C, $N\%$).

Sono state inoltre completate la validazione delle procedure ottimizzate per il ricondizionamento del target assembly di IFMIF con valutazione della loro affidabilità e la realizzazione dei dispositivi per la validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target assembly.

IFERC

Sono stati sviluppati e caratterizzati materiali compositi ceramici in matrice e fibra di carburo di silicio per l'utilizzo come componenti funzionali e strutturali.

Il primo passo ha riguardato la messa a punto di tecnologie costruttive per la realizzazione di compositi ceramici con matrice e fibra in carburo di silicio attraverso la tecnologia CVI (Chemical Vapor Infiltration). Sono stati fabbricati pannelli di spessore 3, 4 e 5 mm e tubi di piccolo diametro con successiva caratterizzazione chimico-fisica e a lavorazione meccanica per l'ottenimento di particolari da utilizzare come componentistica nel forno destinato alla caratterizzazione del composito ceramico SiCf/SiC in litio-piombo liquido. Sono state sviluppate anche tecniche per l'ottenimento di prismi cavi a sezione quadrata di grande spessore e con lato di almeno 100 mm



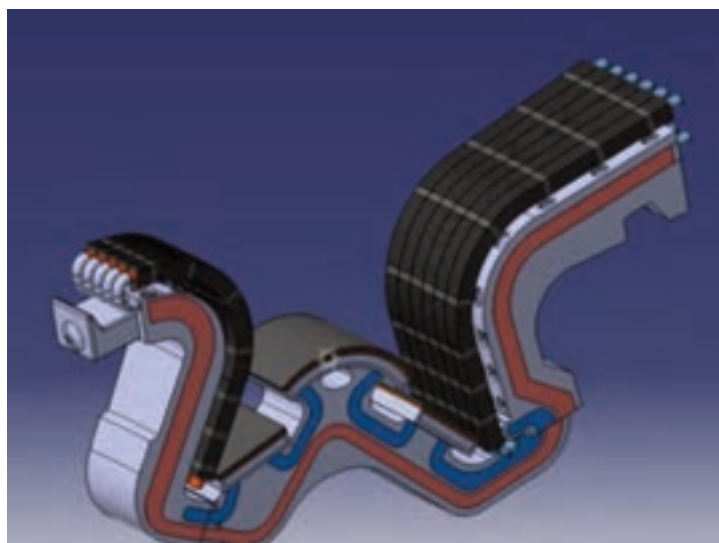
Modello finale 3D del Target Assembly di IFMIF

È stato realizzato anche un apparato per prove ad alta temperatura (1000 °C) di un target rotante di SiCf/SiC nel metallo liquido litio-piombo al fine di caratterizzare i fenomeni di erosione e corrosione. È stato progettato e realizzato il forno ad alta temperatura e sono stati definiti tutti gli impianti accessori necessari per l'esecuzione delle prove.

FAST

Sono stati fatti sostanziali progressi nell'elaborazione delle basi fisiche e nella progettazione della macchina allo scopo di ridurre il carico termico specifico sul divertore. In particolare, la cooperazione tra ENEA, CREATE e LTCalcoli, con le rispettive differenti competenze, ha permesso di condurre in dettaglio, lo studio delle topologie magnetiche innovative "Snow Flake" (SF) e "Super-X (SX)" e dei relativi adattamenti richiesti alla macchina FAST, evidenziandone limiti e vantaggi sia fisici che tecnologici.

È stata eseguita la progettazione, con relative verifiche strutturali, di un innovativo concetto di divertore che permetterebbe un confronto diretto (sullo stesso esperimento) tra una configurazione magnetica con X point standard e con una configurazione (denominata "Snow Flakes") che, in teoria, potrebbe risolvere il problema del power exhaust su un reattore a Fusione.



Progetto finale del nuovo concetto di divertore dopo le ottimizzazioni strutturali e di remote handling

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
 Progetto B.3.1 – 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 sono state suddivise in quattro linee di attività principali, che si articolano a loro volta in differenti obiettivi.

Le attività che sono state sviluppate in questo anno e che interesseranno anche i prossimi due si articolano attraverso le seguenti quattro linee: i) reti di poligenerazione; ii) gestione ottimale 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, oltretutto incrementare la redditività economica e i risparmi energetici nella gestione di questi servizi.

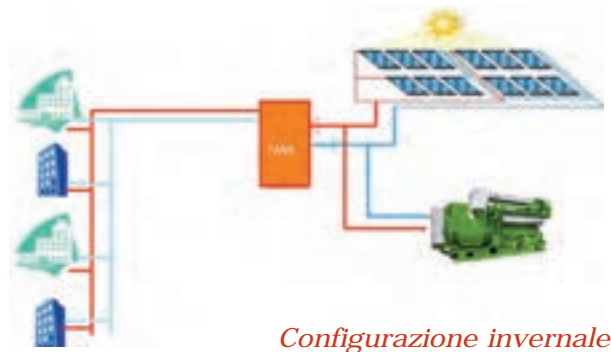
I risultati ottenuti per questo obiettivo sono riassumibili in due punti: come prima cosa si sono sviluppati una serie di strumenti per l'ottimizzazione dei consumi energetici del sistema edifici-impianti nella configurazione di distretto energetico, attraverso la modellazione dinamica dei carichi termici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

In questa linea di attività l'obiettivo è quello di sviluppare una metodologia che permetta di supportare un gestore di una rete di edifici terziari (ad es. uffici, scuole, agenzie postali o bancarie ecc.) e/o il gestore di uno "smart village" al fine di abbattere tutte le fonti di consumo energetico all'interno del village e interagire con i fornitori energetici (elettrici o termici) per attuare politiche di controllo della domanda basate su una modellistica avanzata che non penalizzi il comfort dell'utente evitando quanto più possibile distacchi dalla rete.

L'approccio "building network management" può essere applicato su vasti stock di edifici (ad es. quartieri, città, territorio) anche non connessi tra loro e in questo caso l'attenzione è focalizzata alla riduzione dei consumi ed alla gestione attiva della domanda. Quando si realizza la condizione di condivisione della rete termica (con presenza di generazione distribuita termica e/o elettrica) il modello si arricchisce della gestione ottimizzata dei sistemi di produzione locale della energia ed in questo caso si realizza la condizione dello "Smart District".

Sono state svolte principalmente quattro attività: i) sviluppo di un simulatore dei consumi di un edificio / rete di edifici; ii) definizione degli algoritmi di ottimizzazione e test su simulatore; iii) implementazione di un sistema di monitoraggio ed analisi consumi di una rete di edifici; iv) validazione metodologie di



Configurazione invernale



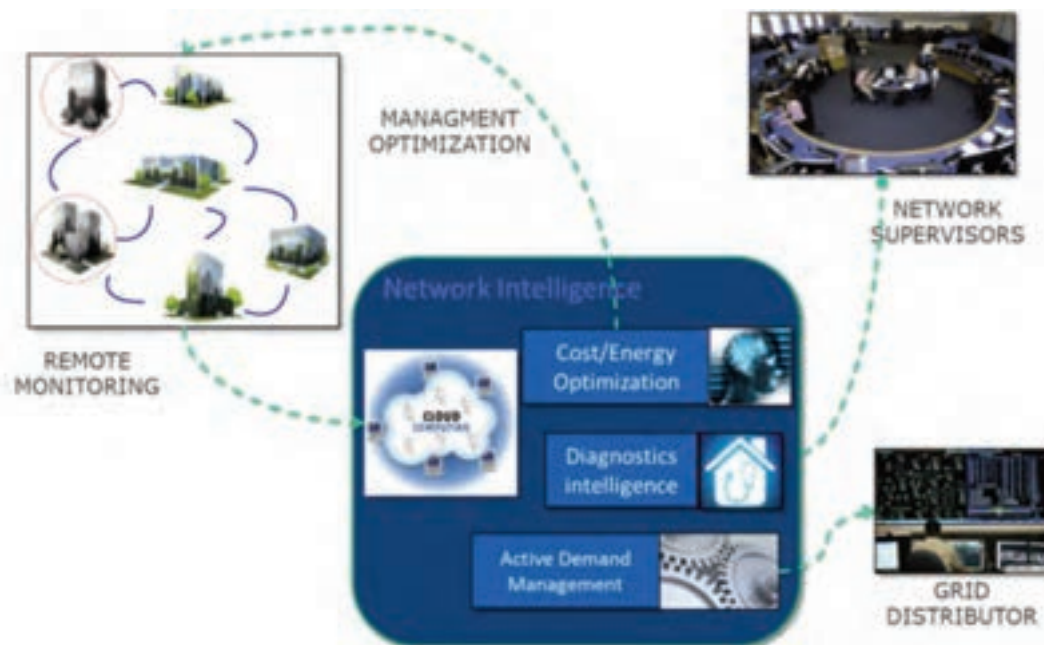
Configurazione estiva

Architettura del sistema di poligenerazione: impianto di trigenerazione con integrazione del solare termico

diagnostica e controllo su un singolo edificio, ampliamento funzioni 'Smart Village Casaccia' e definizione dello scenario di riferimento teorico di 'active demand'.

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) progettazione di prodotti efficienti e loro utilizzo in impianti efficienti (COEELLO, sistema di illuminazione modulare a LED per interni, il cui motore luminoso può ospitare sia LED a fosfori remoti sia altri tipi di LED; HumbleBee, innovativo sistema di illuminazione per ambienti interni basato su apparecchi di illuminazione a fosfori remoti e un sistema di controllo smart wireless per la gestione dell'impianto di illuminazione, con le caratteristiche di migliorare la qualità della luce, la sensibilità ambientale e l'efficienza energetica nel caso di utenze lavorative; PLUS ME, sistema modulare a LED per

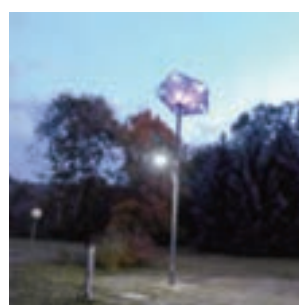


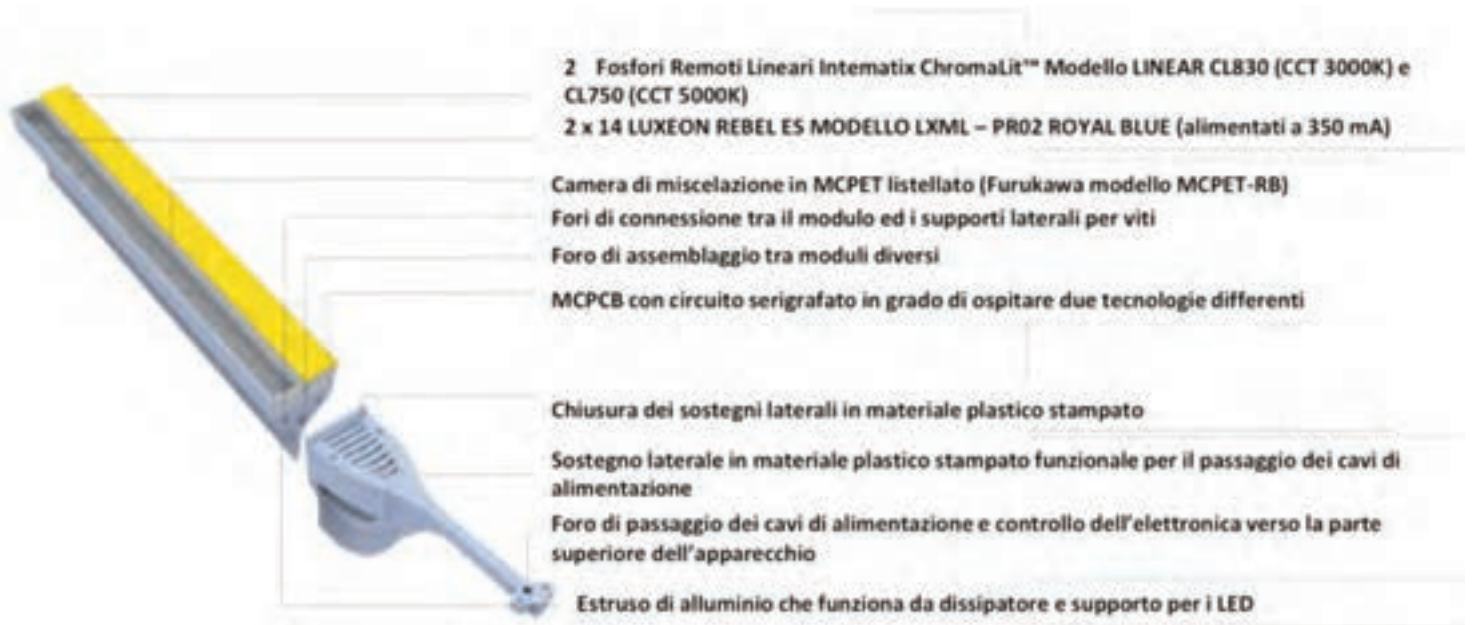
strade urbane a traffico motorizzato) e sulla risposta del sistema visivo umano agli stimoli spaziali e spettrali legati all'illuminazione, alla ricerca di una misura per quantificare la qualità e l'affidabilità di una sorgente di luce in dipendenza dell'applicazione e per comprendere l'influenza delle nuove sorgenti luminose sulle prestazioni cognitive; iii) sviluppo di azioni finalizzate a sperimentare e favorire la più ampia diffusione fra operatori economici e istituzioni di strumenti tecnico-procedurali mirati all'efficienza energetica nel settore dell'illuminazione (progetto Lumière, con sviluppo di tool per i Comuni).

Tecnologie per l'industria del freddo

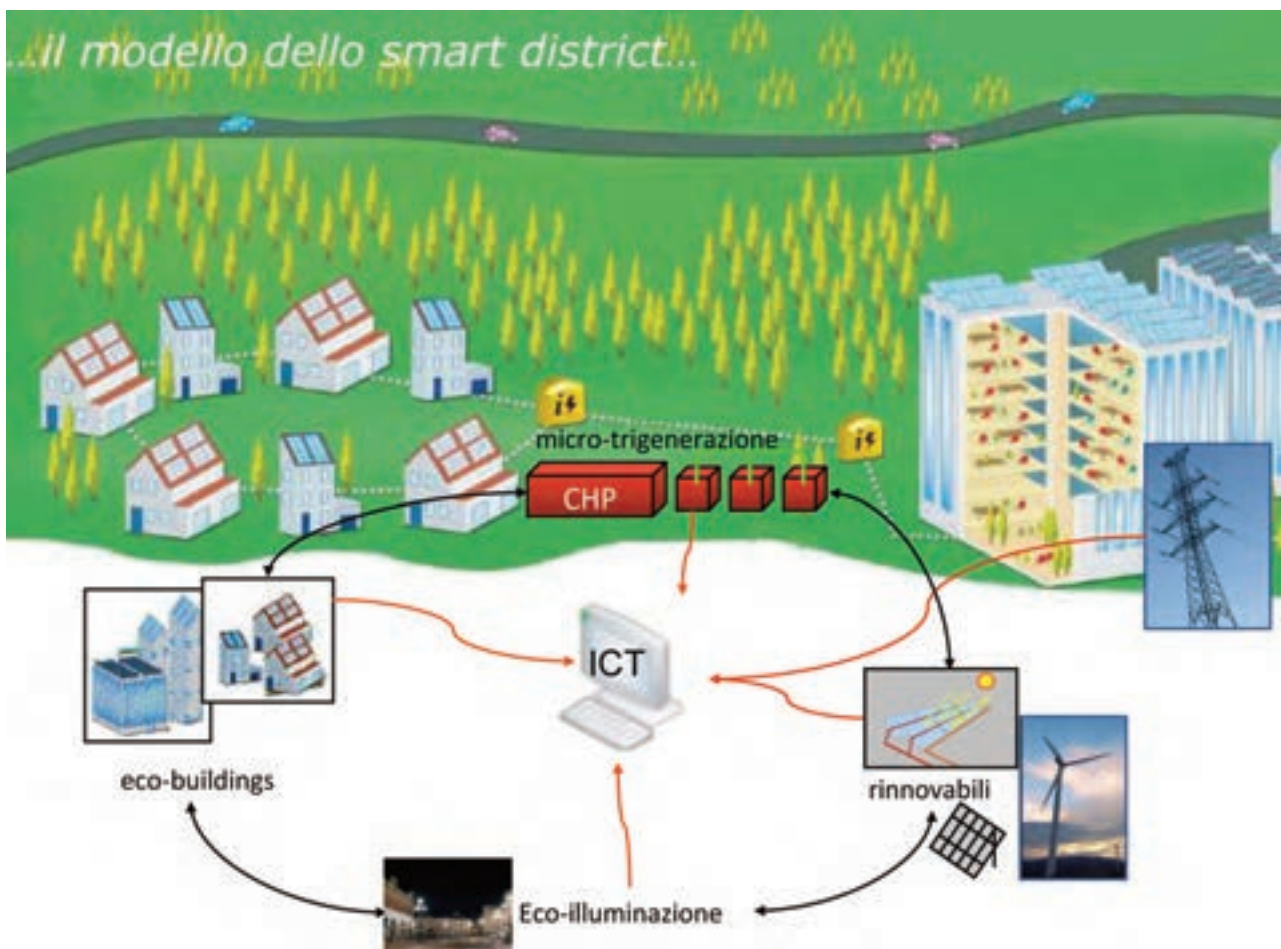
Circa l'80% dei prodotti alimentari avviati al consumo sono stati prodotti o trasformati presso stabilimenti dotati di attrezzature frigorifere. È evidente, dunque, che il settore della refrigerazione ed in particolare tutti gli impianti fissi e mobili che fanno parte della catena del freddo, possono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

Le attività di ricerca si sono articolate su due direttrici: lo sviluppo di sensore elettronico capace di individuare il grado di deperibilità dei prodotti e, quindi, di ottimizzare le condizioni di esercizio, e l'individuazione di materiali di isolamento per la refrigerazione con migliori performance.





Il singolo modulo COELO



Lo smart district

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

Progetto C.1: Risparmio di energia nei settori Industria, Servizi e Civile

Referente: I. Bertini, 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 rimarca il ruolo dell'efficienza energetica nel settore civile e prescrive agli Stati membri una serie di azioni e interventi sugli edifici della PA centrale quali: la riqualificazione energetica del parco edifici per una quota annuale, a partire dal 2014, corrispondente al 3% della superficie utile del parco

stesso; attività di formazione; diffusione e promozione di sistemi per cogenerazione e teleriscaldamento. Tale direttiva riprende molti dei criteri presenti nella direttiva 31/2010/CE che obbliga tra l'altro gli Stati membri a dotarsi di standard e strumenti in grado di

assicurare e accelerare l'attuazione dei programmi per l'efficienza e il risparmio energetico e raggiungere l'obiettivo del nearly Energy Zero Building (nEZB). In particolare gli edifici pubblici, nuovi o soggetti a riqualificazione, dovranno rispettare lo standard nEZB dal 1° gennaio 2019, mentre tutti gli altri, anche privati, lo dovranno rispettare dal 1° gennaio 2021.

La realizzazione di interventi di efficienza energetica nel settore pubblico va inquadrata in un'azione di sistema che ottimizzi l'impiego delle risorse finanziarie programmando e dimensionando l'area d'intervento, sulla base dei dati disponibili, e creando la giusta massa critica anche con l'aggregazione di territori limitrofi quanto più omogenei. Quest'approccio è strategico per utilizzare i fondi messi a disposizione dall'UE, che richiedono progetti con impegno finanziario importante (da 5 mln € a 50 mln €). Economie di scala e di scopo consentirebbero di abbattere i costi unitari d'intervento e assicurare ra-



zionalità complessiva all'intervento. Si presenterebbero inoltre opportunità interessanti per le ESCo e gli investimenti avrebbero dimensioni più attraenti per gli istituti di credito. Da non trascurare l'opportunità di sviluppare schemi, fruibili da parte della PA, per ottenere finanziamenti dal Fondo Europeo per l'Efficienza Energetica o da altri analoghi.

Sono pertanto necessari sia lo sviluppo di strumenti per la valutazione degli indicatori di efficienza energetica, dei componenti volti a migliorare le prestazioni dell'involucro e degli impianti e servizi tecnologici integrati, sia lo studio di particolari

forme di finanziamento. Di grande importanza è lo sviluppo di strumenti e modelli applicativi semplificati per la diagnosi e per la certificazione energetica degli edifici, per il calcolo dell'EP in regime estivo e per la definizione di nuovi benchmark per le singole destinazioni d'uso, per l'accesso a finanziamenti europei e nazionali, per la sensibilizzazione dell'utenza sulla convenienza degli interventi per l'efficienza energetica e sull'applicazione di sistemi per misurarne l'efficacia.

forme di finanziamento.

Di grande importanza è lo sviluppo di strumenti e modelli applicativi semplificati per la diagnosi e per la certificazione energetica degli edifici, per il calcolo dell'EP in regime estivo e per la definizione di nuovi benchmark per le singole destinazioni d'uso, per l'accesso a finanziamenti europei e nazionali, per la sensibilizzazione dell'utenza sulla convenienza degli interventi per l'efficienza energetica e sull'applicazione di sistemi per misurarne l'efficacia.

OBIETTIVI

Le attività hanno lo scopo di dare un significativo contributo al raggiungimento degli standard europei e nazionali sull'efficienza energetica degli edifici e definire valori di benchmark e di riferimento prestazionali a supporto della normativa e delle politiche energetiche. In tal senso è necessario sviluppare una metodologia comparativa cost-optimal, che faccia

riferimento alle linee guida della Commissione UE, la cui applicazione ha richiesto la definizione di edifici di riferimento per il residenziale (villino, piccolo condominio e grande condominio) e non residenziale (uffici), l'individuazione di almeno 10 tipologie di intervento (su involucro e impianti) e un set di standard prestazionali su cui sviluppare le opportune simulazioni per determinare i valori di efficienza energetica raggiungibili, tenendo conto anche del rapporto costo/beneficio; la metodologia inoltre richiede di svolgere analisi di sensibilità e valutazioni macro economiche e finanziarie.



Edificio dimostratore della scuola Istituto Tecnico Commerciale A. Genovesi, Roma

Gli obiettivi specifici sono articolati come segue:

- Analisi dei consumi energetici degli edifici non residenziali con particolare attenzione a quelli a uso pubblico, attraverso l'applicazione di tecnologie e sistemi di rilevamento e di sistemi innovativi di monitoraggio.
- Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva.
- Studio di edifici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio, applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani.
- Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile.
- Caratterizzazione dell'efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica.
- Sviluppo e assessment di cool material per l'efficienza energetica e il controllo ambientale a scala urbana e di edificio.
- Sviluppo di componenti innovativi per la riduzione dei carichi termici per l'edificio.
- Studio e sviluppo di metodologie e strumenti per le valutazioni di interventi di efficienza energetica per gli edifici pubblici e privati finalizzati al nEZB (nearly Zero Energy Building).
- Sviluppo e promozione di strumenti software per la comunicazione e la sensibilizzazione presso l'utenza.
- Progetto per il dimostratore di riqualificazione della scuola Istituto Tecnico Commerciale A. Genovesi Roma.

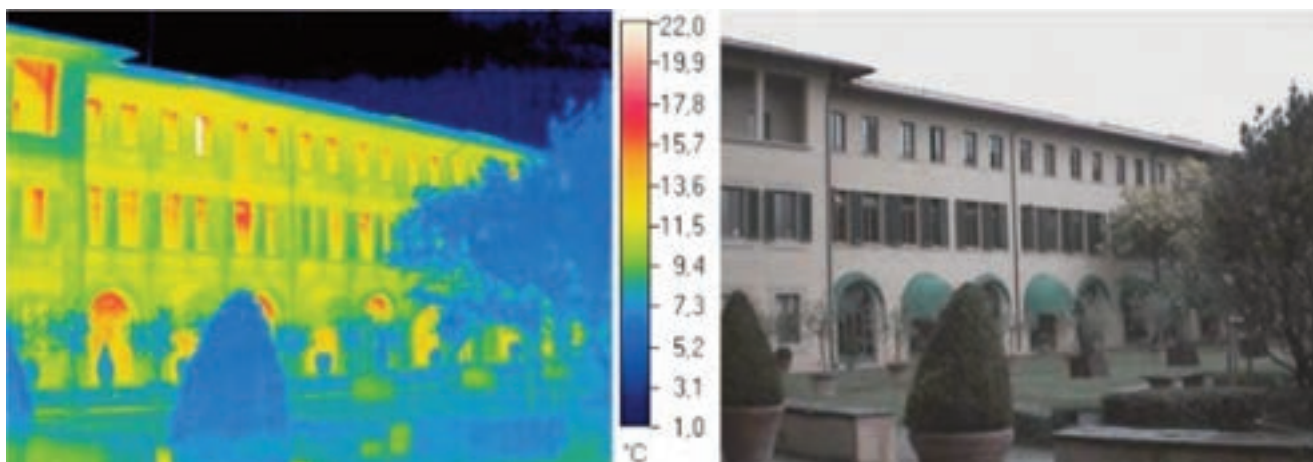


Fabbisogno energetico dei blocchi dell'edificio dimostratore

RISULTATI

È stata sviluppata e definita una metodologia per la valutazione tecnico-economica degli interventi atti a implementare l'efficienza energetica di edifici nuovi ed esistenti, facendo riferimento alle linee guida della UE, così come indicato nella Direttiva recast 2010/31/CE.

Per rispondere a quanto previsto dalla Direttiva 2012/27/CE è stata svolta un'indagine mirata agli edifici a uso uffici della Pubblica Amministrazione e del Governo centrale attraverso l'analisi del parco immobiliare nazionale, al fine di caratterizzare gli immobili dal punto di vista del sistema edificio-impianto e stimare la potenzialità di risparmio energetico tenendo conto del parametro costo/beneficio. Sulla base dei dati raccolti si è ottenuta una valutazione degli edifici che presentano maggiori problemi



Termografia di un edificio della PA che evidenzia lo stato delle criticità dell'involucro

dal punto di vista di efficienza energetica e individuare gli interventi da realizzare. In tal senso sono stati sviluppati strumenti (v. ad es. in figura la termografia di un edificio) e schede tecniche a supporto delle PA per le valutazioni necessarie.

Sono stati sviluppati modelli di supporto alla programmazione e valutazione, un tool informatico per le diagnosi energetiche degli edifici (scuole e uffici), un sistema esperto informatico per le valutazioni dei consumi energetici degli edifici, facendo riferimento alla Direttiva 2010/31/CE, e metodologie finalizzate all'ottimizzazione e alla valutazione degli interventi. Infine è stata sviluppata una metodologia per la verifica dei risultati derivanti dai bilanci energetici territoriali e la definizione di strumenti per le valutazioni delle prestazioni energetiche degli edifici.

Parallelamente a queste attività ne è stata sviluppata una relativa alla messa a punto di modelli e strumenti di natura tecnico-amministrativo-finanziario che consentano alle PA di realizzare gli interventi sugli edifici. Si è sviluppato una guida per facilitare le PA ad utilizzare le ESCo, una serie di attività di interesse anche per la parte tecnico-amministrativa (contrattualistica, modello per le diagnosi energetiche ecc.) e per la conoscenza di strumenti e procedure che le PA possono utilizzare per il finanziamento tramite terzi. È stato sviluppato un modello per facilitare le valutazioni, indirizzare le politiche di intervento e sensibilizzare gli utenti finali e gli operatori del settore dell'edilizia.

Nell'ambito degli interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni sono state promosse, attraverso i Tavoli 4E (Efficienza Energetica Edifici Esistenti) ENEA, azioni e modelli per la programmazione, il monitoraggio e la verifica delle misure promosse al fine di proporre e definire criteri armonizzati. Sono stati sviluppati, quindi, strumenti

informatici semplificati a supporto delle PA per il calcolo semi-dinamico delle prestazioni energetiche degli edifici, per il controllo dei consumi degli edifici della PA con le evidenze delle anomalie rispetto al benchmark di riferimento, e una serie di strumenti e modelli tecnico-amministrativi che riguardano i contratti con garanzia e la promozione dell'utilizzo di ESCo per gli interventi di efficientamento energetico degli edifici pubblici e modelli per facilitare l'accesso ai fondi europei.

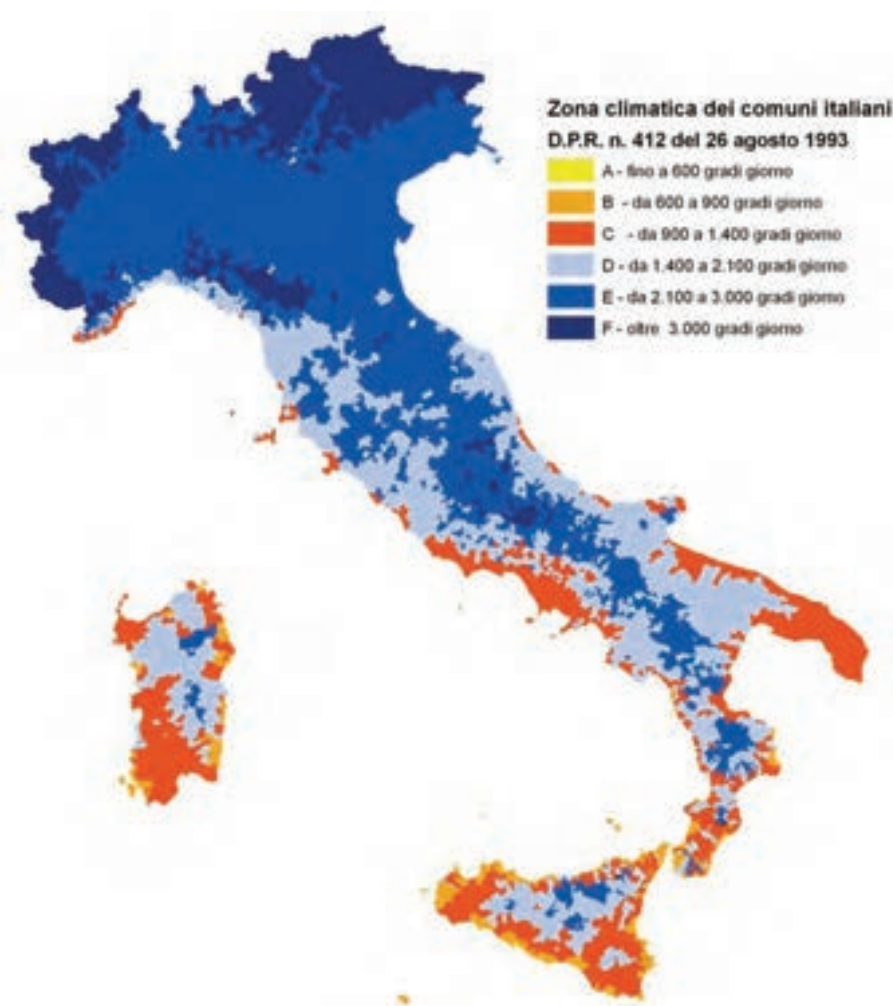
Per la proposta di revisione della norma UNI-10349 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici", alla luce dei nuovi parametri climatici nazionali è stato definito l'anno tipo, ed è stata messa a punto la metodologia, ad integrazione nella nuova norma, per la valutazione dell'Indice di severità del Clima (ICS) utilizzato per la zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva. A partire da questa è stato effettuato l'aggiornamento dei dati climatici e dell'ICS, tramite il quale si è potuto determinare la zonizzazione del territorio nazionale e definire l'ICS per le singole Province. La revisione della norma UNI 10349 e l'introduzione dell'ICS influenzeranno le valutazioni ai fini della determinazione dei limiti di consumo ammissibili per la climatizzazione invernale ed estiva per tutto il territorio nazionale.

Riguardo alle schermature solari ad elevato contenuto tecnologico, è stata effettuata una serie di azioni mirate a focalizzare lo sviluppo e la caratterizzazione di questi materiali, affinché la tecnologia sia resa effettivamente fruibile ai settori del mercato delle costruzioni, interessati alla razionalizzazione degli usi finali di energia e alla realizzazione di edifici confortevoli, a livello termico e illuminotecnico. Per la valutazione delle prestazioni energetiche degli schermi di ombreggiamento sono state definite le

specifiche tecniche per la realizzazione di due celle prova nel C.R. Casaccia dell'ENEA.

Le attività svolte includono lo sviluppo di un database di sistemi di protezione solare innovativi, la caratterizzazione sperimentale delle tecnologie innovative per una loro inclusione nei modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici, l'aggiornamento del software Winshelter, sviluppato durante le prime annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, al fine di includere i nuovi materiali nel motore di calcolo, la definizione di specifiche tecniche per la realizzazione di celle prova per la valutazione delle prestazioni degli schermi di ombreggiamento.

Nell'ambito dello sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool material) sono stati eseguiti test volti alla caratterizzazione di materiali per le coperture, le facciate degli edifici e la pavimentazione di spazi esterni che limitino l'apporto solare e la richiesta energetica per il raffrescamento. La presenza di piante in prossimità di un edificio o integrate nelle sue infrastrutture murarie (Greenery) incide, infatti, sulle interazioni energetiche dell'edificio con l'ambiente esterno, migliorando le condizioni di comfort estivo per gli spazi esterni e assolvendo una funzione di isolante termico nei periodi freddi, oltre a filtrare fino al 70% delle polveri presenti nell'aria. A tal riguardo sono stati sviluppati sistemi integrati verdi denominati "Vertical Greenery System (VGS)" e "Green Roof" (GR), per le strutture esterne degli edifici, definendone standard di efficienza e potenzialità di applicazione.



Classificazione in zone climatiche del territorio nazionale

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

La spinta a investire nelle attività di ricerca per l'utilizzo del calore solare nella climatizzazione deriva dai crescenti costi dell'energia e dal sempre più evidente impatto sull'ecosistema mondiale dell'inquinamento e dei cambiamenti climatici connessi con le tecnologie di produzione dell'energia attualmente utilizzate. In particolare, una riflessione per la tutela e la preservazione dell'ambiente per le generazioni future si impone riguardo l'uso di fonti primarie quali i combustibili fossili, gasolio e gas, per il riscaldamento e la climatizzazione.

L'obiettivo del progetto, in prosecuzione di quanto realizzato nelle precedenti annualità, è principalmente quello di incrementare il livello di sostenibilità energetica del comparto residenziale, intendendo con il termine sostenibilità energetica la produzione e lo sfruttamento dell'energia in modo da consentire un miglioramento ambientale e socio-economico sia per la singola utenza, sia per il sistema (produttivo e utilizzatore) globale.

La notevole importanza del progetto può essere resa evidente dicendo che, a livello quantitativo, il comparto residenziale è responsabile del 40% del consumo energetico globale nell'Unione Europea (secondo la Direttiva Europea 2010/31/UE del 19 maggio 2010). Per questo motivo, come riportato nella medesima Direttiva, "la riduzione del consumo energetico e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia costituiscono misure importanti e necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Unione e le emissioni di gas a effetto serra". Un'ulteriore problematica legata alle richieste ener-

getiche del comparto residenziale è posta dalla crescente proliferazione di impianti di condizionamento dell'aria in tutti i paesi industrializzati. Questo, come ancora riportato nella direttiva succitata, "pone gravi problemi di carico massimo (in particolare nel periodo estivo, quando, più in generale, aumentano anche le necessità di alimentazione della catena del freddo), che causano un incremento del costo dell'energia elettrica e uno squilibrio del bilancio energetico". Per ridurre tali problematiche, oltre agli interventi suggeriti dalla Direttiva citata, finalizzati al miglioramento delle prestazioni termiche degli

edifici durante il periodo estivo, si deve promuovere un uso razionale e maggiormente responsabile delle fonti energetiche (rinnovabili e non) disponibili.

Per questi motivi, il progetto 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 di tipo rinnovabile.

In linea generale, seguendo anche quanto proposto nella ASHRAE Green Guide (2006) si possono indicare le seguenti linee guida per la realizzazione di una catena energetica di tipo sostenibile:

- efficiente sfruttamento delle risorse naturali non rinnovabili, del suolo, dell'acqua e sfruttamento delle energie rinnovabili in sito in modo da ottenere un consumo netto di energia nullo o comunque la minimizzazione del consumo di risorse naturali;



- minimizzazione delle emissioni che impattano negativamente sugli ambienti confinati in cui viviamo e sull'atmosfera del pianeta (il particolato aerodisperso, le piogge acide e tutte le emissioni che influiscono sulla qualità dell'aria interna, sull'effetto serra e sul riscaldamento globale);
- minimizzazione dello scarico di rifiuti solidi e liquidi (scarti, rifiuti domestici, liquami e acque meteoriche) e contenimento delle infrastrutture necessarie per la loro rimozione;
- minimizzazione dell'impatto negativo sugli ecosistemi locali;
- massimizzazione della qualità degli ambienti confinati (in particolare qualità dell'aria e comfort termico).

OBIETTIVI

Il proposito del progetto di ricerca è quello di mostrare come l'utilizzo appropriato delle fonti di energia rinnovabile disponibili e l'adozione di sistemi produttivi integrati, in grado di sfruttare in maniera ottimale tutti i flussi termici prodotti, possano soddisfare i punti sopra indicati consentendo 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 elio-assistita, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura possono contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità (CHP - Combined Heat Power). In quest'ambito, una delle soluzioni tecnologiche più promettenti da indagare e sviluppare è rappresentata dai sistemi integrati co- e tri-generativi di piccola taglia alimentati da fonti rinnovabili e in particolare da energia solare, mediante collettori a concentrazione da abbinare a micro-impianti a fluido organico (ORC) per la produzione congiunta di calore/freddo ed elettricità. La scelta della tecnologia solare a concentrazione più idonea per tale tipologia di applicazione si basa sul livello di temperatura di

progetto dell'impianto, per cui potranno essere presi in considerazione sia concentratori basati su ottiche "non-imaging" del tipo a CPC sia concentratori parabolici lineari o a lenti di Fresnel.

Facility di prova dei componenti d'impianto (ad es. pannelli solari termici, scambiatori di calore, sistemi di dissipazione passiva ecc.) e impianti pilota di tipo sperimentale a servizio di utenze reali o simulate, a suo tempo realizzate presso i Centri Ricerche ENEA di Casaccia e di Trisaia, consentono di valutare e rendere più performanti le diverse tecnologie emergenti nell'ambito della climatizzazione ambientale.

Queste attività di ricerca sono quindi finalizzate allo sviluppo di un ventaglio di soluzioni valide e performanti che tengano conto delle zone climatiche dove le stesse amplificano ed esaltano i vari punti di eccellenza di ciascuna tecnologia. L'energia elettrica, abbinata e non all'energia resa disponibile dal sole, può quindi essere un'ottima alternativa ai combustibili fossili che in alcuni casi possono del tutto essere sostituiti dall'accoppiamento di questi due tipi di energia.

RISULTATI

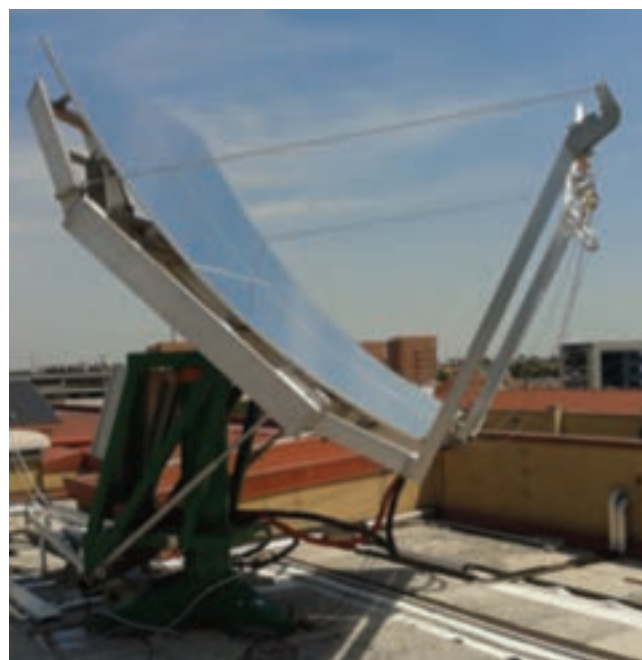
L'attività sulla climatizzazione innovativa si è sviluppata su due linee di attività fondamentali, concentrando gli sforzi e le risorse verso la realizzazione di laboratori e lo sviluppo di componenti innovativi:

- La prima linea è quella dello sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO₂, sistemi desiccant, pompe di calore geotermiche. A questo scopo si realizzano impianti prototipali, laboratori di qualificazione e si partecipa attivamente a network di ricerca internazionali (IEA).
- La seconda linea di attività riguarda la costruzione di sistemi integrati robusti e competitivi che assolvano per intero il compito della climatizzazione, sia estiva che invernale, e della produzione di acqua calda sanitaria. In questo contesto si sviluppano: sistemi integrati pilota e dimostratori a servizio di edifici e utenze reali; sistemi di controllo e ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio; sistemi di telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto. Nell'ambito della sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi sono state effettuate progettazione, realizzazione, messa in funzione e analisi



Sistema di accumulo PCM, vista dall'alto del serbatoio

sperimentale del funzionamento di prototipi di componenti costituenti il sistema integrato in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. È stato quindi integrato nell'impianto di solar heating & cooling a servizio dell'edificio F92 del CR Casaccia un accumulo termico a cambiamento di fase (PCM) ed effettuata una campagna di prove sperimentali di un impianto di solar cooling a servizio di una serra per colture intensive; sono state sviluppate logiche di regolazione progettate ad hoc per impianti di solar heating & cooling e per impianti a pompa di calore a compressione e per finire è stata effettuata l'analisi di sensibilità del sistema per stabilire, ai fini dell'effettiva fattibilità economica, le soglie di costo iniziale dei vari componenti degli impianti sperimentali. Riguardo le facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media e alta temperatura, sono state effettuate l'analisi sperimentale e la qualificazione di componenti solari a concentrazione



Prototipo di concentratore solare a specchi parabolici con inseguimento su due assi con fuoco lineare

ottimizzati per applicazioni a media temperatura e la messa a punto della facility di test per prove indoor su collettori solari. In particolare le attività si sono focalizzate su: sperimentazione e qualifica di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura, specialmente nei settori industriale, commerciale e terziario; studi per valutare le potenzialità di applicazione di sistemi co- e tri-generativi di piccola taglia che utilizzano mini e micro CSP abbinati a cicli a fluido organico (ORC); messa a punto della facility di test per prove indoor su collettori solari, implementando un sistema (“cielo artificiale”) in grado di riprodurre lo scambio radiativo nell’infrarosso che avviene tra un collettore e la volta celeste nelle ore di insolazione.

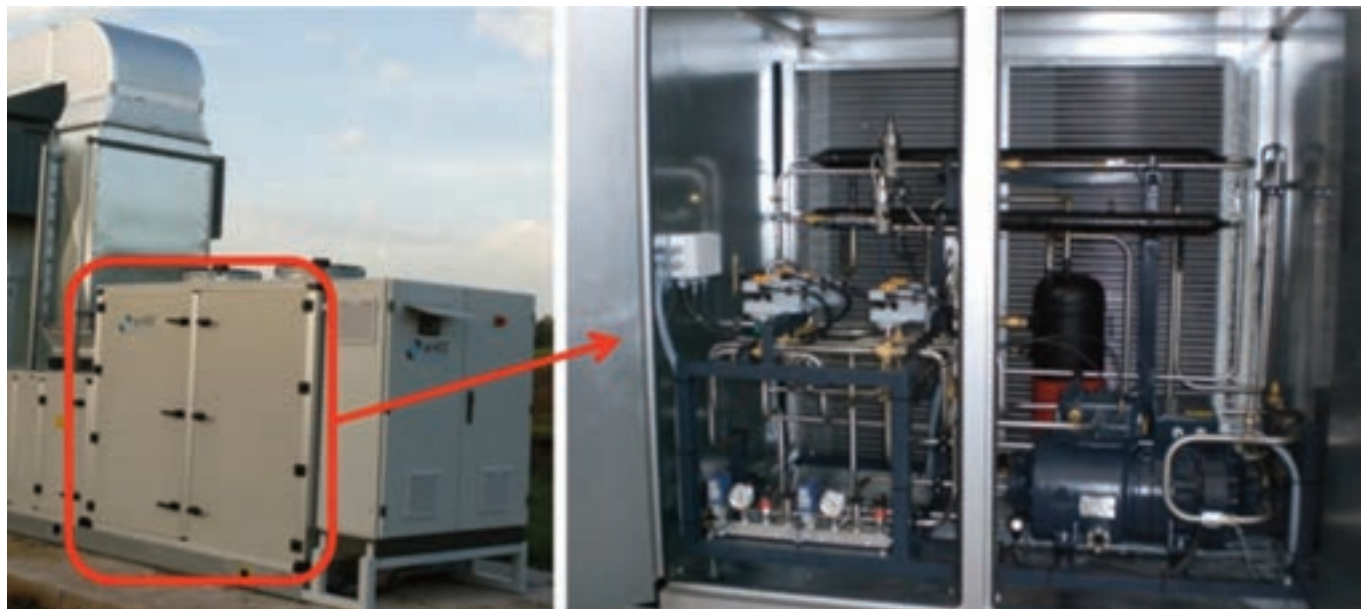
Nell’ambito dello sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione sono state effettuate progettazione, realizzazione, messa in funzione e analisi sperimentale del funzionamento di pompe di calore elettriche di nuova generazione, che utilizzano fluidi refrigeranti a basso impatto ambientale. In particolare è stata realizzata una macchina fri-



Prototipo di ricevitore termico a minicanali, installato sul concentratore, durante una prova

gorifera sperimentale di piccola potenza ($P_f = 3,0$ kW) per la prova e la verifica prestazionale di differenti fluidi frigoriferi utilizzati nelle pompa di calore a compressione. È stata realizzata una campagna di prove sperimentali di un prototipo di pompa di calore a CO_2 (R744) invertibile del tipo aria-aria, dedicato alla climatizzazione di gallerie commerciali e grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide.

Infine è stato effettuato uno studio di fattibilità per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) in modalità istantanea a mezzo di una pompa di calore a CO_2 (R744) e sviluppo di un sistema di accumulo a forte stratificazione dell’acqua calda prodotta.



Pompa di calore aria – aria ad R744 (CO_2)

Area di ricerca: Razionalizzazione e risparmio nell’uso dell’energia elettrica
Progetto C.3: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione
Referente: A. Calabrese, andrea.calabrese@enea.it



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

SCENARIO DI RIFERIMENTO

Il settore della mobilità elettrica richiede studi e sperimentazioni per lo sviluppo di nuovi prodotti hardware e software che possano essere utilizzati per migliorarne l'efficienza energetica complessiva e, più in generale, le interazioni con il sistema elettrico, integrandosi in modo competitivo nel contesto delle filiere e dei sistemi produttivi esistenti.

Tra i maggiori risparmi di energia ottenibili per i veicoli elettrici e per gli ibridi "plug-in" vi sono quelli legati alla ricarica delle batterie, sia direttamente grazie al miglioramento dei rendimenti (anche durante la frenata rigenerativa) che indirettamente, per la riduzione dei consumi conseguente alla riduzione del peso della batteria resa possibile dalla "fast charge". Infatti, il peso (e il costo) della batteria diminuiscono in proporzione alla riduzione dell'autonomia, e questo diventa accettabile se il tempo di ricarica, con infrastrutture di rifornimento adeguate, si riduce a qualche minuto (ricarica parziale). Inoltre, nel caso di tecnologie in piena evoluzione come la ricarica rapida e quella "contactless", sono presenti margini di miglioramento dell'efficienza di trasferimento e conversione dell'energia elettrica.

Lo sviluppo delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici su gomma offre anche positive possibilità di interazione verso la rete elettrica. Con riferimento agli ambiti applicativi "smart grid" e "smart cities", l'impiego di stazioni di ricarica (e/o degli accumuli elettrici dei veicoli in sosta), può essere utilmente associato alla generazione distribuita, in quanto l'accumulo elettrico distribuito ha tempi di



reazione estremamente brevi. Manca però una conoscenza approfondita delle possibilità di interazione lato "domanda di energia per la mobilità elettrica".

Ulteriori risparmi sono infine correlati all'integrazione di nuovi materiali, architetture e processi produttivi per l'alleggerimento strutturale nei vettori collettivi di tipo ferroviario, tramviario e affini, in quanto questo settore è meno dinamico rispetto al settore "automotive" dove la maggiore concorrenza e le stringenti normative antinquinamento hanno già portato all'introduzione di nuovi materiali e tecnologie anche grazie al-

l'aiuto dei grandi numeri e alla maggiore automazione di processo possibile in tale settore. Il collegamento diretto alla rete elettrica induce infatti nella visione collettiva a considerare meno prioritario l'alleggerimento dei grandi vettori per il trasporto su rotaia in quanto apparentemente puliti (non inquinanti), tuttavia la riduzione di peso di questi grandi vettori si traduce immediatamente in una riduzione di energia richiesta alla rete, con conseguenti positive ricadute economiche e sociali.

OBIETTIVI

Le attività di questo progetto, rivolte a studi e applicazioni sui nuovi materiali e sui componenti innovativi per il risparmio energetico nel settore dei trasporti, sono riconducibili sinteticamente a tre linee di ricerca:

- la prima linea di ricerca è rivolta allo sviluppo di sistemi e componenti innovativi per l'incremento

dell'efficienza elettrica delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici stradali con un particolare accento sui sistemi di ricarica rapida;

- la seconda linea è intesa all'ottimizzazione delle interazioni tra veicoli elettrici (TPL trasporto privato e merci) e reti di distribuzioni dell'energia in bassa tensione con particolare riguardo alla domanda di energia (analisi dell'uso del mezzo elettrico);
- la terza linea di ricerca è dedicata allo sviluppo di metodologie di progettazione, realizzazione e assemblaggio di materiali e strutture leggere e riciclabili, per alleggerire i componenti strutturali di metropolitane e treni (sia il "Body in white" sia componenti dello chassis dei vettori per il trasporto) e per migliorare, al tempo stesso, le caratteristiche inerenti la protezione dei passeggeri in caso di incidente.

In particolare si punta a realizzare:

- studi su sistemi di ricarica rapida "contactless";
- prototipo caricabatterie reversibile e relative prove al banco;
- sistema di ricarica integrata con compensatore statico;
- sistema automatico di misura per la verifica degli apparati di ricarica anche in condizioni dinamiche;
- studi sulla mobilità in ambito urbano, di merci e persone, per la valutazione dei consumi energetici conseguente all'elettrificazione del parco veicolare in funzione delle condizioni del traffico;
- studi relativo all'influenza dei parametri di processo (pressione, temperatura e velocità) sulla densità e sulle proprietà microstrutturali dei precursori e di come questi influenzino la dimensione e distribuzione dei pori delle schiume;
- test per la realizzazione di compositi metallo-precursore-metallo con legame metallurgico indotto per colaminazione;
- stazione di saldatura plasma key-hole per testare il processo e compararlo con la tecnologia laser sviluppata nel corso delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico.

RISULTATI

I risultati delle attività svolte nelle diverse linee di ricerca sono di seguito riassunti:

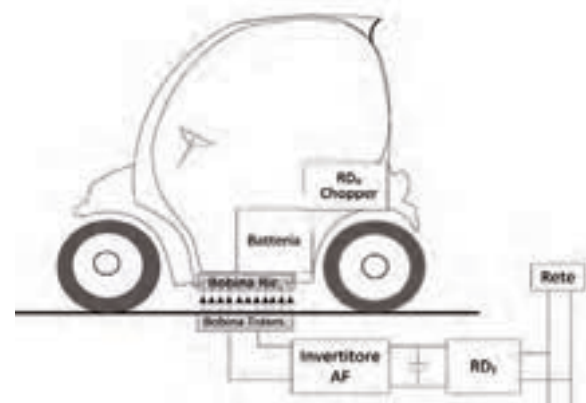
Sistemi e componenti per strutture di alimentazione dei veicoli elettrici stradali collegate alla rete per la ricarica rapida

Sono state condotte tre distinte azioni che coprono settori contigui di interesse nell'ambito delle opera-

zioni di alimentazione o di ricarica dei veicoli elettrici e precisamente:

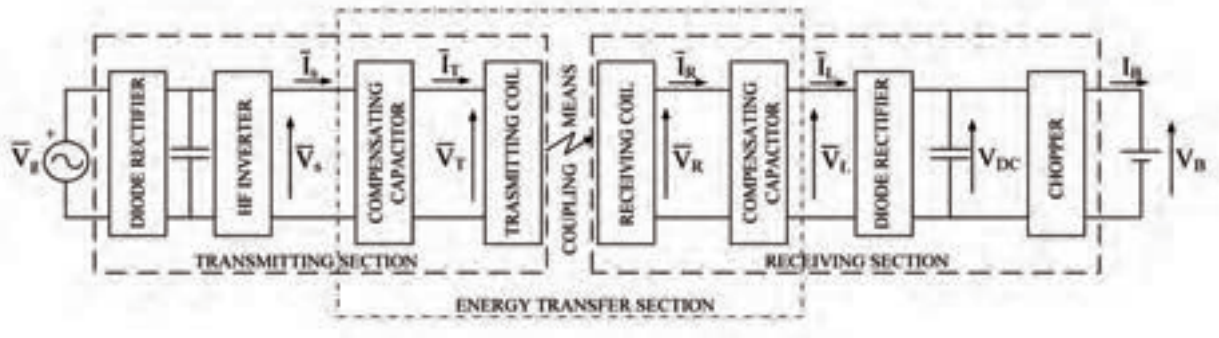
- Studio sulla ricarica "contactless" per l'analisi e la progettazione di un sistema di trasferimento dell'energia senza contatto al fine di poter realizzare un accoppiamento elettromagnetico di elevato rendimento tra veicolo e rete di alimentazione pur in presenza di elevati gap tra bobina primaria e secondaria anche in condizioni dinamiche.

Nella stessa attività si è provveduto a definire le specifiche per realizzare un prototipo di caricabatterie "reversibile" ossia di un sistema che possa svolgere sia le funzioni di caricabatterie che di azionamento. A valle della definizione delle specifiche si è curata la progettazione del sistema e infine la realizzazione in forma prototipale. Al completamento sono state eseguite prove di funzionalità del sistema.



Disposizione a terra e sul veicolo dei componenti del sistema contactless risonante STEESC

- Sperimentazione di una stazione di ricarica rapida accoppiata a un compensatore statico, con prove atte a consentire la valutazione degli effetti sulla rete in BT. Realizzazione e test di un sistema per la determinazione delle prestazioni energetiche e di power quality dei sistemi di conversione dell'energia. Il sistema per le specifiche caratteristiche è idoneo alla sua applicazione in ambiente ove le caratteristiche elettriche possono subire variazioni rapide addebitabili sia al sistema di accoppiamento della potenza che alle diverse condizioni del carico.
- Partecipazione ad alcune iniziative internazionali per lo scambio continuo sulle attività programmatiche e, a livello nazionale, di orientamento sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni



Schema a blocchi trasformazioni energetiche



Test al banco del prototipo di caricatori integrali e apparato sperimentale stazione di ricarica combinata

mobili e stazionarie. La partecipazione è stata funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso.

Interrelazione tra veicoli elettrici (privati, TPL e merci) e reti di distribuzione dell'energia

È stato effettuato uno studio sulla mobilità in ambito urbano, di merci e persone, per la valutazione dei consumi energetici conseguente all'elettrificazione del parco veicolare in funzione delle condizioni della mobilità. Infatti, l'elettrificazione dei veicoli comporta importanti ricadute sull'assorbimento di energia dalla rete nel tempo e nello spazio di cui non sono completamente note l'entità e la caratterizzazione. Tale studio è stato condotto sul caso significativo dell'area urbana di Roma, nel cui interno sono stati analizzati gli attuali comportamenti dei più importanti

segmenti di traffico, nella fattispecie il trasporto privato su autovettura, il Trasporto Pubblico Locale (TPL) e la distribuzione delle merci.

Per il primo insieme sono stati utilizzati i dati di un periodo adeguato di monitoraggio della flotta veicolare equipaggiata con dispositivi per la rilevazione della posizione dei veicoli a scopi assicurativi, mentre per il TPL e la distribuzione delle merci è stata realizzata un'analisi a partire da indagini pregresse, aggiornate per gli aspetti più rilevanti ai fini dello studio.

Lo studio ha analizzato il carico previsto nelle diverse fasce orarie per tenere conto della variazione giornaliera della domanda di energia, dovuta alle variazioni dell'esercizio del trasporto, oltre che dell'effetto sui consumi energetici dovuto alla variazione giornaliera delle velocità operative. Si è tenuto inoltre in considerazione, attraverso un'analisi per scenari, dell'evoluzione della domanda di mobilità al 2020 in



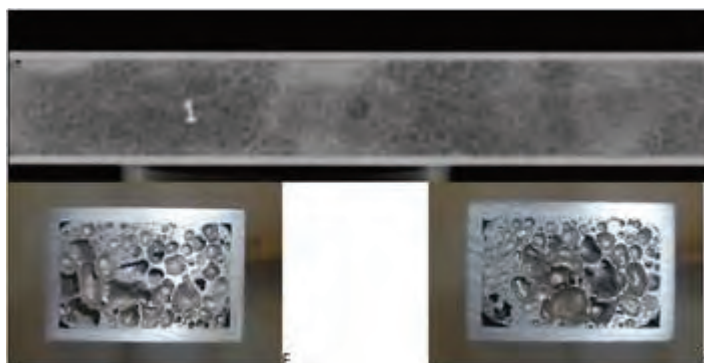
Campioni schiumati di precursori compositi con pelli di alluminio di spessore 1,5 +/-0,2 mm

relazione all'andamento dell'economia e del prezzo dell'energia.

Metodi di progettazione, realizzazione e assemblaggio di materiali e strutture leggere, sicure e riciclabili per componenti strutturali di metropolitane e treni

Le ricerche hanno riguardato lo sviluppo di apparecchiature e processi per la realizzazione di estrusi di alluminio rinforzati elaborando e parzialmente ottimizzando nuove miscele di polveri eutettiche originali e i processi di compattazione per la realizzazione di precursori di schiume metalliche di alluminio utilizzabili nella realizzazione di componenti di alluminio rinforzati. È stato approfondito mediante compattazione per pressatura e/o laminazione lo studio dei processi e di realizzazione di compositi pelle-precursore-pelle.

Infine, sono stati realizzati alcuni campioni prototipali che simulano la giunzione fra pannelli AFS commerciali ed estrusi che possono essere impiegati per la realizzazione di pavimenti, imperiali e pareti di carrozze ferroviarie con l'impiego di tecniche di saldatura laser innovative ed è stata allestita una stazione di saldatura Plasma Keyhole.



Schiumatura in estrusi di alluminio: RX e sezioni macrografiche a 40 mm dalle estremità del campione

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

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

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