



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



Ministero dello Sviluppo Economico

Accordo di Programma MSE/ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sintesi dei risultati del primo anno di attività



Ottobre 2011

Edito dall'ENEA - Unità Comunicazione
Revisione testi: Antonino Dattola
Progettazione e realizzazione grafica: Cristina Lanari
Stampato presso il Laboratorio Tecnografico ENEA - Frascati
Finito di stampare nel mese di novembre 2011



AREA GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

1.	Sistemi avanzati di accumulo di energia	7
2.	Nucleare da fissione - Studi sul nuovo nucleare e partecipazioni ad accordi internazionali/bilaterali sul nucleare da fissione. Funzione Advisor	11
3.	Nucleare da fissione - Reattori evolutivi	15
4.	Nucleare da fissione - Reattori di quarta generazione	19
5.	Nucleare da fissione - Rifiuti radioattivi	23
6.	Nucleare da fissione - Qualifica di componenti e sistemi	27

AREA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE

7.	Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti	33
8.	Ricerca su celle fotovoltaiche innovative	37
9.	Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine	41
10.	Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO ₂	45

AREA RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA

11.	Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi	51
12.	Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica	55
13.	Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile	59
14.	Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva	63
15.	Nuovi materiali e componenti Innovativi per i mezzi di trasporto	67

AREA

GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE



Sistemi avanzati di accumulo di energia

Scenario di riferimento

La richiesta di sistemi di accumulo nelle reti elettriche sta crescendo notevolmente di pari passo con l'evoluzione tecnica ed economica del sistema di generazione, distribuzione e usi finali dell'energia elettrica. I sistemi elettrici stanno evolvendo verso un più ampio uso di tecnologie digitali (smart grids) per una crescente integrazione di una varietà di fonti primarie (generazione distribuita, GD). Un maggiore controllo delle fasi di produzione e della domanda di energia, anche nell'ottica di un mercato aperto e libero nella commercializzazione dell'energia elettrica, sta rendendo le tecnologie dell'accumulo sempre più promettenti e utili per migliorare il rendimento, la gestione, la qualità e i costi. Tali soluzioni saranno sempre più rilevanti alla luce della previsione di un crescente ricorso alle fonti rinnovabili a seguito dell'attuazione della Direttiva comunitaria 2009/28/CE.

In aggiunta, lo sviluppo di una rilevante flotta di veicoli elettrici in grado di svolgere anche una funzione, eventualmente, di accumulo distribuito, richiede che tali veicoli siano dotati di un sistema di accumulo con caratteristiche tali da poter interloquire in maniera intelligente con il sistema elettrico.

Questo progetto intende promuovere la disponibilità industriale di batterie al litio e valutare in condizioni di reale utilizzo le soluzioni più convenienti da un punto di vista tecnologico ed economico, sia per l'utente finale 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: "La realizzazione industriale di sistemi di accumulo di ener-

gia elettrica a basso costo, con un rapporto peso/volume/capacità tale da permettere una buona autonomia e con materiali non eccessivamente inquinanti, pur se lungamente annunciata, rappresenta tuttora un obiettivo d'interesse strategico da perseguire. Non mancano in questo settore molte interessanti prospettive che, se realizzate, potrebbero contribuire ad una migliore gestione del sistema di generazione accumulo-trasmissione-distribuzione dell'energia elettrica, oltre al minor inquinamento, soprattutto dei centri urbani".

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), della rete di trasmissione e distribuzione fino agli usi finali, e posti in modo sempre più economicamente ed energeticamente conveniente da ambo i lati del "contatore".

Negli ultimi anni sono state sviluppate e applicate tecnologie quali: accumulo di acqua in bacini di pompaggio; volani (flywheels), accumulo di aria compressa in caverne (compressed air energy storage, CAES); magneti superconduttori (superconducting magnets energy storage, SMES); batterie elettrochimiche; supercondensatori; accumulo di energia termica e, più recentemente, accumulo di idrogeno in abbinamento con le celle combustibile.



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

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

L'ENEA è impegnata da oltre 20 anni nella ricerca e nello sviluppo di batterie al litio, in collaborazione con alcuni istituti universitari. Nell'ultimo decennio ha coordinato e svolto due programmi nazionali, con il Ministero della Ricerca Scientifica, per la ricerca e lo sviluppo di batterie al litio per applicazioni mobili nei veicoli elettrici e nell'elettronica di consumo. Inoltre, è da anni impegnata in progetti europei 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 internazionali dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA). Infine, l'ENEA è coinvolta in alcuni progetti di Industria 2015 che riguardano l'uso delle batterie al litio e supercondensatori, ma non è prevista alcuna specifica attività per l'uso in smart grid con fonti rinnovabili.

Obiettivi

L'obiettivo generale di questo progetto è la ricerca, la realizzazione e la verifica sperimentale di sistemi di accumulo elettrochimico a base di litio in applicazioni stazionarie, adeguatamente individuate, con particolare attenzione all'integrazione delle fonti rinnovabili, che, una volta sviluppate industrialmente, presentino caratteristiche tecniche ed economiche migliori rispetto ai sistemi attualmente disponibili sul mercato. Si pensa di raggiungere l'obiettivo mediante un approccio sistemico che consenta di sviluppare non solo le batterie al litio, ma anche le tecnologie d'integrazione e interfaccia con

la rete, nella prospettiva di un notevole incremento dell'utilizzo di fonti rinnovabili (intermittenti) e, eventualmente, dell'introduzione di una crescente flotta di veicoli a trazione elettrica. Sono state inoltre selezionate opportune applicazioni dimostrative originali. Infine, sono stati scelti materiali con ridotto o nullo impatto ambientale, mentre durante e alla fine dell'uso delle batterie al litio si è valutata sperimentalmente la possibilità di una "seconda vita applicativa nelle reti" per le batterie usate nei veicoli elettrici.

Risultati

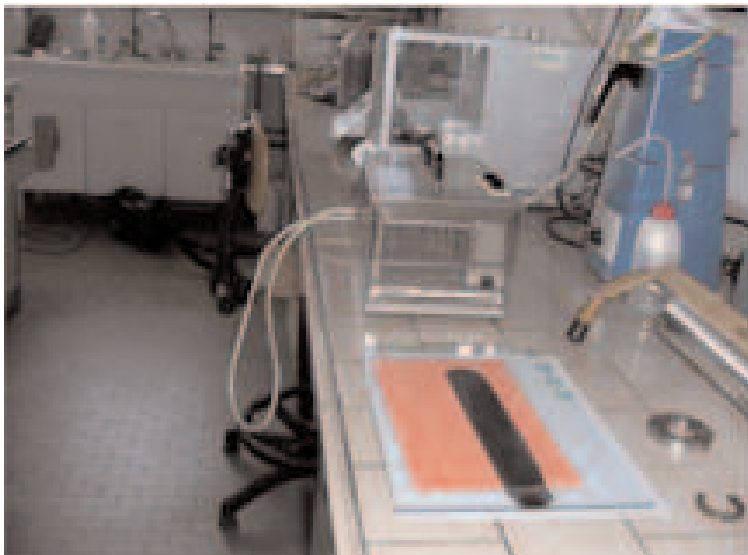
Sulla base di un'analisi teorico-sperimentale, condotta nel 2010 sul tema dell'accumulo elettrico con supercondensatori e batterie e dell'utilizzo dell'accumulo nei settori di applicazione, e sulla realizzazione di installazioni sperimentali pilota, è stata selezionata, tra le tecnologie più promettenti, quella delle batterie al litio. Sono stati quindi individuati i limiti attuali e le principali necessità per tale tecnologia: ricerca di base per individuare materiali e disegni di cella più interessanti; sviluppo tecnologico per definire le potenzialità applicative ed eventuali limitazioni ambientali; miglioramento economico per ridurre i costi e gli impatti delle varie fasi, dalla produzione all'applicazione fino al riciclaggio finale.

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

L'attività ha previsto la ricerca di materiali catodici per celle al litio particolarmente adatti per le applicazioni nelle reti elettriche. I materiali sono stati scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e basso impatto ambientale. L'attenzione si è concentrata su materiali catodici del tipo LiFePO_4 , opportunamente drogato con diversi composti, che hanno consentito di ottenere prestazioni molto promettenti in termini di capacità specifica e di efficienza durante i cicli di carica e scarica a vari regimi. La composizione dei catodi è stata ottimizzata e resa di-



Preparazione di elettrodi anodici a forma circolare per realizzazioni di celle nei laboratori ENEA



Esempio di preparazione di anodi nei laboratori ENEA

sponibile per le prove in celle da laboratorio. Tutti i materiali sviluppati sono stati caratterizzati in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche.

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

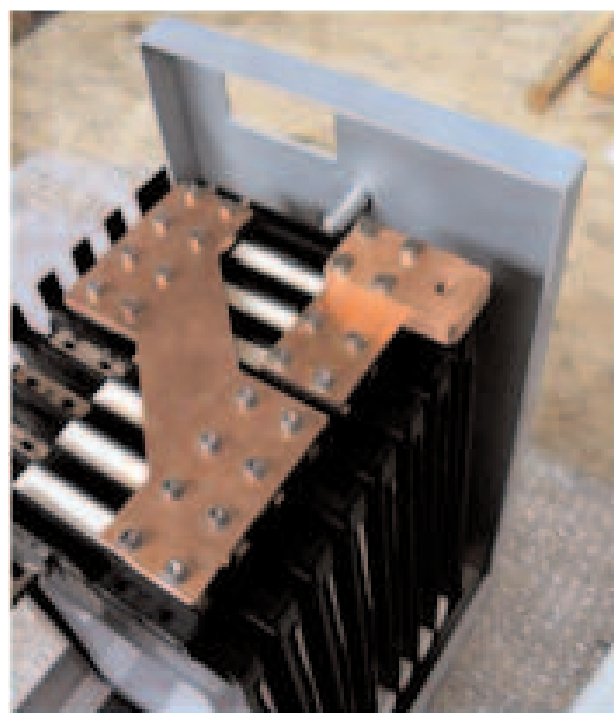
L'attività, in analogia con quella sopra citata, ha riguardato la ricerca di materiali anodici per celle al litio. I materiali sono stati scelti tra quelli più convenzionali (le grafiti e composti del carbonio) e quelli più innovativi (ossidi metallici del titanio), migliorando le prestazioni degli anodi prodotti e mantenendo basso il costo e l'impatto ambientale. I materiali sono stati selezionati ed ottimizzati, con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti sono stati costruiti e caratterizzati gli elettrodi in celle di riferimento.

Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio

I materiali anodici e catodici sono stati assemblati in una cella completa di elettrolita (liquido e/o polimerico), opportunamente progettata in scala da laboratorio per la verifica delle prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale. Una procedura di prove elettrochimiche è stata definita e concordata con RSE e CNR per verificare le prestazioni e selezionare i materiali finali.

Indagini preliminari su tecnologie di controllo ed interfaccia con la rete

Sono state analizzate le caratteristiche di alcune potenziali utenze con una valutazione delle necessità della rete e dell'utenza e con lo studio dell'interfaccia e delle logiche di gestione e controllo dei diversi componenti/sottosistemi di rete, nell'ottica di transizione verso una struttura di rete efficiente, flessibile, dinamica ed interattiva.



Porzione di batteria al litio per la funicolare di Bergamo

Progettazione e realizzazione di tecnologie di controllo ed interfaccia del sistema di accumulo in batterie al litio con la rete e con utenze particolari

L'attività si è concentrata sulla progettazione preliminare e di dettaglio con relativa acquisizione di tecnologie di controllo e gestione dell'interfacce verso la rete con l'esecuzione di prove di laboratorio con la validazione, mediante software specifici, delle logiche e strategie di controllo che comprendano protezione e automazione per reti di distribuzione in presenza di GD ed accumulo elettrico.



Laboratorio ENEA ad atmosfera controllata (camera secca) per la preparazione e la caratterizzazione di celle al litio

Validazioni sperimentali e dimostrazioni

L'attività ha portato al completamento della dimostrazione di batterie al litio installate sulla funicolare di Bergamo, con l'analisi completa dei risultati sperimentali. Inoltre, con l'utilizzo dell'impianto sperimentale realizzato presso l'ENEA, si è potuto ottimizzare e validare la strategia di gestione e controllo di supercondensatori utilizzati nei carriponte.

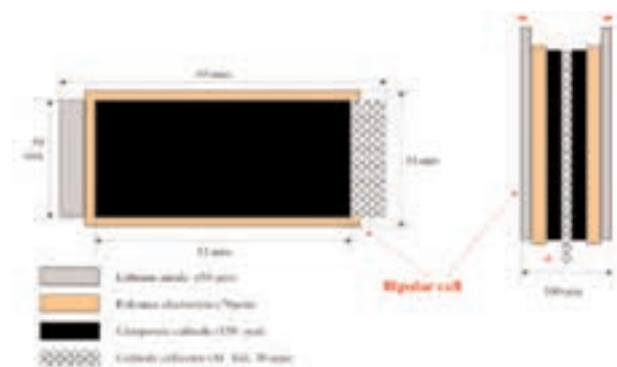
Indagini tecnologiche e valutazioni di impatto dei sistemi di accumulo

L'attività ha consentito una valutazione sulle applicazioni delle batterie al litio nelle reti elettriche, con un'indagine sui sistemi alternativi proposti in competizione. È stata inoltre effettuata una campagna sperimentale per la verifica del prolungamento della vita utile delle batterie al litio usate nei veicoli elettrici, in applicazioni stazionarie.

Comunicazione e diffusione dei risultati

L'obiettivo ha riguardato una maggiore integrazione con il CNR e RSE per il coordinamento delle attività sull'accumulo ed attività specifiche di comunicazione e diffusione dei risultati con la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali.

Inoltre si è avuta la partecipazione attiva a iniziative internazionali quali: l'IEA su "Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes"; l'alleanza europea, promossa dalla CE, denominata EERA, contribuendo ai temi "Smart grids" e "Energy storage"; la nuova collaborazione scientifica e tecnologica promossa dal circuito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica a livello europeo) sui sistemi ibridi che utilizzano batterie e supercondensatori.



Schema di cella al litio a configurazione bipolare

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.2.2: Sistemi avanzati di accumulo di energia

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



Nucleare da fissione Studi sul nuovo nucleare e partecipazioni ad accordi internazionali/bilaterali sul nucleare da fissione. Funzione Advisor

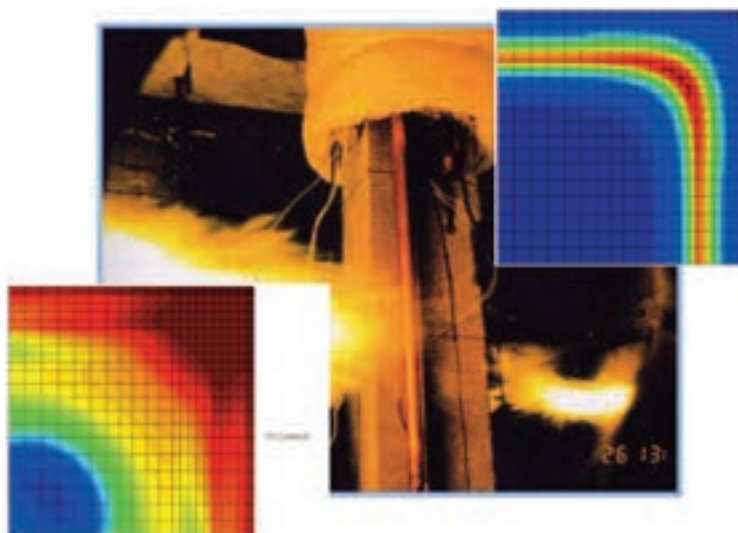
Scenario di riferimento

Al fine di rendere disponibili, ai decisori politici e a tutti gli stakeholders del sistema industriale nucleare nazionale, elementi di valutazione necessari a supportare le scelte tecnologiche nell'ambito della produzione di energia elettrica da fonte nucleare, non si può prescindere da un'attenta e consapevole conoscenza sia dei risultati scientifici e tecnologici più avanzati proposti dalla comunità scientifica e industriale, sia dei più recenti sviluppi della normativa nucleare in temi come la sicurezza (safety), la salvaguardia (security), la resistenza alla proliferazione. È pertanto necessario garantire una costante e continua partecipazione a tutte quelle iniziative internazionali nel settore dei sistemi nucleari e dei relativi cicli del combustibile che garantiscano tale conoscenza al massimo livello. Ciò sarà ancor più importante nei prossimi anni, anche alla luce dei cambiamenti nel frattempo intercorsi a causa dell'incidente di Fukushima.

L'ENEA opera per l'integrazione fra le varie competenze e soggetti coinvolti, svolgendo così la funzione di Advisor verso le Istituzioni e i Ministeri che richiedono supporto nella definizione della policy nazionale nel campo dell'energia nucleare. L'acquisizione di studi di scenario consente di porre le basi per orientare le future strategie governative nel settore energetico in generale e nucleare in particolare, prevedendo per esempio un possibile impiego di reattori di diverso tipo e taglia. Ciò non potrà che essere fatto in

accordo con quanto attuato in ambito europeo e internazionale sul piano tecnico, economico, della sicurezza e della non-proliferazione. Di qui, la necessità della partecipazione ai principali comitati e gruppi internazionali come quelli IAEA, EURATOM, OECD-NEA, INPRO, GIF, IFNEC. Sul piano della ricerca e del miglioramento delle competenze, di fondamentale impor-

tanza sono gli accordi bilaterali o multilaterali con Paesi in grado di garantire il livello più avanzato delle conoscenze e un fecondo scambio di conoscenze tra i rispettivi ricercatori e tecnici. È il caso degli accordi bilaterali con la Francia, attraverso le sue due principali istituzioni legate agli studi sul nucleare: il CEA e l'IRSN.



Obiettivi

Gli obiettivi specifici individuati sono:

- supporto al Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti e accordi internazionali;
- partecipazione a comitati e gruppi internazionali;
- rafforzamento dell'accordo bilaterale di collaborazione con il CEA;
- stipula di un accordo bilaterale di collaborazione con l'IRSN;
- studio di scenari per un ipotetico futuro impiego di reattori nucleari di diversa taglia sul territorio nazionale e relative valutazioni economiche.

Supporto al Ministero dello Sviluppo Economico – DGENRE

L'ENEA ha garantito il necessario supporto al MSE per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti e accordi internazionali nel campo del nuovo nucleare da fissione nonché al gruppo di lavoro per la stesura del documento sulle strategia nucleare del Governo. Le attività svolte si sono articolate secondo i seguenti temi:

- Supporto tecnico-scientifico alla Direzione Generale Energia e Risorse Minerarie del Ministero dello Sviluppo Economico;
- Presidio delle attività istituzionali internazionali sull'energia nucleare, sicurezza e salvaguardie nucleari, e partecipazione ai relativi Comitati e Gruppi di Lavoro nazionali e internazionali;
- Supporto per la definizione del posizionamento nazionale nell'ambito del VII Programma Quadro Europeo (parte Euratom);
- Supporto tecnico-scientifico al MSE per la stesura del documento di "Strategia Nucleare".

Partecipazione a comitati e gruppi di lavoro internazionali

L'ENEA, avvalendosi anche del supporto di Università e Politecnici del CIRTEN, ha svolto il ruolo di Focal point e di Advisor per le tematiche scientifiche e tecnologiche nei principali comitati e organizzazioni nazionali e internazionali che agiscono nel dominio dell'energia nucleare. Ha assicurato la presenza di rappresentanti ed esperti italiani nella quasi totalità degli Standing Committees della NEA, e in un numero elevato di Working Party (WP) della NEA e Technical Working Groups (TWG) permanenti dell'IAEA. Esperti ENEA sono inoltre presenti nei seguenti comitati: ESNII

(European Sustainable Nuclear Industrial Initiative), IFNEC (International Framework For Nuclear Energy Cooperation), SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform), FORATOM (European Atomic Forum).

In particolare, nel contesto di tali collaborazioni l'ENEA ha preso parte al Gruppo IAEA-INPRO Project, nel cui ambito è stato avviato l'importante sviluppo di NESA (Nuclear Energy System Assessment) Italy, e ai gruppi di lavoro per l'applicazione delle principali metodologie Proliferation Resistance & Physical Protection (PR&PP) ai sistemi innovativi e per la revisione dello stato dei reattori di piccola/media taglia, inclusi i reattori trasportabili russi. Il NESA consente l'analisi di un sistema energetico nucleare, concepita secondo un approccio olistico (ambiente-sostenibilità, sicurezza, protezione fisica, proliferazione, gestione rifiuti, infrastrutture, economia) che fa uso della metodologia INPRO e di strumenti internazionalmente validati, a supporto di un piano strategico e decisionale sull'utilizzo a lungo termine dell'energia nucleare.

Partecipazione al Progetto Internazionale Halden Reactor Project

Rinnovando una tradizione risalente agli anni Sessanta e interrottasi nel 2002, l'ENEA è tornata a stringere un importante accordo di collaborazione con l'OECD-NEA Halden Reactor Project. Tale accordo (Associated Party Agreement, APA) permette all'ENEA (e alle realtà universitarie e industriali italiane interessate) di prendere parte ai programmi di ricerca e sviluppo di più specifico interesse nazionale a supporto dei reattori LWR evolutivi, nei settori Fuel&Materials e Instrumentation&Control, contribuendo in modo attivo alla pianificazione di linee di ricerca che coinvolgeranno direttamente ricercatori ENEA nel triennio 2012-2014. Le attività di R&D si avvalgono di facilities tecnologiche



Struttura della metodologia INPRO

camente avanzate che offrono l'opportunità di training per giovani ricercatori dell'ENEA e delle università italiane, contribuendo su temi importanti come il combustibile, la strumentazione e i sistemi di controllo ad acquisire competenze molto specialistiche, utili anche per lo sviluppo di un simulatore ingegneristico in ENEA.

Studi per la sicurezza dei reattori in ambito Accordo ENEA-IRSN

Per conseguire gli obiettivi fissati sull'arricchimento delle competenze nel settore della sicurezza nucleare (sia in termini di safety che di security), della radioprotezione e della comunicazione al pubblico, un passo fondamentale è stato la finalizzazione dell'accordo bilaterale tra l'ENEA e l'IRSN (l'istituto per la sicurezza nucleare francese). La collaborazione tra i ricercatori delle due istituzioni ha portato alla nascita di importanti linee di attività nel campo dello sviluppo di un simulatore ingegneristico, degli incidenti severi e della valutazione della strumentazione nucleare a fini di sicurezza. Nell'ambito di tale accordo due giovani ricercatori ENEA sono stati distaccati per l'intera annualità presso la sede dell'IRSN di Parigi, dove sono stati integrati nel team di sviluppo del nuovo simulatore SOFIA e hanno partecipato alle attività di analisi di sicurezza sui reattori del parco attuale francese e del costruendo EPR di Flamanville. Una seconda linea di ricerca ha visto la messa a punto di una nuova metodologia per il calcolo dei coefficienti di sensitività delle quantità integrali misurate con particolari dispositivi di misura neutronica (i collettroni) rispetto ai parametri considerati per valutare il punto caldo all'interno del nocciolo di un reattore nucleare di potenza. Tale metodologia consente anche di valutare l'effetto sulla qualità del sistema di rilevazione dovuto al possibile degradarsi dei dispositivi di misura durante il ciclo di vita del nocciolo, così da fornire indicazioni utili a definire una strategia di protezione adeguata in termini di qualità, numero e distribuzione dei collettroni. Data l'importanza del tema della sicurezza e l'ottimo rapporto creatosi tra le due istituzioni, tale accordo sarà ulteriormente arricchito nei prossimi anni.

Studi di meccanica strutturale e relativa normativa tecnica in ambito Accordo ENEA-CEA

Il rinnovo dell'accordo di collaborazione scientifica tra ENEA e CEA ha permesso di consolidare le attività congiunte di ricerca e sviluppo su codici e metodi nel campo soprattutto della meccanica strutturale, di acquisire metodi avanzati di progettazione e di approfondire



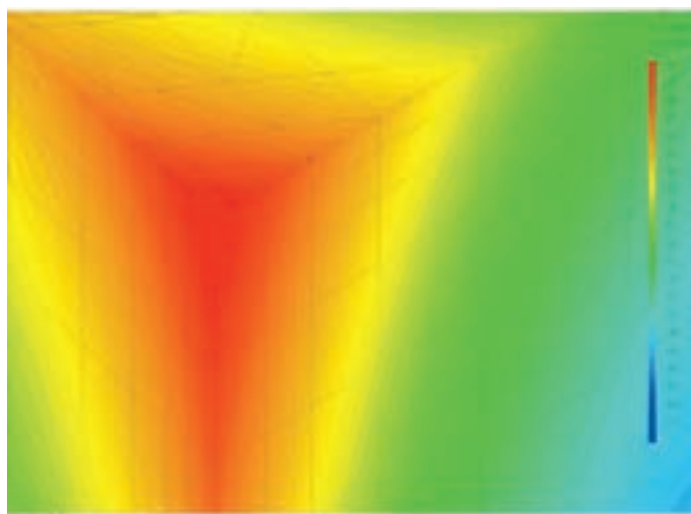
Il simulatore SOFIA dell'IRSN a Parigi

le tematiche legate alle normative nucleari.

La prima attività ha visto la continuazione della collaborazione per lo sviluppo, implementazione e utilizzo del sistema di codici a elementi finiti CAST3M per studi e verifiche di meccanica strutturale su reattori di nuova generazione (III+ e IV).

La seconda attività prevista, dopo l'acquisizione della nuova normativa francese RCC-MRx e la sua comparazione con le norme ASME equivalenti, ha riguardato l'analisi dei metodi per la valutazione della deformazione progressiva (ratcheting) e della norma efficiency diagram, nei casi di creep significativo o trascurabile e in presenza o meno di irraggiamento.

Una terza attività ha riguardato l'analisi termomeccanica dell'influenza del fenomeno di Warm Pre-Stress (WPS) sull'integrità strutturale di acciai ferritici rappresentativi del pressure vessel di reattori nucleari a fissione.



Distribuzione temperature (°C) zona spigolo in un provino cubico di calcestruzzo

Prosecuzione degli studi di scenario, valutazioni economiche

Le attività su resistenza alla proliferazione e protezione fisica continuano a essere svolte all'interno dei due forum internazionali, il PR&PP TWG del Generation IV International Forum (GIF) e il TWG "Options to Enhance Proliferation Resistance and Security of NPPs with Innovative SMRs and Associated Fuel Cycles" della IAEA.

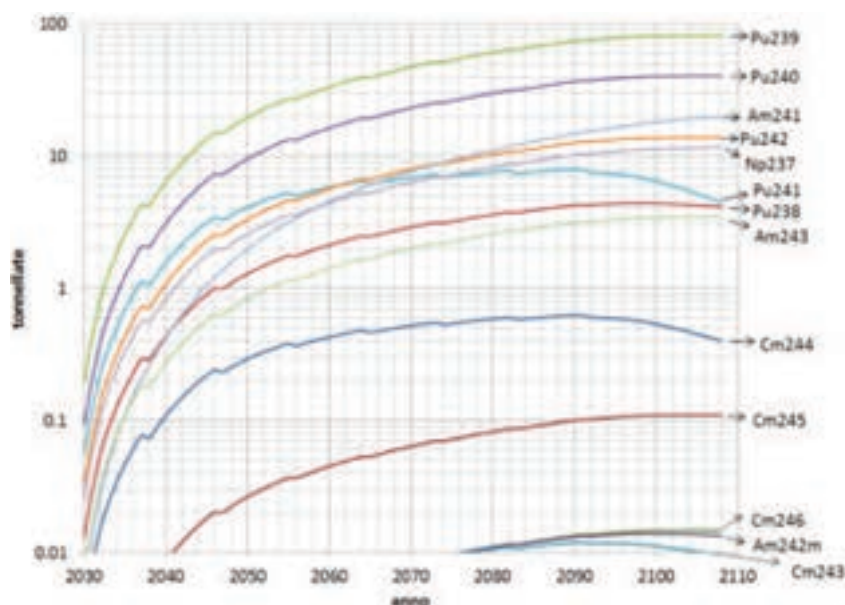
In ambito GIF dal PR&PP Working Group IAEA in INPRO sono state sottolineate le attività di armonizzazione delle due metodologie per meglio rispondere alle esigenze dei fruitori delle stesse (decisori politici, progettisti e operatori).

L'ENEA ha preso parte a tali iniziative con lo scopo di redigere un documento contenente le linee guida per effettuare valutazioni di resistenza alla proliferazione per progetti nazionali di sistemi nucleari innovativi, e acquisire e testare i metodi per la valutazione della resi-

stenza alla proliferazione dei reattori Gen IV.

Per quanto riguarda gli studi di scenario, si sono presi in considerazione reattori ad acqua pressurizzata di diversa dimensione, tra i quali impianti di piccola-media taglia (SMR, Small-Medium modular Reactors). Gli studi, effettuati in collaborazione con il Politecnico di Milano che ha messo a disposizione il suo codice di valutazione di scenari INCAS, hanno evidenziato come gli impianti SMR presentino vantaggi e caratteristiche tali da compensare parzialmente la perdita di economia di scala e di recuperare competitività economica rispetto alle unità di grande dimensione, a parità di output totale. Grazie alla loro migliore competitività in termini di profittabilità e a una più robusta performance rispetto all'incertezza delle condizioni di input, gli SMR possono rappresentare un'interessante alternativa di investimento, non solo nei piccoli mercati in via di sviluppo, ma anche per l'estensione o la sostituzione degli impianti nucleari di potenza installati nei grandi mercati maturi e liberalizzati. È stato fatto, infine, il quadro sin-

tetico dello stato delle risorse-domanda di uranio a livello mondiale, che costituisce l'oggetto del Joint NEA-IAEA Uranium Group al quale l'ENEA partecipa. Nel RedBook 2011, in corso di elaborazione da parte dello Uranium Group, la situazione italiana si colloca essenzialmente "demand-side", in riferimento all'ipotizzato parco nucleare al 2030, in prospettiva pre-Fukushima e pre-refendum.



Accumulo degli attinidi allo scarico per 8 EPR (tenendo conto dei decadimenti). Principali isotopi.

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.3, linea progettuale 1: Studi sul nuovo nucleare e partecipazioni ad accordi internazionali/bilaterali sul nucleare da fissione. Funzione Advisor

Referente: P. Meloni, paride.meloni@enea.it

M. Sepielli, massimo.sepielli@enea.it



Nucleare da fissione Reattori evolutivi

Scenario di riferimento

La classe dei “reattori evolutivi” ha l’obiettivo di garantire la competitività economica e l’affidabilità dell’energia nucleare da fissione con requisiti di sicurezza superiori rispetto ai reattori attualmente in esercizio. I progetti evolutivi sono quindi generalmente basati sulla ben conosciuta tecnologia dei reattori ad acqua (WCR) che rende attuabile la loro implementazione nel medio termine, così da configurarsi come un ponte verso le tecnologie innovative della IV

Generazione (LFR). Il ricorso a

caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva, diffuso

in questa classe di im-

pianti, trova la mas-

sima espressione nei

reattori di piccola o

media taglia di tipo

modulare, interna-

zionalmente defi-

niti con l’acronimo

SMRs (Small Me-

dium Reactors).

In questi reattori

la compattezza del

contenimento,

l’elevato rapporto

acqua disponibile/po-

tenza, l’utilizzo della

circolazione naturale in

condizioni di emergenza,

caratteristiche che difficil-

mente potrebbero essere proposte

per taglie superiori, permettono un

completo approccio “by design” alla

sicurezza.

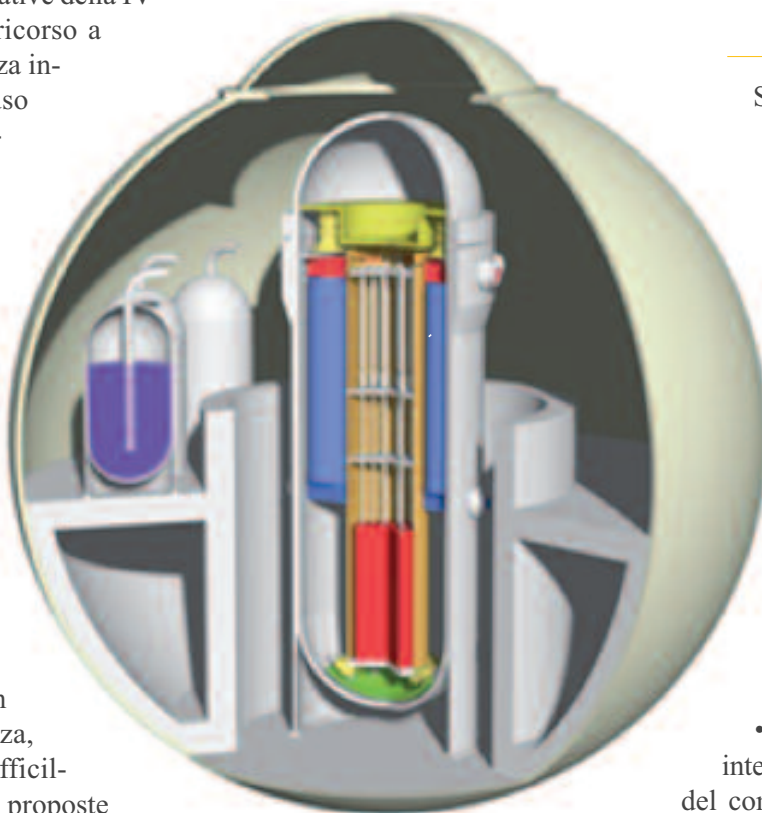
Inoltre, modularità e ridotti tempi di costruzione, semplificazione del progetto, ottimizzazione dei processi di fabbricazione e ridotto rischio di investimento li hanno resi interessanti, pur con la penalizzazione dovuta all’economia di scala, sia per operatori elettrici di limitata dimensione, sia per paesi emergenti e in via di sviluppo. Alcuni paesi stanno studiando l’applicabilità dei reattori evolutivi di piccola taglia ad un uso combinato, prevalentemente mirato alla contemporanea produzione di energia elettrica e dissalazione dell’acqua.

Gli SMRs sono oggetto di diversi progetti dell’IAEA nonché dell’iniziativa International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC), ex GNEP - Global Nuclear Energy Partnership, della quale fa parte anche l’Italia. Negli Stati Uniti è atteso il lancio da parte del DOE (Department of Energy) di un programma di R&S finalizzato ad un rapido sviluppo, licensing e commercializzazione di tali reattori.

Obiettivi

Scopo del progetto è mantenere e sviluppare competenze e infrastrutture adeguate a garantire la capacità di valutazione della consistenza tecnico-scientifica di specifici progetti proposti in ambito internazionale e di studio delle tematiche tecnico-scientifiche di carattere generale dei reattori evolutivi. Le principali attività sono state le seguenti:

- realizzazione della facility integrale SPES-3 per lo studio del comportamento di SMRs in condizioni incidentali e validazione di metodi e codici per la verifica della sicurezza;
- sviluppo e prova di componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia;
- studi preliminari per lo sviluppo di un simulatore ingegneristico di reattori evolutivi LWR per studi di sicurezza;
- analisi integrata di sistema e sicurezza relative alla riduzione del rischio sismico e all’analisi degli eventi esterni;
- valutazione dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche di sicurezza degli attuali reattori LWR alla luce delle caratteristiche dei reattori LWR evolutivi.



Prova integrale SPES-3 per reattori modulari di piccola-media taglia

Le verifiche numeriche effettuate con il codice RELAP5 hanno confermato che l'impianto SPES-3 progettato nel precedente triennio è idoneo alla simulazione di transitori incidentali di progetto (DBE) ed eventi di severità superiore (BDBE) del reattore IRIS. Inoltre, partendo da un'analisi dei vari progetti internazionali per SMR e delle relative facility integrali si è valutata la possibilità di utilizzare SPES-3 per la simulazione di altri reattori e sono state individuate le necessarie modifiche per simulare il comportamento integrale di alcuni SMR. Sono state evidenziate le sue potenzialità nello studio di specifici aspetti attraverso test ad effetti separati, come l'accoppiamento tra primario e contenimento durante un incidente di perdita di refrigerante (LOCA), e la qualifica dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche di sicurezza.

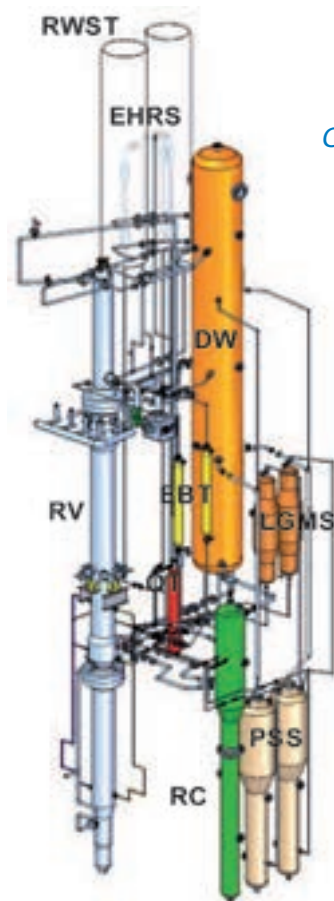
Relativamente alla sperimentazione di componentistica per l'impianto SPES-3 sono state condotte verifiche sulle prestazioni di elementi scaldanti forniti dalla ditta ROTFIL. Le verifiche effettuate alle condizioni di potenza nominale per un nocciolo di un reattore modulare di piccola/media taglia hanno fornito buoni risultati. Nel corso della prossima annualità dovranno essere estese a condizioni rappresentative di eventi incidentali utilizzando anche altri fornitori.

È proseguito l'approvvigionamento di componenti per la realizzazione dell'impianto SPES-3 quali il trasformatore della stazione elettrica, i serbatoi del sistema di contenimento - Dry-well, Quench tank, 2 PSS (Pressure Suppression System), Cavity, 2 LGMS (Long Term Gravity Make-up System), 2 EBT (Emergency Boration Tank) - e gli scambiatori e le piscine del sistema EHRS (Emergency Heat Removal System).

Queste attività sono state eseguite dalla SIET, società partecipata dell'ENEA, con la supervisione dell'ENEA. Lo sviluppo di strumentazione speciale per la prova integrale è stato condotto in collaborazione da SIET e CIRTEN e ha riguardato la misura della portata in condizioni bifase. SIET ha effettuato progettazione esecutiva, realizzazione e sperimentazione di una sonda capacitiva per la misurazione del grado di vuoto. Il CIRTEN ha operato sia alla caratterizzazione sperimentale della sonda sia allo sviluppo e alla verifica sperimentale di una catena di misura costituita da una turbina, da un "drag disk" e dalla sonda sviluppata. I buoni risultati ottenuti nelle prove a freddo dovranno essere confermati con prove a temperature caratteristiche.

Sviluppo componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia

Gli studi relativi ai componenti critici di reattori di piccola-media taglia hanno riguardato il downcomer-fondo



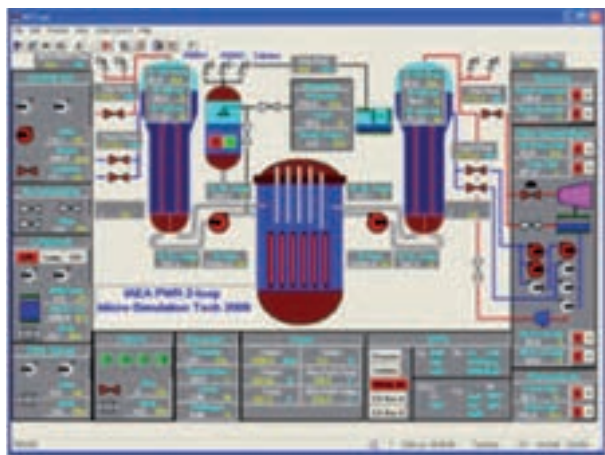
*SPES-3
Configurazione Generale*



*Sonda tomografica
SIET*



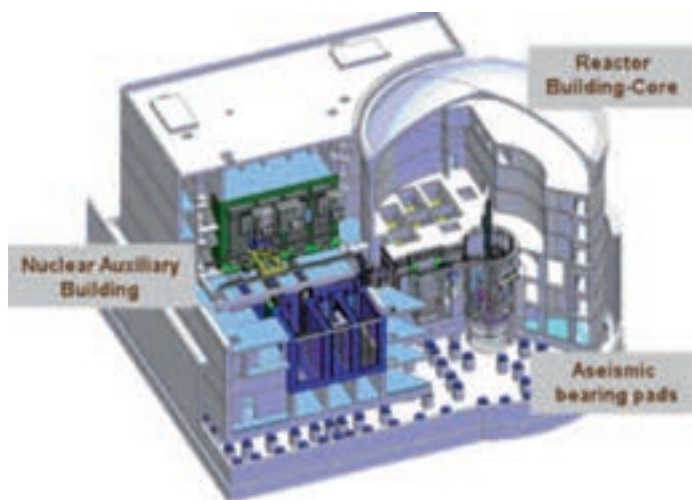
*Mock-up del
fondo vessel in
plexiglass*



Sinottico principale del simulatore PCTRAN-PWR per l'impianto "IAEA-PWR 2-loop"



Modello 3D (FEM) del contenimento di un reattore SMR con isolatori HDRB (High Damping Rubber Bearings)



Jules Horowitz Reactor – Edificio Reattore ed Edificio Ausiliario

vessel ed il generatore di vapore. In particolare per il primo è stata effettuata una campagna di prove sperimentali per una caratterizzazione multi-D della fluidodinamica del downcomer e del fondo vessel. Questi dati sperimentali, essenziali per supportare gli studi di miscelamento del boro in condizioni transitorie ed incidentali, costituiscono altresì una base per la validazione dei modelli dei codici CFD commerciali come il codice FLUENT estesamente utilizzato per gli studi a supporto della progettazione dell'apparecchiatura e delle prove sperimentali.

Sono proseguiti gli studi sulle instabilità del flusso riguarda al generatore di vapore a tubi elicoidali del tipo concepito per il reattore IRIS. Sono state realizzate ulteriori prove sul mock-up del generatore di vapore a doppio tubo prototipico per l'identificazione dei campi di instabilità di funzionamento. In parallelo è stata condotta un'attività finalizzata alla realizzazione parziale presso l'area sperimentale SIET di un impianto che permetterà la sperimentazione termoidraulica di base per valutare soluzioni ottimizzate o alternative per il generatore di vapore a tubi elicoidali da utilizzare per reattori SMR e per reattori di IV generazione.

Queste attività svolte da CIRTEN hanno avuto come prodotto principale la realizzazione di apparecchiature sperimentali, la generazione di dati sperimentali e la qualifica di modelli numerici.

Simulazione ingegneristica: sviluppo di un simulatore

Sono stati analizzati simulatori di ingegneria e simulatori di tipo educational per arrivare a tracciare il profilo dei possibili futuri simulatori di ingegneria di supporto progettazione, verifica e gestione di futuri reattori per impianti nucleari in Italia. Tale analisi ha permesso di valutare le funzionalità di tali sistemi di calcolo, i principali componenti hardware e software, i codici di calcolo utilizzati nei medesimi, le prospettive di introduzione di elementi evolutivi di simulazione. L'attività è stata realizzata congiuntamente da ENEA e CIRTEN.

Analisi di sistema: Analisi eventi esterni

I risultati delle analisi deterministiche per un contenimento con isolatori sismici di tipo HDRB (High Damping Rubber Bearings) hanno largamente confermato quanto emerso dalle analisi compiute in passato con i modelli teorici degli isolatori, rimarcando i notevoli benefici ottenuti introducendo l'isolamento sismico alla base. Utilizzando i risultati delle prove a rottura compiute è stato inoltre possibile costruire un modello non lineare dell'isolatore per il codice ABACUS che ha permesso di valutare con buona approssimazione i margini di sicurezza rispetto al terremoto di progetto consentiti dall'applicazione dell'isolamento sismico.

Gli studi dell'impatto areo sull'edificio di contenimento di un reattore SMR hanno riguardato l'analisi della risposta globale della struttura e la valutazione della vulnerabilità dei principali sistemi di sicurezza, strutture e componenti tramite un approccio deterministico alla corretta rappresentazione dell'interazione struttura-struttura. Per la determinazione degli effetti strutturali globali e locali si è realizzata una analisi non-lineare con codici agli elementi finiti dinamici (MSC.Dytran©) che hanno permesso di implementare un algoritmo Lagrangiano di contatto e di prendere in conto il comportamento non lineare dei materiali. Le simulazioni hanno considerato impatti orizzontali e inclinati, di aerei commerciali e militari sul contenimento di un reattore SMR innovativo.

Sviluppo e validazione codici di calcolo

La disponibilità di metodi di simulazione adeguati è una esigenza imprescindibile per la valutazione dei diversi progetti di reattori evolutivi in particolare per quanto riguarda le caratteristiche di sicurezza. L'adeguatezza dei codici di calcolo utilizzati per gli studi di sicurezza nei reattori LWR attuali deve essere verificata a fronte delle fenomenologie alla base delle caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva proprie di questi impianti come il forte accoppiamento tra primario e contenimento, l'utilizzo della circolazione naturale e di iniezione per gravità in condizioni di emergenza. Oltre ai più recenti sviluppi della modellistica le attività sono state dedicate all'esigenza di avere a disposizione dati sperimentali adeguati per la validazione di questi codici da una parte valutando le potenzialità del reattore Jules Horowitz Reactor (JHR) dall'altra definendo un programma sperimentale da effettuarsi sull'impianto SPES-2 della SIET.

L'attività di sviluppo e validazione modellistica è stata effettuata da CIRTEN ed ha riguardato l'accoppiamento di un codice d'impianto con un codice di contenimento per l'analisi incidentale dei reattori modulari di tipo integrato. A questo scopo è stato acquisito il codice GO-THIC ed è stato implementato un accoppiamento semplificato con il codice di sistema RELAP5 definendo una strategia di sviluppo che renda l'accoppiamento più generale. Le potenzialità dell'accoppiamento sono state evidenziate con semplici analisi relative al reattore IRIS che hanno inoltre permesso di mettere in evidenza i limiti legati ai diversi algoritmi risolutivi dei due codici e di proporre delle linee guida per l'utilizzo. Le attività relative al Jules Horowitz Reactor (JHR) da

una parte sono state dedicate alla valutazione delle potenzialità del reattore ed alla definizione di una possibile forma di partecipazione italiana al progetto, dall'altra hanno visto il diretto coinvolgimento di ENEA e CIRTEN nella progettazione di canali di prova del reattore. Questo approccio ha permesso una completa survey dell'attività di progettazione-realizzazione-sperimentazione al fine di comprendere il possibile interesse di JHR per gli stakeholder industriali italiani.

Il coinvolgimento nella progettazione dei canali di prova del reattore ha riguardato la caratterizzazione dei transitori di potenza in dispositivi per prove di irraggiamento (ADELINE e MOLFI) con codici di neutronica (DULCINEE and TRIPOLI4) e la progettazione termoidraulica con il codice CATHARE del dispositivo LO-RELEI per la prova di elementi di combustibile in condizioni di LOCA.

È proseguita l'azione di recupero dell'impianto SPES-2, costruito nei laboratori SIET negli anni 90 per la simulazione integrale del reattore AP600 e pertanto provvisto dei relativi sistemi di sicurezza passivi. La parte di attività portata avanti da CIRTEN è stata finalizzata all'individuazione delle tematiche di interesse per reattori evolutivi da studiare sulla facility SPES-2 tenendo conto dell'esperienza acquisita nei programmi sperimentali internazionali (in particolare il progetto PKL-2 dell'OECD/NEA) e delle sue possibili configurazioni. Vista la rilevanza della diluizione del boro per la sicurezza dei reattori nucleari, si è esaminata con successo la possibilità di effettuare esperimenti sul tema nell'apparecchiatura SPES-2.

Da parte ENEA è stata realizzata un'analisi di pre-test per un tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) con lo scopo di investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario massa ridotto. Questo tipo di transitorio è già stato analizzato sulla facility PKL e la sua realizzazione su SPES-2 permetterebbe di proporre in ambito internazionale un confronto tra i risultati ottenuti sulle due diverse facility.

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.3, linea progettuale 2: Reattori evolutivi

Referente: P. Meloni, paride.meloni@enea.it



Nucleare da fissione Reattori di quarta generazione

Scenario di riferimento

Tra le tecnologie nucleari più promettenti proposte dal Generation IV International Forum (GIF), i reattori veloci refrigerati a piombo (Lead cooled Fast Reactor –LFR) ricoprono un ruolo molto importante poiché potenzialmente soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di IV generazione.

Sostenibilità. Il piombo è un refrigerante che presenta ottime proprietà nucleari e che rende possibile l'esercizio di un reattore nucleare a spettro "duro". Ciò

conferisce al nocciolo una lunga durata ed una elevata efficienza nell'utilizzo

del combustibile, di molto superiore agli attuali sistemi nucleari. Il flusso neutronico veloce permette inoltre di operare con un ciclo del combustibile "chiuso", che consente una drastica riduzione di scorie ad elevata radiotossicità.

Economicità. I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere semplici. Il piombo infatti non interagisce chimicamente con aria e acqua, e ha una bassa tensione di vapore. Ciò consente di realizzare sistemi a bassa pressione e di installare il Generatore di Vapore (GV) direttamente nel sistema primario. Ciò comporta una notevole semplificazione impiantistica che riduce complessità, dimensioni e costi di impianto.

Sicurezza e Affidabilità. I sistemi LFR, grazie alle caratteristiche termodinamiche del piombo e alle ottime capacità di intrappolare i prodotti di fissione anche volatili e di schermare le radiazioni gamma, consentono di ottenere elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio. L'utilizzo del piombo inoltre favorisce l'asportazione della potenza di decadimento

in regime di circolazione naturale, permettendo una sensibile semplificazione dei sistemi di protezione.

Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica. Il combustibile ad ossidi misti, contenente nel lungo termine attinidi minori, è del tutto inefficace per la produzione di plutonio weapon-grade. Inoltre, le proprietà neutroniche del piombo permettono di progettare noccioli a lunga vita che sono inutilizzabili per la produzione di plutonio.

Obiettivi

L'obiettivo principale è sostenere lo sviluppo tecnologico dei sistemi nucleari di quarta generazione, in particolare LFR, che riscuote interesse in Europa. Le attività implementate riguardano:

- sviluppo e validazione codici di calcolo;
- progettazione e implementazione di nuove infrastrutture e laboratori;
- sviluppo e qualifica componenti e sistemi prototipici;
- qualifica materiali strutturali.



Risultati

Laboratorio per la termo-fluidodinamica dei metalli liquidi

Si è provveduto alla definizione e implementazione di un laboratorio di misura per la caratterizzazione dei metalli liquidi, acquisendo strumentazione prototipica e avviando azioni tese alla qualifica di componenti prototipici quali il GV del DEMO-LFR.

In particolare si è progettata e realizzata la apparecchiatura TxP “Test for Powder” dedicata alla caratterizzazione sperimentale del singolo elemento del GV.

Nell’ambito degli studi sulla sicurezza del reattore LFR, si sono implementate attività di supporto per la caratterizzazione dell’interazione metallo liquido-acqua, che può avvenire in situazioni incidentali nei GV-LFR. L’apparecchiatura sperimentale LIFUS-5 è stata aggiornata per consentire di effettuare esperimenti affidabili e di elevata qualità. Attività numeriche di supporto alle prossime campagne sperimentali sono state effettuate col codice SIMMER-III, simulando il comportamento del GV-LFR.

Sviluppo tecnologie

In tale contesto è stato revisionato il progetto concettuale dell’impianto a piombo fluente HELENA, sia per prevederne l’esercizio con un tenore di ossigeno disciolto molto basso ($< 10^{-8}$ wt%), sia per revisionare il progetto della pompa centrifuga. Si è infatti deciso di sviluppare una girante in acciaio ricoperta in Ta.

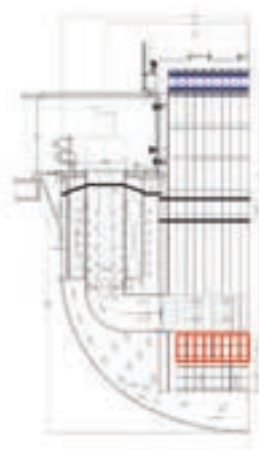
Per quanto riguarda la qualifica dello scambiatore di calore per la rimozione del calore di decadimento (DHR), si è provveduto alla implementazione di strumentazione aggiuntiva sull’impianto a metallo liquido pesante CIRCE-ICE, per la completa caratterizzazione del prototipo di DHR da 800 kW.

L’upgrade realizzato sull’impianto CIRCE, oltre alla qualifica del DHR, permetterà di realizzare importanti esperimenti per la caratterizzazione dello scambio termico in pin bundle refrigerati a metallo liquido pesante, sia in regime di circolazione stazionaria che transitoria (incidentale).

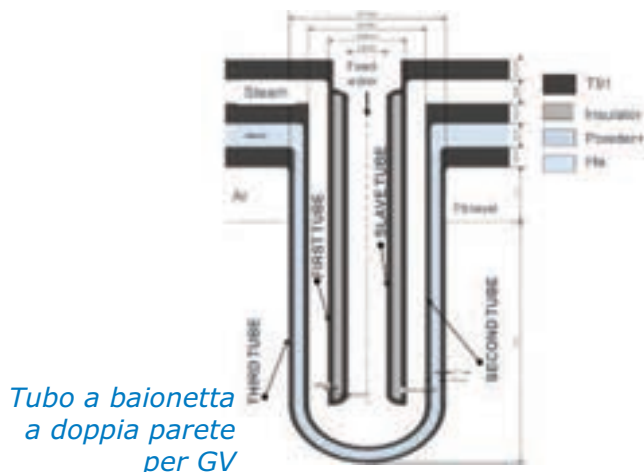
Si è inoltre progettato un pin bundle per misure di scambio termico e perdite di carico in regime di convezione mista o circolazione naturale, che caratterizzano il comportamento del nocciolo LFR in condizioni di transitori incidentali. Il pin bundle sarà installato sulla facility a metallo liquido NACIE, su cui sono stati già avviati gli interventi di upgrade.

Tra le attività concernenti il supporto ai sistemi SFR “Sodium cooled Fast Reactor”, si è supportata la realizzazione di un sistema di dissipazione del calore di decadimento degli elementi di combustibile esauriti, che propone l’inserimento di un circuito intermedio a sali fusi. Si è quindi effettuata la progettazione termo-fluidodinamica e meccanica di una sezione di prova rappresentante uno dei tubi alettati proposti per lo smaltimento passivo del calore della piscina di decadimento.

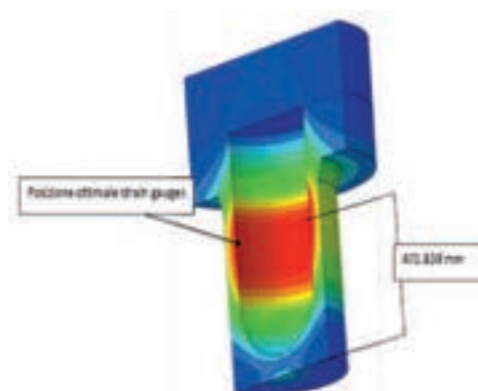
Sempre in supporto ai sistemi SFR, si è proceduto allo studio di fattibilità di un piccolo impianto a sodio, avendo come obiettivo primario l’esecuzione di test di shock termici.



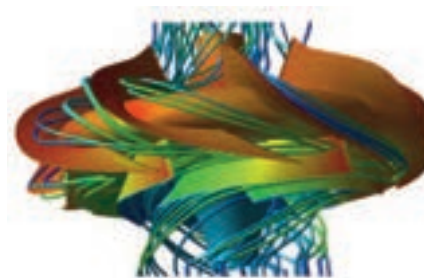
Reattore LFR, ELSY



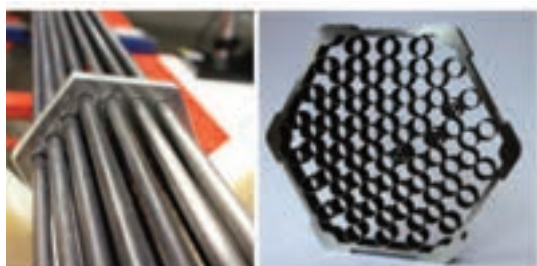
Tubo a baionetta a doppia parete per GV



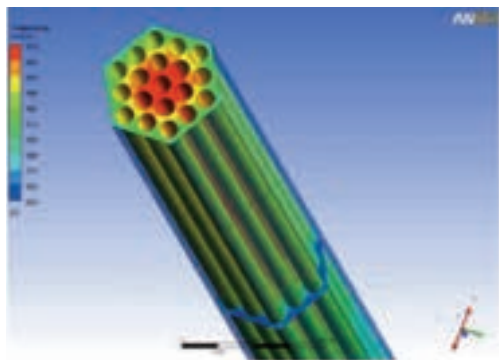
Calcolo della posizione ottimale per l’installazione degli estensimetri nel vessel di LIFUS-5



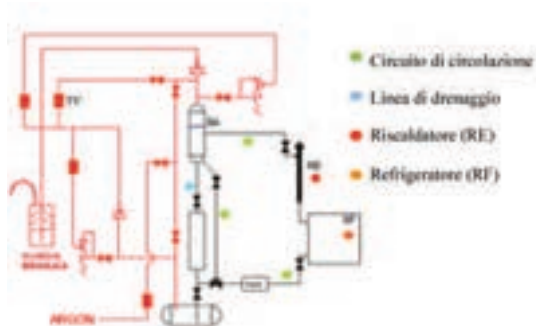
Analisi fluidodinamica della palettatura della pompa centrifuga per l’impianto HELENA operante in piombo fluente



Fuel Pin Bundle impianto CIRCE-ICE e spacer grid modificata per installazione della strumentazione



NACIE pin bundle, refrigerato a metallo liquido pesante in circolazione naturale (0.1 m/s)



Schema impianto a sodio per studio di shock termici



Macchina per test di trazione su provini ad elevata temperatura

Sviluppo di materiali innovativi

Sono state realizzate specifiche attività sperimentali per la caratterizzazione e la qualifica dei materiali strutturali, anche mediante l'acquisizione di nuove attrezzature di laboratorio e la certificazione di quelle già esistenti. Tra le varie attività implementate vi è l'effettuazione di test su campioni non irradiati con lo scopo di definire un database di confronto per la caratterizzazione degli effetti da danneggiamento neutronico sulle proprietà termo-meccaniche dei materiali strutturali. I test di riferimento sotto irraggiamento e in piombo sono in fase di realizzazione nell'ambito dell'esperimento LEXURII.

Tra gli studi avviati sui materiali strutturali si è implementata anche una attività concernente lo sviluppo di materiali ceramici compositi. L'attività di ricerca ha riguardato lo sviluppo di processi di fabbricazione per la messa a punto di diverse tipologie di composito a matrice ceramica a fibra lunga per la realizzazione di componenti nucleari. In collaborazione con FN SpA, che dispone di un impianto per CVI "Chemical Vapour Infiltration", e di un forno per PIP "Polymer Infiltration Pyrolysis", si sono realizzati pannelli in composito a matrice ceramica.

Dai pannelli realizzati sono stati ottenuti dei provini per la successiva caratterizzazione fisico-meccanica.

Per la caratterizzazione di materiali e componenti si è implementata inoltre una tecnica basata sulle misure di diffusione neutronica ai piccoli angoli (SANS: small-angle neutron scattering). Applicata agli acciai strutturali, permette di valutarne la resistenza negli impianti e migliorarne le prestazioni.

Infine, si è prodotta una trattazione dei vari criteri di danno tipici di reattori nucleari e dei modelli costitutivi. Si sono inoltre prodotte simulazioni agli elementi finiti (CAST3M) del comportamento strutturale di alcuni componenti (vessel). Le analisi condotte in campo non lineare mostrano un comportamento del tutto diverso a seconda degli acciai modellati (ad es. ratcheting per componenti in AISI 316).

Tecnologie chimiche

L'attività consiste nell'implementazione di tecnologie chimiche in supporto allo sviluppo dei sistemi nucleari innovativi. Si è in prodotta una revisione per le procedure e metodiche di cleaning per strutture operanti in metallo liquido con la relativa gestione dei residui liquidi e solidi derivanti.

In supporto ai sistemi SFR, grande importanza assumono gli studi sulla permeazione del trizio. Il trizio diffonde attraverso i materiali strutturali alle temperature operative e conseguentemente può essere rilasciato in ambiente. Al fine di studiare ed analizzare possibili accorgimenti necessari per ridurre l'entità dei rilasci di tri-

zio in ambiente è stato sviluppato un codice di calcolo in linguaggio MATLAB (SFR-TPC), il quale viene utilizzato per valutare i rilasci di trizio in ambiente.

Sviluppo e validazione di modelli avanzati per la progettazione di reattori di IV generazione

L'attività si è incentrata sullo sviluppo e l'implementazione di modelli fisici e modelli numerici, con lo scopo di qualificare e caratterizzare i codici di calcolo. Per quanto riguarda le analisi di sistema, si è sviluppato e validato il codice di sistema CATHARE modificato per il trattamento dei metalli liquidi pesanti, attraverso il confronto con dati sperimentali disponibili. In parallelo si è proceduto allo sviluppo del codice FEM-LCORE per lo studio della termoidraulica 3D di sistemi a metallo liquido. Nel codice sono stati implementati nuovi modelli di turbolenza, e condotte alcune tipiche simulazioni (flow-blockage) ottenendo ottimi risultati.

Relativamente alle attività di neutronica e cinetica del nocciolo, si è elaborato un modello di DEMO che ha considerato l'accoppiamento tra la parte neutronica e quella termoidraulica, per descrivere adeguatamente il comportamento della dinamica di nocciolo.

Relativamente alla neutronica è proseguita l'attività di sviluppo e validazione del modulo ERANOS/KIN3D, appositamente sviluppato per l'analisi di cinetica neutronica di sistemi critici veloci. KIN3D è stato testato valutando il livello di reattività nei sistemi GODIVA (reattore veloce sperimentale presso LANL-USA) e GUINEVERE (facility a potenza zero presso SCK•CEN, Belgio). I risultati ottenuti indicano l'affidabilità del codice per la simulazione dei transitori di sorgente prescelti.

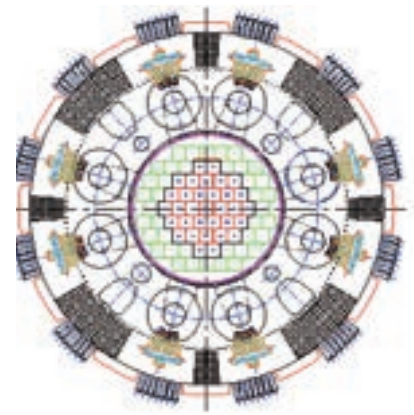
È stata inoltre sviluppata una metodologia per l'analisi delle quantità integrali misurate nelle esperienze di benchmark e della relativa correlazione con quelle relative al reattore di riferimento, mediante il calcolo di opportuni coefficienti di sensitività.

Per quanto riguarda la concettualizzazione del nocciolo del DEMO, l'attività ha riguardato la revisione critica della configurazione esistente. È stato ricontestualizzato l'obiettivo di dimostrazione tralasciando l'obiettivo di elevata fluenza neutronica. Questa semplificazione permette di alleggerire i criteri di progetto di DEMO privilegiando la circolazione naturale e progettando quindi un reattore capace di rispondere in modo autonomo ed efficiente a qualsivoglia condizione incidentale (post-Fukushima).

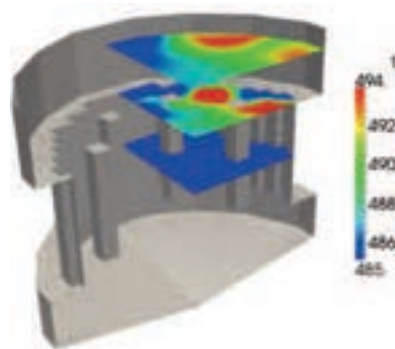
Parallelamente è stato sviluppato e validato un simulatore per l'analisi della dinamica del sistema, che com-

prenda, oltre al nocciolo, anche il generatore di vapore, la pompa primaria e la piscina del reattore.

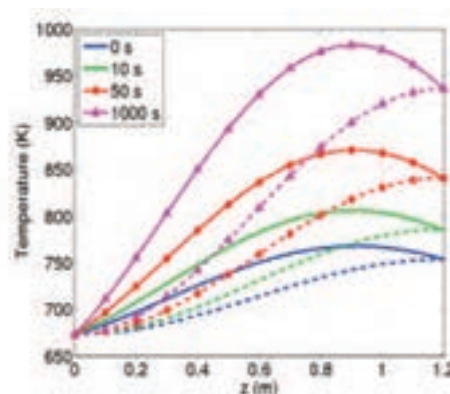
Infine per quanto riguarda la validazione del codice di sistema RELAP5 quando applicato ai sistemi a gas, si è proceduto all'implementazione dell'impianto sperimentale HEFUS-3, permettendo di ottenere portate di elio fino a 1000 g/s e 70 bar, e una migliore mappatura dei parametri fisici. Si sono quindi simulati casi di arresto del sistema di circolazione e la perdita totale della portata dell'elio a causa della rottura di un componente. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per l'implementazione del modello di calcolo ai fini di ampliare il database di validazione del codice di calcolo.



Sezione mediana del DEMO-LFR



Modellazione del nocciolo LFR mediante il codice FEM-LCORE e profilo di temperatura in un elemento di combustibile (flow-blockage)



Distribuzione assiale delle T di combustibile e piombo a seguito di una inserzione di reattività di 100 pcm

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.3, Linea progettuale 3: Reattori di quarta generazione

Referente: P. Meloni, paride.meloni@enea.it

M. Tarantino, mariano.tarantino@enea.it



Nucleare da fissione Rifiuti radioattivi

Scenario di riferimento

Dopo l'incidente di Fukushima e soprattutto dopo il referendum del giugno 2011, il rilancio dell'opzione nucleare in Italia ha subito una decisa battuta d'arresto; tuttavia rimane la necessità di risolvere il problema della gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi prodotti dalle attività nucleari pregresse, oltre che di quelli annualmente prodotti da attività industriali, ospedaliere e di ricerca.

L'Italia ha ratificato nel 2006 la Joint Convention on the Safety of the Management of Spent Fuel and Radioactive Waste, che impegna i Paesi contraenti alla messa in sicurezza del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi. La recente approvazione della Direttiva EURATOM 2011/70 del 19 luglio 2011, che istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, ha di fatto trasformato questi impegni in obblighi a carico dei paesi UE.

Il Governo ha indicato la SOGIN come soggetto responsabile della realizzazione e dell'esercizio del deposito nazionale dei rifiuti radioattivi e del parco tecnologico annesso (D.Lgs. 15/02/2010 n. 31). Il compito affidato all'ENEA, nell'ambito dell'Accordo di Programma, è stato invece di definire la situazione italiana, attraverso la revisione e l'aggiornamento del lavoro svolto in passato dai vari soggetti interessati, e di avviare studi e programmi di R&S necessari per acquisire e mettere a disposizione del Paese competenze tecniche e scientifiche propedeutiche alle attività operative.

Obiettivi

Obiettivo principale è lo sviluppo di competenze e strumenti per caratterizzazione dei rifiuti, performance assessment, valutazione di impatto ambientale, studio di scenari, analisi territoriali, definizione dei criteri di accettabilità dei rifiuti, sistemi di condizionamento, radioprotezione, analisi di sicurezza ecc. A tale riguardo sono state finora esaminate le seguenti tematiche:

- supporto al processo decisionale;
- stato dell'arte su studi e ricerche in Italia;
- revisione critica dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi;
- caratterizzazione dei rifiuti da conferire al deposito;
- analisi propedeutiche alla progettazione e realizzazione del deposito;
- trasporto dei rifiuti radioattivi;
- linee guida per la security;
- linee guida per comunicazione, informazione e formazione;
- caratterizzazione dei siti, performance assessment e fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati ad un deposito superficiale;
- smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita;
- processi innovativi per il trattamento e condizionamento dei rifiuti radioattivi.



Supporto al processo decisionale

Il GdL Stato-Regioni ex DM 25 febbraio 2008 ha affidato all'ENEA lo studio di tematiche specifiche quali ad es. l'individuazione della natura e della tipologia delle infrastrutture da realizzare nel sito di smaltimento, sia quelle relative al deposito, sia quelle in grado di conferirgli il carattere di "Parco Tecnologico". I risultati dello studio sono stati incorporati nel Rapporto Finale al Ministro dello Sviluppo Economico (settembre 2008), in base al quale il Governo ha legiferato in materia, con il già citato D.Lgs. 15/02/2010 n. 31, per la parte riguardante i rifiuti radioattivi.

Stato dell'arte su studi e ricerche svolti in Italia

È stata condotta un'analisi delle attività effettuate tra il 1996 e il 2003 dall'ENEA, individuando ed analizzando i documenti tecnico-scientifici e le iniziative più significative del periodo. I lavori della Task Force Sito dell'ENEA sono stati numerosi e, già alla fine degli anni 90, fu elaborato un primo progetto concettuale del sito di smaltimento superficiale con sistema multi-barriera; in quel periodo la Task Force ha anche elaborato una metodologia di selezione geografica delle aree potenzialmente idonee ad ospitare l'insediamento, basandosi su una serie di stringenti criteri di esclusione, con un approccio ancora valido, con gli opportuni aggiornamenti tecnici e scientifici.

Revisione critica dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi

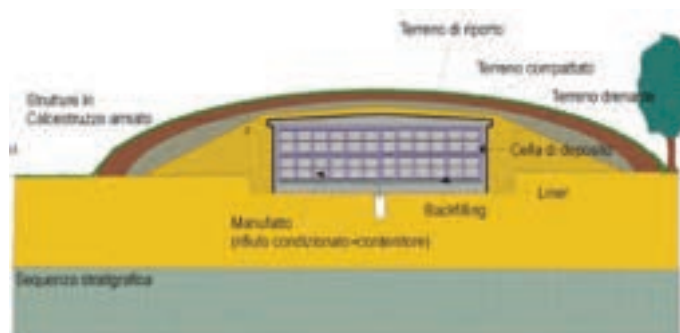
L'ultimo "Inventario Nazionale dei Materiali Radioattivi" prodotto dalla sopra citata Task Force risale all'anno 2000. Da allora l'unico inventario disponibile è stato quello dell'ISPRA (ex APAT), che raccoglie le informazioni fornite dagli esercenti ma fornisce solo una "fotografia" dell'esistente e non effettua alcuna elaborazione dei dati ai fini dello stoccaggio definitivo. Tali elaborazioni sono state affidate ad ENEA, mediante un accordo raggiunto con ISPRA nel corso della prima annualità. L'ENEA ha elaborato i dati sui rifiuti radioattivi sulla base di ipotesi di condizionamento, laddove non già condizionati, al fine di pervenire all'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi condizionati. Inoltre l'ENEA ha fatto una stima dei rifiuti di futura produzione da smantellamento degli impianti dismessi, basandosi sia su informazioni provenienti dagli esercenti sia su stime fatte in proprio. L'attività è proseguita nella seconda annualità con la messa a punto di un sistema informativo di gestione del data base e attualmente va avanti a regime con l'aggiornamento dei dati e l'ottimizzazione del sistema informativo denominato DBRR-SIAP. Si è iniziato ad interagire con la SOGIN per ottenere informazioni aggiornate sul programma di ge-



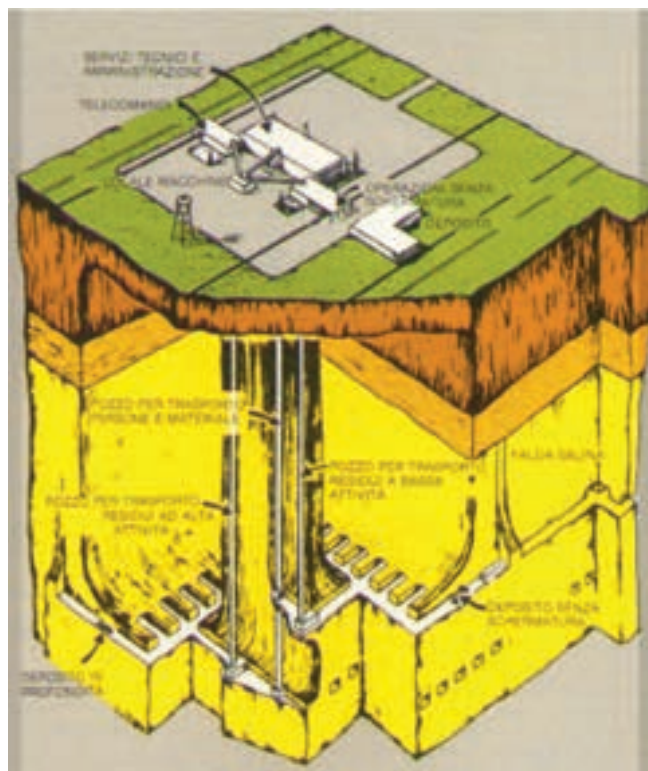
Principali siti nucleari italiani



Strumento portatile per misura gamma



Schema di Deposito Superficiale



Schema di Deposito Geologico

stione dei rifiuti radioattivi, evitando sovrapposizione di ruoli. La valutazione critica delle informazioni ricavate dall'inventario consente di individuare carenze, soprattutto in termini di caratterizzazione, e fornisce spunti per studi e programmi di R&S sul tema dei rifiuti radioattivi.

Caratterizzazione dei rifiuti da conferire al deposito

Nel corso delle prime due annualità l'ENEA ha provveduto all'elaborazione di procedure per la caratterizzazione radiologica e chimico-fisica dei rifiuti radioattivi e di criteri di massima per l'accettabilità al deposito, e alla definizione dell'insieme integrato di infrastrutture, tecnologie e servizi necessari per la caratterizzazione di rifiuti radioattivi, ai fini del conferimento al deposito. È stata effettuata la progettazione preliminare dei laboratori di misure distruttive e non-distruttive e del laboratorio di qualificazione e certificazione di matrici di condizionamento. È stato inoltre sviluppato un progetto particolareggiato di prototipo di sistema integrato di caratterizzazione radiologica non distruttiva, basato su tecniche di interrogazione neutronica attiva tramite fissione indotta, interrogazione gamma attiva tramite fotofissione e tomografia gamma, che si propone come sistema innovativo con limiti di rivelazione particolarmente bassi, utili per la corretta discriminazione dei rifiuti di II e III Categoria.

Con la terza annualità è stato avviato lo studio di alcuni temi specifici e poco esplorati: caratterizzazione radio-

logica di rifiuti contenenti radionuclidi di difficile rilevabilità (HTMR: Hard To Measure Radionuclides; es. ^{99}Tc , ^{129}I , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{55}Fe , ecc.) con la metodologia degli "scaling factor"; studio di rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a ^3He (le alternative in pratica sono i rivelatori basati sul boro, che però hanno dei limiti di efficienza che dovranno essere migliorati). Infine è stato testato sperimentalmente un sistema per la localizzazione del materiale fissile all'interno delle matrici di contenimento tramite misure neutroniche passive.

Analisi propedeutiche alla progettazione e realizzazione del deposito

Nella prima annualità sono stati individuati i requisiti minimi del sito e analizzate le azioni propedeutiche alla progettazione del deposito, del quale sono stati individuati, in via preliminare, i criteri di progetto derivati dai requisiti di sicurezza stabiliti dalla IAEA. Sono stati anche identificati gli studi ancora da effettuare relativi a scenari, analisi territoriali, performance assessment, sicurezza, quadro normativo e di radioprotezione, migrazione dei nuclidi, implicazioni territoriali ed ambientali ecc.

Sono anche stati studiati in via preliminare i seguenti temi:

- **Trasporto:** è stato effettuato uno studio relativo alle problematiche inerenti il trasporto dei rifiuti condizionati dai siti di produzione al deposito nazionale, e identificate le soluzioni tecniche più idonee.
- **Linee guida per la security:** sulla base dell'esperienza di organismi internazionali qualificati (IAEA, OECD-NEA, UE) sono state identificate le problematiche di security correlate con il deposito dei rifiuti radioattivi e le relative soluzioni tecniche e procedurali.
- **Linee guida per comunicazione, informazione e formazione:** sulla base dell'esperienza internazionale, sono state proposte le linee guida per la definizione di un piano di azioni per informare, coinvolgere ed ottenere il consenso del pubblico.

Le attività del secondo anno sono state finalizzate alla formazione delle competenze necessarie per l'analisi di sicurezza e per i calcoli di performance assessment, mediante acquisizione o sviluppo dei relativi strumenti computazionali. Si sono anche avviati studi relativi alla caratterizzazione geologico ambientale dei siti, che spesso appare poco esaustiva e soggetta a critiche. Sono stati analizzati i principali aspetti geologici, territoriali, ambientali e antropici che possono influire direttamente e indirettamente sulla scelta di un sito per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi a bassa attività.

Caratterizzazione dei siti, performance assessment e fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati ad un deposito superficiale

Per quanto riguarda la sicurezza dei depositi sono in corso attività di R&S relative ai fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati a un deposito di smaltimento superficiale. In particolare è stato finalizzato il lavoro di modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito superficiale con lo sviluppo di una metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso. In parallelo è proseguito lo sviluppo di competenze su strumenti computazionali deterministici (es. codice AMBER) per le procedure di analisi di sicurezza e “performance assessment” del deposito.

Sono poi state avviate attività di R&S mirate a individuare e studiare le metodologie e le tecniche più adeguate per la caratterizzazione e per il monitoraggio ambientale dei siti durante la fase di sorveglianza istituzionale del deposito. In particolare, si è posta l'attenzione su quei radionuclidi la cui mobilità impone un'analisi approfondita, sebbene presenti nel rifiuto condizionato in minore quantità (ad es. ¹⁴C, ³H, ¹²⁹I, gas nobili, ecc.), e li rende adatti come radionuclidi di riferimento per il monitoraggio per la tempestiva segnalazione del cedimento delle barriere.

Smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita

Sebbene lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e a lunga vita non rientrasse inizialmente nell'oggetto della presente linea progettuale, fin dalla prima annualità si ritenne utile riassumere anche le attività svolte dall'ENEA in tale ambito, tra il 1976 ed il 1991. Successivamente è stato ritenuto opportuno che il nostro Paese tornasse ad occuparsi di tale tematica, in modo da poter sviluppare le competenze a supporto delle future decisioni in merito alla gestione di tali rifiuti. Si è quindi cominciato a partecipare attivamente alle principali iniziative in corso a livello europeo ed internazionale. L'ENEA e il CIRTEN hanno aderito alla IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform) partecipando ai lavori per la definizione della relativa SRA (Strategic Research Agenda), documento di grande rilevanza in quanto individua i temi di R&S in cui si devono ancora conseguire importanti progressi scientifici e tecnologici per raggiungere l'obiettivo comune, ovvero la realizzazione del primo deposito

geologico europeo. Sempre in tema di smaltimento geologico l'ENEA partecipa, fin dalla sua fondazione nel 2002, alla associazione ARIUS, che ha come obiettivo quello di rendere possibile la realizzazione e l'esercizio di un deposito geologico multinazionale; da ARIUS è nato nel 2009 il gruppo di lavoro ERDO-WG, le cui attività hanno prodotto un modello di struttura per un'organizzazione ERDO (European Repository Development Organisation) compresa la bozza di Statuto, le linee guida operative ed un business plan a 5 anni. Altre partecipazioni a eventi e gruppi di lavoro organizzati da IAEA e NEA permettono di consolidare le competenze sul tema.

Tecniche innovative di trattamento, condizionamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi

Con la terza annualità sono stati avviati studi relativi a tecniche innovative per il trattamento, condizionamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi, con particolare riferimento ai rifiuti attesi dai cicli del combustibile per i reattori di generazione III+ e IV (LFR/SFR). È stato approfondito lo studio di processi di separazione pirometallurgica lantanidi/attinidi, mediante prove a “freddo” di elettrorefinazione in sali fusi (impianto Pyrel II). In parallelo è stato progettato e avviata la realizzazione di un impianto per prove di elettrorefinazione con uranio depleto. È iniziato anche lo sviluppo di matrici di condizionamento per i rifiuti radioattivi provenienti dai detti processi; per le matrici vetrose/vetroceramiche si è proceduto anche alla individuazione delle fasi minerali derivanti dai processi di contenimento mediante analisi ai raggi X, spettrofotometria IR, e SEM-EDS.



Impianto pilota Pyrel II (glove-box)

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.3, linea progettuale 4: Rifiuti radioattivi

Referente: P. Meloni, paride.meloni@enea.it

A. Luce, alfredo.luce@enea.it



Nucleare da fissione Qualifica di componenti e sistemi

Scenario di riferimento

I processi di qualifica di componenti e sistemi rivestono un ruolo significativo in campo nucleare. Le attività seguono due differenti approcci. Il primo, focalizzato sullo sviluppo di metodologie per le analisi di sicurezza, prevede l'utilizzo di codici e piattaforme di calcolo specifiche per la modellistica termoidraulica e per il trasposto di contaminanti sia in condizioni operative che incidentali. Il secondo, teso alla predisposizione di sistemi già esistenti o di componenti innovativi alle necessità di qualifica, è rivolto alla definizione e alla valutazione delle esigenze di adeguamento degli impianti e dei requisiti per l'esecuzione delle specifiche campagne sperimentali. Numerose attività sono state svolte in collaborazione tra ENEA e CIRTEN.

Obiettivi

Le attività abbracciano tutti gli aspetti legati al processo di qualifica, con ricadute in termini di validazione di processi, innovazione e contributi a livello normativo e procedurale. Gli obiettivi principali riguardano:

- sviluppo e validazione di strumenti di metodologie e di analisi;
- sviluppo impianti sperimentali;
- sviluppo procedure e messa a punto di tecnologie innovative per test di componenti;
- normativa e sviluppo di test di appoggio e qualificazione ambientale, meccanica ed elettromagnetica.

Risultati

Sviluppo e validazione di strumenti di metodologia e di analisi

Sono state studiate, in stretta collaborazione tra ENEA e CIRTEN, le piattaforme di calcolo per termofluidodinamica e dinamiche di trasporto dei contaminanti distribuiti nell'impianto in fase incidentale, secondo tre direttrici:

- Attività su modelli e piattaforme di calcolo per le analisi incidentali e di sicurezza: modellistica avanzata per simulazione T/H multi-scala sui dati sperimentali relativi ad uno scambiatore in piscina per la rimozione del calore residuo; simulazione neutronica applicata a unità di tipo LWR, acquisendo la catena di codici deterministici «A P O L L O 2 - CRONOS2» per calcoli di cella e di reattore tramite soluzione dell'equazione del trasporto di neutroni; modellistica per analisi di sicurezza, mediante lo studio dell'analisi di sensibilità della risposta del codice integrale MELCOR al variare di parametri critici di sistema e d'impianto.

Sono stati implementati modelli e validato il codice ICARE-CATHARE V2.3 (IRSN) per lo studio dei fenomeni di "debris bed reflooding" ed è stato sviluppato, validato e applicato il codice DRACCAR (IRSN) per la simulazione del comportamento termo-meccanico di elementi di combustibile durante incidenti di perdita di refrigerante (LOCA) in reattori pressurizzati e raffreddati ad acqua leggera. Il gruppo Dati Nucleari (ENEA) ha prodotto due librerie di sezioni d'urto multi-gruppo



per i calcoli di schermaggio nei reattori ad acqua leggera.

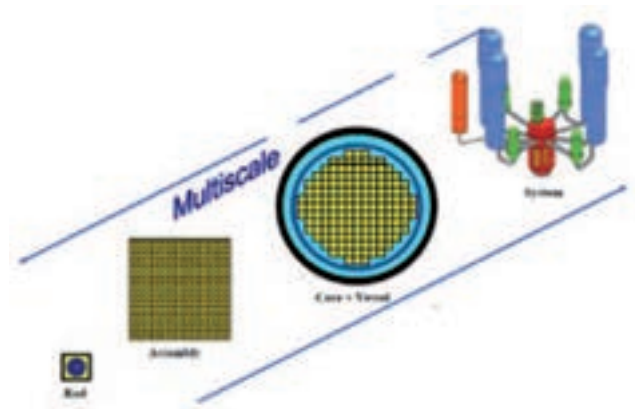
L'accoppiamento dei codici è uno dei principali compiti della piattaforma NURISP. Rilevanti informazioni sono state raccolte durante gli studi (CIRTEN) riferiti ai codici SALOME, NEPTUNE TRIO_U, SATURNE e CATHARE di detta piattaforma implementata nel sistema CRESCO dell'ENEA. Analisi di impatto ambientale post-incidentale e/o ad analisi previsionali basate su dati statistici da applicare nell'interfaccia di rilascio tra impianto e sito sono state ottenute dallo sviluppo modelli del codice di calcolo RadCal-III (ENEA).

- Realizzazione di un database con raccolta critica di informazioni su sistemi e componenti caratterizzanti un impianto nucleare PWR evolutivo da 1600 MWe, per attività di sviluppo e validazione dei modelli di calcolo e per la valutazione delle evoluzioni incidentali e delle relative conseguenze. I dati impiantistici raccolti rappresentano una buona approssimazione di dati costruttivi reali e non sono collegabili ad un singolo impianto reale.
- Studio e sviluppo critico di metodi di analisi delle incertezze nei processi di analisi del rischio. Si è proceduto anche alla identificazione degli adeguati strumenti analitici per associare la giusta confidenza ai risultati ottenuti e alle decisioni gestionali. Le attività hanno riguardato sia un approccio probabilistico di sicurezza (PSA) rivolto alla determinazione della frequenza di danneggiamento del nocciolo, alla sostenibilità, all'analisi integrata "incertezza-probabilità" focalizzata sulle misure di importanza, sia l'identificazione delle incertezze relative ai codici di calcolo contenute nei risultati. È stata redatta una "guida" contenente un confronto con altre metodologie e corredata da un esempio di applicazione pratica. Lo studio è stato completato con valutazioni dell'efficienza teorica di un sistema totalmente passivo.

Sviluppo impianti sperimentali

ENEA e CIRTEN hanno svolto attività propedeutiche al ripristino della funzionalità dell'impianto termoidraulico VAPORE, realizzato per test ad alta pressione su componenti tipici dei circuiti principali di reattori nucleari ad acqua.

L'ENEA ha selezionato il progetto di una valvola prototipo di grandi dimensioni per linee ad alta pressione di vapore o di miscela acqua/vapore, allo scopo di verificare tramite simulazione con codice RELAP l'adeguatezza dell'impianto VAPORE, e progettato l'installazione del prototipo sull'impianto fornendone le specifiche di esercizio; ha infine programmato le azioni necessarie per il riallineamento del sito dell'impianto VAPORE



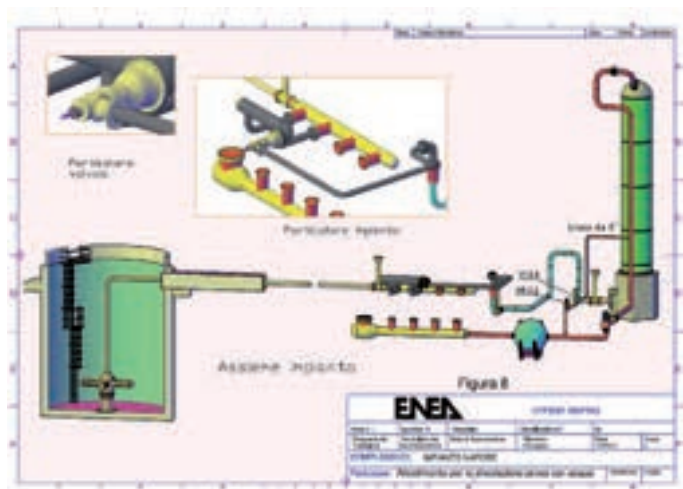
Sviluppo e validazione di modellistica avanzata per simulazione T/H multiscala

alle vigenti normative e ne ha avviato l'attuazione.

Il CIRTEN ha simulato tramite codice RELAP le prove per la qualifica del prototipo (sulla base di specifiche ENEA) e fornito i dettagli della gestione dell'impianto per l'eventuale esecuzione della campagna sperimentale; ha inoltre formulato proposte tecniche di modifica strutturale ove necessario.

L'attività ha consentito di ricostituire un gruppo di esperti nella gestione del codice RELAP specificamente studiato per la termoidraulica di circuiti complessi. Punto di forza è stata la disponibilità di dati reali provenienti da precedenti campagne di qualifica di componenti sull'impianto VAPORE.

Procedure sperimentali per test di materiali per irraggiamento da neutroni sono state sviluppate in collaborazione tra ENEA, CIRTEN e Politecnico delle Marche avvalendosi dei reattori nucleari di ricerca TRIGA RC-1 (neutroni termici) e RSV Tapiro (neutroni veloci). Sono stati condotti: test di nuovi rivelatori per neutroni a diamante sintetico a singolo cristallo (la loro resistenza alle radiazioni li rende adatti nei processi di qualificazione dei materiali); analisi di danneggiamento mediante simulazioni Monte Carlo con il codice



Schema (in scala) dell'installazione della valvola prototipo su VAPORE per prove con miscele acqua-vapore

MCNPX per componenti elettronici (schede) destinati a operare in ambiente ostile; realizzazione di un sistema di acquisizione e monitoraggio dati per i reattori TRIGA e TAPIRO basato sul Compaq RIO della National Instrument; lavori di adeguamento del canale tangenziale passante per l'installazione di una facility di radiografia e tomografia neutronica; indagine sul comportamento di materiali innovativi per la rivelazione di neutroni, considerando gli effetti dell'irraggiamento neutronico su granulati di acido borico, acciai e campioni in Fe(α); caratterizzazione delle fluenze neutroniche di ciascuna location di irraggiamento utilizzando nuovi rivelatori NaI(Tl), operando un confronto tra i dati sperimentali e dati di fluenza simulati con MCNPX.

Sviluppo procedure e messa a punto di tecnologie innovative per test di componenti

L'attività ha avuto il duplice scopo di caratterizzare materiali compositi a matrice ceramica (C_f/C e SiC_f/SiC) per componenti di reattori nucleari a fissione di nuova generazione, sviluppati da FN S.p.A. (società partecipata ENEA) e di redigere un protocollo di prove e procedure per la qualifica dei materiali, dei metodi e delle apparecchiature impiegate. Sono stati redatti i documenti di assicurazione qualità relativi all'attività da svolgere, conformemente alla ISO 9001: 2008 (piano di qualità, piano di fabbricazione e controllo, piano di qualifica) e definite le prove fisico-meccanico-strutturali e termiche cui sottoporre i campioni. Sono stati definiti i piani di taglio per l'ottenimento del massimo numero di provini e sperimentate diverse tecniche di taglio (mole diamantate, elettroerosione a filo, laser). L'esame dei provini porta a concludere che la tecnica ibrida di realizzazione CVI+PIP (Chemical Vapour Infiltration + Polymer Infiltration Pyrolysis) presenta aspetti molto interessanti, tenendo anche conto della sua maggiore economicità rispetto al solo trattamento di CVI. Test a temperatura ambiente sono stati effettuati presso FN S.p.A., quelli ad alta temperatura a cura CIR-TEN.

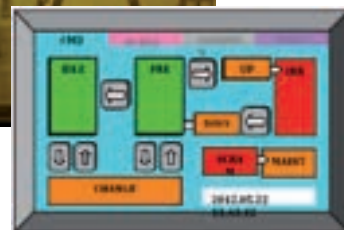
Nell'ambito dello sviluppo di nuove procedure per test di qualifica di componenti e sistemi è stata progettata una nuova consolle di concezione avanzata per la facility di irraggiamento gamma CALLIOPE (C.R. ENEA Casaccia), che presenta caratteristiche uniche sia a livello italiano che europeo. È perciò in grado di rispondere a numerose richieste nazionali e internazionali, consentendo di effettuare test di qualifica, di affidabilità e di valutazione della resistenza a radiazione di sistemi e componenti.



Prova di trazione presso FN



Cella di irraggiamento dell'impianto CALLIOPE e schermata di controllo della nuova consolle



Sistema di fotocellule e argano con piattaforma porta sorgente

L'impianto CALLIOPE è attualmente dotato di una console di comando di concezione tradizionale di grande affidabilità ma che non consente operazioni di monitoraggio e acquisizione a distanza. L'attività è stata svolta in collaborazione con CIRTEN. Basandosi su una architettura concettuale avanzata che prevede l'impiego di microprocessori PLC, sarà resa possibile la disponibilità di informazioni in tempo reale e il conseguente sviluppo, nel rispetto delle normative di riferimento nazionali e internazionali, di nuove metodologie di test. Sono stati definiti (CIRTEN) i requisiti del sistema e del software di controllo (livello di sicurezza SIL 3), sono stati proposti il revamping del Sistema di Controllo Sorgente e l'implementazione di un Sistema di Acquisizione e Reporting. Tutte le attività sono state condotte rispettando il criterio generale della netta separazione tra funzioni di controllo di sicurezza e di processo. È stato infine studiato e progettato (ENEA) un sistema di monitoraggio della movimentazione della sorgente di ^{60}Co mediante l'impiego di sensori ottici: pur risultando completamente svincolato da qualsiasi componente dei sistemi di sicurezza e degli organi di movimentazione della sorgente dell'impianto (come richiesto da normativa), esso permette di definire in modo univoco e in tempo reale i parametri necessari per la determinazione della dose assorbita dai provini sottoposti a irraggiamento. In tal modo, i dati relativi a ogni irraggiamento saranno direttamente registrati e inviati ad un apposito terminale che permetterà l'emissione dei certificati richiesti per ogni singolo test.

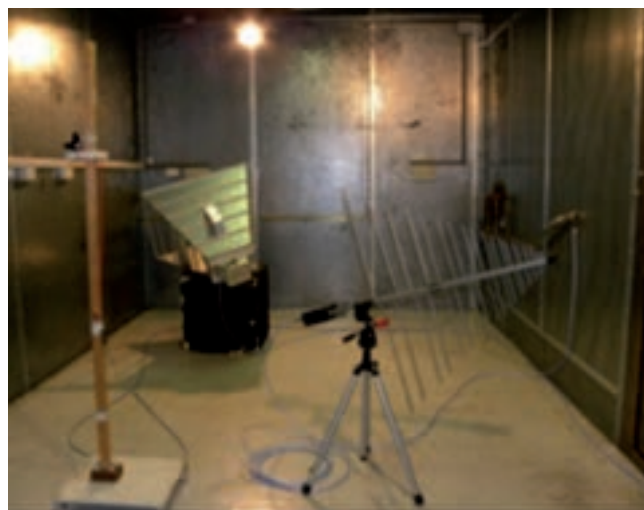
Studio di metodologie innovative di prova e di integrazione tra prove di tipo e metodo analitico per le qualifiche ambientali, meccaniche, sismiche ed elettromagnetiche di componenti e sistemi per le centrali nucleari

Sono state svolte attività congiuntamente da ENEA e da CIRTEN secondo i due filoni di seguito descritti.

- Prove di compatibilità elettromagnetica (EMC): verifica della possibilità di eseguire in camera reverberante prove di immunità radiata su sistemi e componenti (parte del processo di qualificazione nucleare), con modalità presumibilmente più severe delle prove eseguite in camera semianecoica. Si è inteso realizzare una camera reverberante trasformando una camera schermata già in dotazione al Laboratorio ENEA. Una volta realizzata questa infrastruttura, si procederà a confrontare l'esito di prove di immunità radiata eseguite in camera re-

verberante, secondo quanto prescritto dalle norme CEI EN 61000-4-21 o MIL-STD-461E/F, con i risultati di analoghe prove eseguite in camera semianecoica, secondo le norme CEI EN 6100-4-3 e MIL-STD-461E/F. Allo stato attuale, la camera è predisposta per l'installazione del sintonizzatore-agitatore; le catene di misura sperimentali (a meno del controllo remoto del sintonizzatore-agitatore) sono state allestite e collaudate; il software di gestione è stato realizzato e collaudato sulle catene sperimentali da 200 MHz a 1 GHz e predisposto per l'integrazione fino a 18 GHz.

- Qualificazioni meccaniche e sismiche: studio dell'integrazione fra prove di tipo e simulazioni numeriche, utilizzando sistemi di acquisizione dei dati sperimentali per mezzo di telecamere ad alta risoluzione nella banda dell'infrarosso vicino e codici numerici di simulazione meccanica e sismica. Obiettivo finale è lo studio dei limiti di applicabilità dei risultati delle analisi numeriche ai processi di qualificazione nucleare su sistemi complessi simili, l'attività di ricerca è stata al momento rivolta al confronto e alla valutazione della relativa accuratezza delle risposte tra dati sperimentali ottenuti mediante prove su tavola vibrante, acquisiti mediante il sistema STEX della MTS e il sistema di monitoraggio innovativo denominato 3DVision installato nel laboratorio di prove dinamiche e controllo vibrazioni in ENEA Casaccia.



Camera reverberante

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.3, linea progettuale 5: Qualifica di componenti e di sistemi

Referente: P. Meloni, paride.meloni@enea.it

S. Baccaro, stefania.baccaro@enea.it

AREA

PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE



Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti

Scenario di riferimento

Le biomasse sono una fonte energetica continua e programmabile, con previsioni di sviluppo importanti in termini assoluti e relativi. La produzione di bioenergia è una realtà diffusa e consolidata, che si avvale di una pluralità di materie prime - sia residuali che provenienti da colture dedicate - e della disponibilità di tecnologie mature e affidabili. La quantità di energia prodotta in Italia nel 2009, pari a 5,77 Mtep, rappresentava il 28% della produzione totale di energia da FER nell'anno, e il 19% circa della potenzialità stimata (30 Mtep/a) che, se adeguatamente valorizzata, rappresenta una solida base per il raggiungimento degli obiettivi al 2020 del Piano d'azione nazionale per le energie rinnovabili. Le più valide alternative per l'uso energetico delle biomasse sono:

- la combustione diretta con produzione di calore per il riscaldamento domestico, civile e industriale o per la generazione di vapore;
- la trasformazione in combustibili liquidi, per il settore energetico (bioliquidi) o per il settore trasporti (biocarburanti);
- la fermentazione anaerobica di biomasse residuali e l'utilizzo del biogas per la generazione di calore e/o elettricità e/o di bio metano
- la gassificazione – pirogassificazione con produzione di syngas per la generazione di calore e/o elettricità e/o H_2 .

Le biomasse, soprattutto quelle derivate da rifiuti, rappresentano ad oggi un'alternativa privilegiata ai combustibili fossili; si tratta di energia prodotta dagli scarti

dell'agricoltura, dell'allevamento e dell'industria, con una trasformazione che, oltre a fornire un reddito addizionale ai settori coinvolti, comporta evidenti vantaggi sia ambientali che energetici. Il presente progetto si inserisce in questo contesto puntando all'ottimizzazione dell'intera catena "Waste to energy": conversione in biogas di biomasse, residui di lavorazioni agroindustriali e rifiuti, purificazione e arricchimento in metano per l'immissione in rete o per l'utilizzo in sistemi energetici per la generazione di elettricità.

L'ENEA supporta l'industria nazionale della bioenergia per metterla in grado di fornire risposte adeguate alla necessità di innovazione tecnologica e di sistema nel campo della produzione di energia elettrica e calore da biomassa. Ha, in tale ambito, coordinato programmi nazionali ed europei.



Obiettivi

L'obiettivo generale del progetto ha riguardato lo sviluppo e l'ottimizzazione di sistemi integrati per la valorizzazione energetica delle biomasse residuali basati sui seguenti sottosistemi: unità di produzione di biogas o syngas (sia digestori anaerobici che gassificatori), clean up e fuel up grading, utilizzo in motori a combustione interna e celle a combustibile ad alta temperatura o attraverso immissione in rete.

Le attività condotte per questo tema di ricerca sono il proseguimento delle attività degli anni precedenti con l'aggiunta di nuovi indirizzi volti a completare la tematica della produzione elettrica attraverso le biomasse. Alcune linee di ricerca del precedente triennio sono state completate con la realizzazione di prototipi da laboratorio e con l'avvio di attività sperimentali in scala significativa.

Ottimizzazione della produzione di biogas attraverso processi fermentativi e sviluppo di un prototipo da laboratorio

Lo studio del processo in reattori batch o in semi-continuo ha permesso di ottimizzare i parametri operativi per la produzione di CH_4 da effluenti zootecnici (suini e bovini) e FORSU da raccolta differenziata, di individuare alcune tecniche per la riduzione della concentrazione dell' H_2S nel biogas all'interno del digestore stesso, e di studiare le dinamiche delle popolazioni batteriche al variare delle condizioni ambientali per ottimizzare le rese di conversione della biomassa in termini di metano e/o idrogeno e di bassa presenza di H_2S .

Le sperimentazioni, condotte simulando le condizioni di alimentazione degli impianti reali, hanno evidenziato come la codigestione migliori notevolmente le rese energetiche di alcune biomasse con un contenuto energetico povero come i liquami suinicoli, e assicuri una maggiore stabilità del processo per i substrati più complessi.

Come aspetto innovativo è stato poi introdotto un primo stadio di digestione dedicato alla produzione di idrogeno da FORSU. Tale scelta: migliora le caratteristiche qualitative del materiale con cui alimentare il reattore metanigeno, permettendo in tal modo di raggiungere produzioni specifiche di metano maggiori rispetto a quelle ottenibili in un processo a singolo stadio; permette di ridurre la formazione di H_2S nel biogas; non necessita di particolari tecnologie/costi aggiuntivi rispetto ai digestori tradizionali; aggiunge un prodotto di

valore, come l' H_2 , le cui rese specifiche sembrano avere buoni margini di miglioramento.

I risultati delle prove hanno consentito il dimensionamento e la progettazione di un impianto pilota di taglia significativa (circa 5 m^3 circa di volume utile) utilizzabile anche per prove in campo a supporto di impianti reali. L'impianto, montato su un rimorchio stradale, è trasportabile e installabile nel sito più opportuno per attività dimostrative; è stato dimensionato per poter alimentare una cella a combustibile a carbonati fusi (MCFC) da 0,5-1 kW, ma potrà essere anche impiegato per produrre elettricità con motori/turbine e per l'upgrading del biogas a biometano.

Clean up del biogas

I materiali selezionati nel corso del precedente anno sono stati testati al variare delle condizioni operative, avvicinandosi il più possibile a quelle reali. Tra i carboni attivi ne è stato individuato uno, funzionalizzato con sali di Cu e Cr, che ha mostrato delle ottime capacità di adsorbimento le quali, ad una definita temperatura, aumentano in presenza di O_2 nella corrente da trattare. Per tale carbone è stato ipotizzato un meccanismo di rimozione, confermato da analisi e caratterizzazioni pre e post test. Per gli ossidi metallici lo studio è stato rivolto all'individuazione dei parametri cinetici, nella reazione di ossidazione selettiva. Sono stati studiati inoltre l'effetto competitivo di adsorbimento dovuto alla presenza della CO_2 e il comportamento di una miscela simulante il biogas. Anche in questo caso è stato individuato il materiale che mostra la maggiore selettività verso l'abbattimento dell' H_2S . Il comportamento degli stessi materiali individuati per la rimozione dell' H_2S è stato studiato anche in presenza di siloxani.

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti è stato progettato e realizzato un prototipo, in scala da banco, per la purificazione di una corrente di biogas in grado di alimentare una MCFC da 1 kW.



Impianto pilota di digestione anaerobica



Prototipo per purificazione di una corrente di biogas di circa $0,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$, contenente 50 ppm di H_2S , per un tempo di funzionamento di circa 1500 ore

Up grading del biogas a biometano per l'immissione in rete

Le attività hanno riguardato lo sviluppo di sistemi per la separazione della CO₂ dal biogas, al fine di arricchire in metano il biogas stesso (upgrading) e raggiungere la composizione richiesta per l'immissione in rete.

Sulla base dell'analisi bibliografica condotta, l'adsorbimento della CO₂ su matrici solide a letto fisso è emerso come il più attraente per la semplicità di gestione e la facilità di automazione; un ampio studio con sviluppo di un modello è stato rivolto proprio a questa tecnologia. Una particolare attenzione è stata rivolta anche verso le tecnologie a membrane che rappresentano una strada promettente soprattutto in applicazioni di piccola taglia (< 1 MW).

A valle dell'analisi bibliografica è emerso che l'utilizzo delle membrane ceramiche per la separazione della CO₂ dal biogas è ad oggi limitato ad applicazioni di nicchia a livello prototipale di ricerca. Dunque ci si è diretti verso lo studio di nuovi prototipi, avviando lo sviluppo di un processo per la produzione di tali membrane, basato sulla realizzazione di supporti ceramici porosi per tape casting & co-sintering e successiva deposizione per CVD dello strato selettivo. I nuovi materiali sono stati caratterizzati in un circuito di prova realizzato ad hoc. In parallelo all'attività sulle membrane ceramiche, è stato avviato lo studio di membrane polimeriche, sia attraverso la realizzazione di un modello per simulare il loro comportamento al variare delle condizioni di esercizio, che attraverso prove sperimentali di prodotti sia commerciali che sviluppati nell'ambito del programma. È stato progettato e realizzato un impianto per la prova di moduli per portate variabili da 1 a 50 m³/h.

Sistemi di cogenerazione a biogas o syngas: analisi tecnico economiche

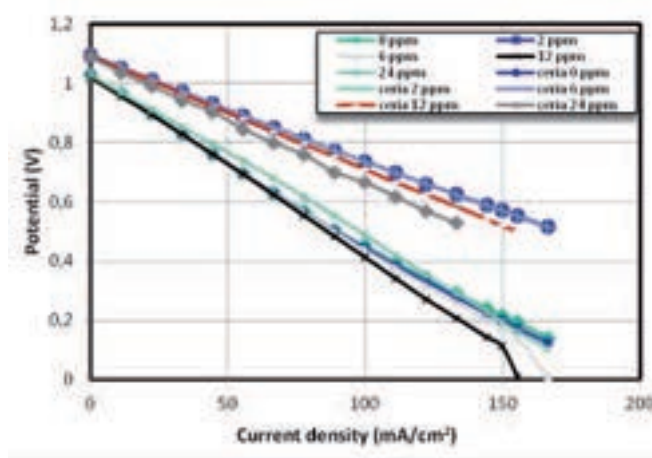
Si sono studiati i sistemi cogenerativi alimentati da biogas o da syngas da gassificazione delle biomasse. È stato completato il software AIDA che consente di analizzare i potenziali produttivi delle biomasse fermentescibili e delle biomasse lignocellulosiche censite dall'Atlante Italiano delle Biomasse, precedentemente sviluppato da ENEA, di proporre un dimensionamento di massima per un impianto di valorizzazione energetica, di fornire infine i parametri economici per la valutazione della fattibilità e della convenienza dell'investimento.

Sviluppo di componenti innovativi per MCFC

Sono stati sviluppati e sperimentati componenti innovativi per celle a combustibile MCFC più resistenti ai contaminanti, come elettrodi di nichel-cromo rivestiti con un sottile strato di ceria o ceria-zirconia. Misure di impedenza elettrochimica, misure di polarizzazione e analisi post test hanno mostrato che gli elettrodi ricoperti



Impianto per prova moduli a membrane polimeriche



Curve di polarizzazione per celle con anodi non rivestiti e per anodi rivestiti di ceria



Impianto per la caratterizzazione di elettrodi con area 3 cm²

hanno prestazioni più elevate dei tradizionali e risultano essere efficaci nel ridurre gli effetti dell'avvelenamento, soprattutto a basse concentrazioni di H_2S , confermando così che il rivestimento sperimentato è una potenziale soluzione per ridurre l'avvelenamento di una MCFC alimentata con biogas.

Produzione di anodi e catodi con processi di formatura in plastico

È stata completata la messa a punto del processo di produzione dei componenti di cella MCC (matrice, anodo e catodo) per via plastica. Tale processo consente di ridurre l'impatto ambientale, in quanto non ci sono solventi organici, e di ridurre i costi di produzione, essendo il processo meno energivoro del tape casting, più rapido e più affidabile per la qualità del prodotto. Il processo è applicabile anche in ambiti nei quali fosse necessario produrre componenti a spessore e porosità controllata (membrane, filtri). Una eventuale fase successiva dovrebbe riguardare la qualificazione del processo attraverso caratterizzazioni chimico fisiche ed elettrochimiche e lo scale up su taglie reali.

Sperimentazione di un sistema da 125 kW gassificatore di biomasse/celle a combustibile

Le attività hanno previsto l'approfondimento delle problematiche connesse alla gassificazione delle biomasse ligno-cellulosiche e con l'utilizzo del syngas prodotto per l'alimentazione di celle a combustibile. È stato sviluppato un modello del gassificatore che è servito per



Impianto MCFC + gassificatore

verificare la possibilità di produrre un gas naturale sintetico (SNG) con una qualità pari a quella prevista dal codice SNAM RETE GAS. È stato esaminato, mediante modelli matematici, il comportamento di un sistema integrato gassificatore/cella a combustibile ed è stato completato l'impianto gassificatore/cella da 125 kW, in vista di un'eventuale sperimentazione in condizioni di esercizio dello stesso.

Comunicazione e diffusione dei risultati

I risultati sono stati diffusi attraverso la partecipazione a congressi, la pubblicazione di articoli su riviste nazionali e internazionali di documenti ENEA e mediante l'organizzazione o la partecipazione a workshop dedicati.

Molti lavori saranno presentati a Roma durante la conferenza EFC11 (14-16/12/2011), di cui l'ENEA e l'Università di Perugia sono i promotori. ENEA, CNR e RSE hanno organizzato per il 13/12/2011, come evento collaterale, una giornata dedicata alla presentazione delle attività italiane in ambito idrogeno e celle a combustibile. La giornata sarà dedicata sia alle attività di ENEA, CNR e RSE nell'ambito dell'AdP che a interventi da parte delle industrie italiane attive nel settore H_2 e FC.



Sezione gas tecnici di supporto

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

Progetto 2.1.2: Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti

Referente: A. Moreno, angelo.moreno@enea.it

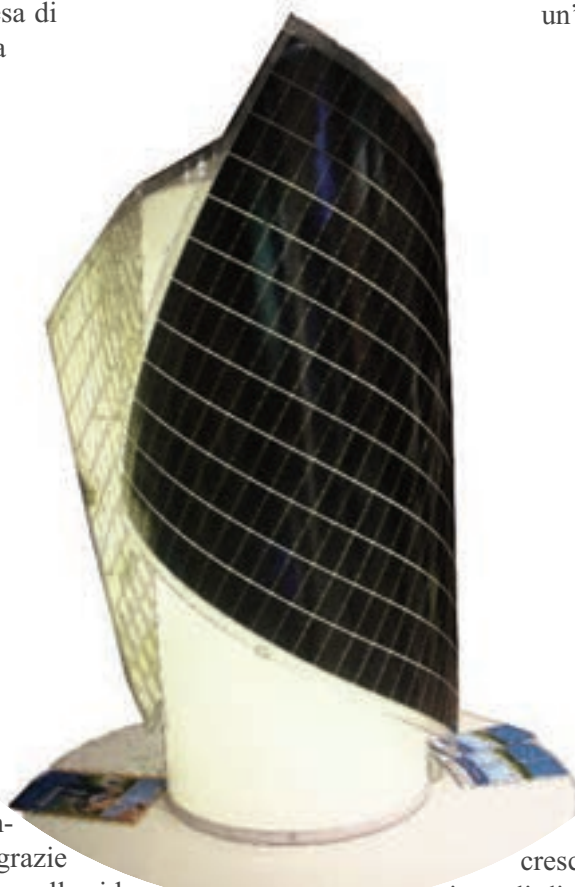


Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

Scenario di riferimento

L'approvvigionamento di energia rappresenta un fattore chiave per sostenere lo sviluppo economico e sociale dell'economia e, di conseguenza, il benessere della popolazione. In quest'ottica le fonti di energia rinnovabili, e tra queste il fotovoltaico (FV), possono fornire un contributo sostanziale. In Italia si è osservata una forte crescita della filiera fotovoltaica, favorita sia dal quadro normativo, che incentiva le installazioni di nuovi impianti FV, che dalla presa di coscienza da parte della pubblica opinione del potenziale che l'energia solare rappresenta per la produzione di elettricità. Per sostenere lo sviluppo della tecnologia fotovoltaica è necessario portare avanti un'intensa attività di ricerca che punti allo sviluppo di tecnologie innovative in grado di generare vantaggi nel lungo termine per gli utenti del sistema elettrico nazionale, in particolare per ottenere prodotti che abbiano caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi. Negli ultimi anni, i costi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie all'incremento della produzione e alla riduzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia solo l'abbassamento dei costi di fabbricazione dei moduli fotovoltaici a valori inferiori a 0,5 €/Wp potrà favorire l'affermarsi di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti adottati. Il fotovoltaico potrà così contribuire, in misura sostanziale, alla quota di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, secondo quanto previsto dal Quarto Conto Energia, elaborato dal Ministero dello Sviluppo Economico, che punta all'obiettivo indicativo di potenza installata su scala nazionale di 23 GWp per il 2016.

Le attività di ricerca sono focalizzate sullo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche a film sottile basate su materiali semiconduttori inorganici e organici. Da diversi anni l'ENEA svolge ricerche sul FV a film sottile di silicio con studi volti al miglioramento delle prestazioni dei dispositivi, nonché all'individuazione di regimi di deposizione favorevoli per l'applicazione industriale, mentre, più recentemente, è stata avviata un'attività sulle celle solari organiche.



Obiettivi

Gli obiettivi specifici del progetto consistono essenzialmente nello sviluppo di tecnologie avanzate nel campo del fotovoltaico a film sottile di silicio e materiali policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI. È inoltre previsto lo sviluppo di materiali nanostrutturati e polimerici per celle solari di nuova generazione.

I moduli a film sottile di silicio hanno acquistato un rilievo crescente grazie ad una nuova generazione di dispositivi, le cosiddette celle solari "micromorfe", ottenute utilizzando silicio amorfo e microcristallino. La riduzione del costo di fabbricazione di tali moduli richiede lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per aumentare la loro efficienza di conversione e ridurre i tempi di produzione. Questi avanzamenti si possono ottenere migliorando l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo e sviluppando materiali con coefficienti di assorbimento della luce solare più elevati. Entrambi questi accorgimenti consentirebbero di aumentare l'efficienza di conversione e, dal punto di vista industriale, avrebbero il

vantaggio di ridurre i tempi di produzione potendo utilizzare dispositivi con spessori ridotti. In una prospettiva di lungo termine si ritiene, inoltre, interessante esplorare la possibilità di impiegare materiali assorbitori nanostrutturati.

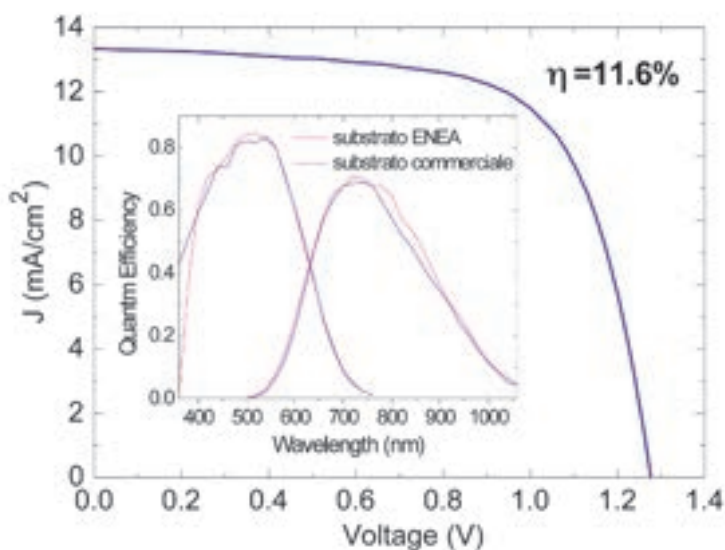
I moduli basati sui film sottili policristallini di CIS e CdTe, invece, hanno problemi connessi con l'utilizzo di materiali scarsamente disponibili con la conseguente esigenza di sostituirli. Nel caso del CIS, in particolare, è da sperimentare la possibilità di sostituire l'indio con coppie di elementi dei gruppi II e IV della tavola periodica, conservando alti valori di efficienza del dispositivo. Inoltre, visto che la famiglia dei composti Cu₂-II-IV-VI₄ presenta un intervallo di variabilità delle gap molto ampio, l'attività di ricerca potrà, in una fase successiva, essere rivolta allo sviluppo di celle a multi-giunzione a basso costo e alta efficienza.

Lo sviluppo di celle organiche è la strada da perseguire per arrivare a dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori. La leggerezza e la flessibilità del componente fotovoltaico finale rendono tale tecnologia appetibile per prodotti speciali quali caricabatterie, alimentatori portatili per applicazioni militari ecc. Di contro è necessario affrontare e superare le difficoltà concernenti la definizione di materiali che possano garantire un'adeguata efficienza di conversione stabile nel tempo. Le attività proposte su tale tema puntano a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi, utilizzando nuovi materiali polimerici. Saranno, inoltre, investigate tecnologie di stampa per la deposizione dello strato attivo al fine di valutare le potenzialità di questa tecnologia innovativa che presenta il vantaggio di ridurre i costi di processo.



Impianto per la deposizione di film sottili di silicio con tecnica PECVD – VHF PECVD

Caratteristica I-V della cella micromorfa realizzata su substrato sviluppato in ENEA con un'efficienza pari a 11,6%. Nel riquadro è evidente la migliore risposta spettrale di tale cella substrato commerciale



Sviluppo di celle solari a film sottile di silicio

Le celle di tipo “micromorph” realizzate in ENEA hanno una struttura a doppia giunzione di tipo pin/pin con una cella posteriore di silicio microcristallino e una frontale di silicio amorfo. Queste sono depositate su substrati di vetro con la tecnica Very High Frequency - Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (VHF-PECVD), che permette elevate velocità di deposizione con conseguente riduzione dei tempi di lavorazione e quindi dei costi associati.

Le attività hanno riguardato lo studio di materiali assorbitori e drogati alternativi a quelli generalmente utilizzati. Inoltre sono in fase di sviluppo materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo. Sono stati sviluppati film di ossido di silicio di tipo n, da impiegare come materiali drogati alternativi per i dispositivi. Questi strati, che in precedenza erano stati adottati con successo nelle singole giunzioni p-i-n amorse, sono stati utilizzati anche nelle giunzioni tandem micromorfe. È stato dimostrato che i nuovi strati drogati consentono di ottenere delle buone correnti di corto circuito utilizzando un semplice strato di argento come contatto posteriore delle celle (generalmente viene utilizzato un doppio strato ZnO/Ag) e senza l'utilizzo di alcuno strato intermedio tra le due celle componenti. Con un processo di fabbricazione semplificato è stata ottenuta un'efficienza del dispositivo pari a 11,3%, con uno spessore totale degli strati assorbitori di circa 1,7 μm . Parallelamente alla sperimentazione sulla parte attiva del dispositivo, è continuato lo sviluppo di elettrodi frontali di ZnO caratterizzati da una rugosità superficiale tale da determinare un efficace intrappolamento della radiazione solare. Grazie al lavoro svolto sull'ottimizzazione della morfologia superficiale, i dispositivi fabbricati sui substrati sviluppati in ENEA hanno mostrato nella regione infrarossa della radiazione una risposta spettrale migliore di quella ottenuta utilizzando substrati di tipo commerciale. In tal modo è stato possibile migliorare le prestazioni del dispositivo micromorfo, ottenendo un'efficienza pari a 11,6%.

Per quanto riguarda lo sviluppo di strati assorbitori alternativi a quelli attuali, è stato adeguato il sistema di deposizione per poter crescere film sottili microcristallini di silicio germanio ($\mu\text{c-SiGe:H}$) mediante tecnica VHF PECVD. Sono stati depositati e caratterizzati film di $\mu\text{c-SiGe:H}$ a vario contenuto di germanio e sono stati effettuati i primi test di fabbricazione di dispositivi. Inoltre sono proseguite le attività sullo studio di materiali nanostrutturati da utilizzare come strati assorbitori innovativi. In particolare è stata eseguita un'approfondita caratterizzazione ottica di nanocristalli di silicio in matrice di nitrato di silicio.

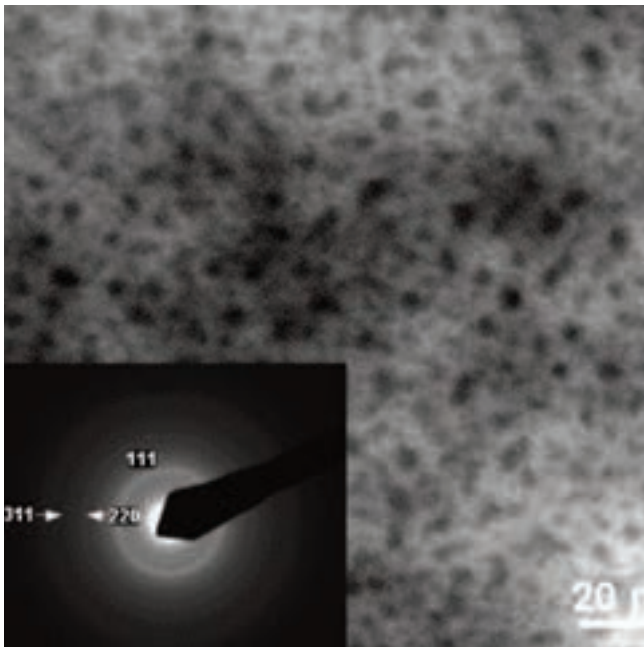


Immagine EFTEM della separazione di fase completa con formazione di Quantum Dot cristallini di Si in un film di SiNx



Impianto di sputtering per la deposizione di film sottili di metalli, ossidi conduttori o solfuri utilizzati nella fabbricazione di celle in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Per quanto riguarda le apparecchiature, è stato installato un banco ottico per la misura dei piccoli assorbimenti (Automated Dual-Lamp Photothermal Deflection Spectrometer) che consentirà di eseguire una caratterizzazione ottica dei campioni su un ampio intervallo di energie.

Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI

L'attività sui film sottili policristallini è stata incentrata sulla realizzazione di celle fotovoltaiche basate sul semiconduttore quaternario $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$. Questo semiconduttore ha una struttura simile al CIS ma ha il vantaggio di non contenere l'indio che è un metallo raro e costoso. Sono state allestite, almeno nella loro prima versione, tutte le attrezzature sperimentali necessarie al progetto. Per la crescita dei film di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ è stato ripristinato un evaporatore a fascio elettronico con il quale si possono depositare dei precursori composti da un multilayer di ZnS, Sn e Cu che subiscono poi un annealing in presenza di zolfo in un forno di solforizzazione a tubo aperto. La caratterizzazione ottica, elettrica, composizionale e strutturale dei film cresciuti mostra che i campioni ottimizzati non contengono quantità rilevanti di fasi spurie oltre a quella voluta. Per depositare gli altri strati che compongono la cella solare è stato installato un sistema di sputtering da usare per la deposizione di film sottili di molibdeno e altri metalli, di ossidi trasparenti e conduttori e di solfuri metallici. Sono stati quindi messi a punto i processi di deposizione per sputtering dei contatti (molibdeno e ZnO drogato) e del buffer layer (inizialmente CdS per Chemical Bath Deposition). In questo modo sono state realizzate diverse celle solari e l'efficienza massima raggiunta è del 2%.

Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici

Nel corso della precedente annualità l'ENEA aveva allestito una linea sperimentale per realizzare celle polimeriche in atmosfera controllata. Utilizzando una miscela composta da un derivato del politiofene e un derivato del fullerene era stata ottenuta un'efficienza del 2,9%. Lavorando all'ottimizzazione del processo di fabbricazione dei dispositivi è stato possibile migliorare le prestazioni, ottenendo un valore di efficienza pari a 4,1%. Inoltre è stata svolta un'attività di sperimentazione sul contatto frontale della cella al fine di semplificare quello attualmente in uso costituito da un doppio

strato ITO/PEDOT:PSS. È stata studiata la possibilità di evitare l'utilizzo dell'ITO, materiale il cui costo incide pesantemente su quello del dispositivo, mediante la messa a punto di film altamente conduttivi di PEDOT:PSS. Utilizzando tale contatto frontale semplificato sono state fabbricate celle solari che hanno raggiunto un'efficienza di conversione massima del 2,5%.

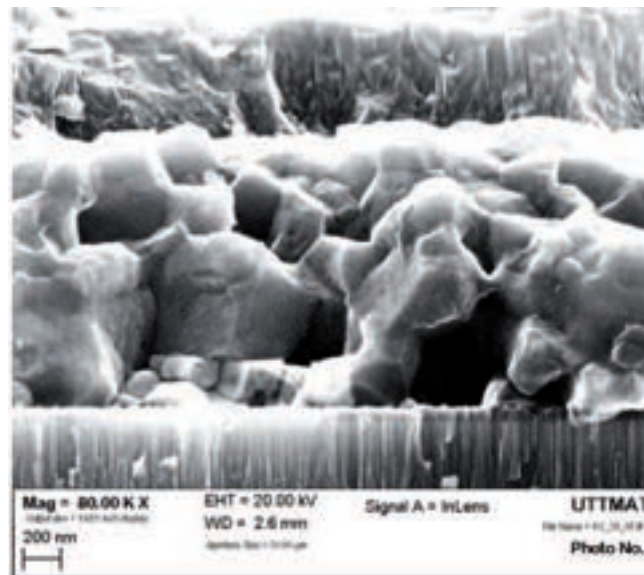


Immagine SEM in sezione di una cella in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$



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 2.1.4: Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

Referente: P. Delli Veneri, paola.delliveneri@enea.it



Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

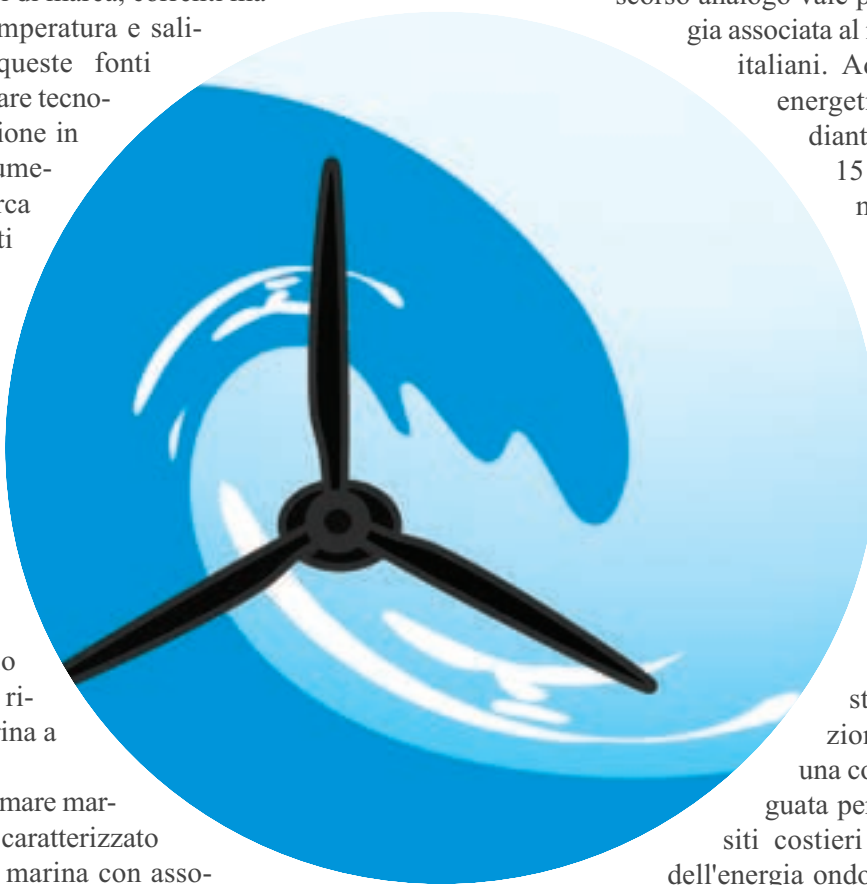
Scenario di riferimento

L'energia dal mare costituisce una fonte relativamente nuova nel panorama delle energie rinnovabili e quindi le tecnologie per "estrarla" sono ancora in pieno sviluppo. L'energia può essere estratta attraverso tecnologie che utilizzano l'acqua di mare come forza motrice o che sfruttano il suo potenziale chimico o termico. In particolare possono essere individuate sei fonti distinte: onde, maree, correnti di marea, correnti marine, gradienti di temperatura e salinità. Ognuna di queste fonti richiede una particolare tecnologia per la conversione in energia elettrica. Numerosi progetti di ricerca sono stati indirizzati soprattutto alla conversione di energia dalle onde e dalle correnti di marea e taluni hanno ormai raggiunto la fase di prototipo dimostrativo. Al rapido espandersi e sviluppo di queste tecnologie deve essere associato uno studio approfondito della risorsa energetica marina a disposizione.

Il Mediterraneo è un mare marginale, e come tale è caratterizzato da una circolazione marina con associati gradienti di temperatura sensibilmente più deboli rispetto a quelli oceanici. Queste caratteristiche limitano le fonti energetiche disponibili nel Mediterraneo alle correnti di marea, alle onde, e alla differenza di salinità. Il possibile sfruttamento di queste potenzialità, tuttavia, è strettamente legato a una conoscenza dettagliata della velocità delle correnti, dell'altezza delle onde, e dall'intensità delle maree. Le mappe che descrivono le correnti marine disponibili per il Mar Mediterraneo, e i mari italiani in particolare, sono state realizzate interpolando spazialmente i dati speri-

mentali ottenuti dalle decine di campagne oceanografiche che si sono succedute negli ultimi quaranta anni. Nonostante la grossa mole di dati utilizzati, il risultato finale non può essere considerato sufficiente ai fini della valutazione del potenziale energetico delle correnti di marea anche a causa della disomogeneità spaziale e della discontinuità temporale dei dati raccolti. Un discorso analogo vale per la stima dell'energia associata al moto ondoso dei mari italiani. Ad oggi il potenziale energetico è valutato mediante dati registrati dalle 15 boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) attiva dal 1989 e gestita dal Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). I dati ottenuti dall'analisi delle boe RON, nonostante costituiscano una fonte insostituibile di informazioni, non forniscono una copertura spaziale adeguata per l'individuazione dei siti costieri adatti all'estrazione dell'energia ondosa. Di contro, gli attuali modelli numerici hanno raggiunto un elevato livello di complessità, tale da renderli lo strumento più idoneo alla descrizione dettagliata della circolazione marina e del moto ondoso. Uno dei vantaggi più evidenti legati allo sviluppo di modelli numerici per la simulazione delle correnti marine e il moto ondoso è rappresentato dalla possibilità di valutare in anticipo, e con un discreto grado di affidabilità, l'energia teorica disponibile nel sito in cui si è deciso di installare un dispositivo di conversione. La possibilità di valutare l'energia teorica disponibile nel sito anche per il pros-

scorso analogo vale per la stima dell'energia associata al moto ondoso dei mari italiani. Ad oggi il potenziale energetico è valutato mediante dati registrati dalle 15 boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) attiva dal 1989 e gestita dal Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). I dati ottenuti dall'analisi delle boe RON, nonostante costituiscano una fonte insostituibile di informazioni, non forniscono una copertura spaziale adeguata per l'individuazione dei siti costieri adatti all'estrazione dell'energia ondosa. Di contro, gli attuali modelli numerici hanno raggiunto un elevato livello di complessità, tale da renderli lo strumento più idoneo alla descrizione dettagliata della circolazione marina e del moto ondoso. Uno dei vantaggi più evidenti legati allo sviluppo di modelli numerici per la simulazione delle correnti marine e il moto ondoso è rappresentato dalla possibilità di valutare in anticipo, e con un discreto grado di affidabilità, l'energia teorica disponibile nel sito in cui si è deciso di installare un dispositivo di conversione. La possibilità di valutare l'energia teorica disponibile nel sito anche per il pros-



simo futuro, secondo gli scenari climatici per esempio suggeriti dall'IPCC, costituisce un ulteriore vantaggio.

Obiettivi

L'attività di ricerca del presente progetto mira a quantificare l'energia che può essere immessa nella rete elettrica, ricavabile da convertitori del moto ondoso e correnti marine in siti specifici della costa italiana. La valutazione si basa sull'uso integrato di modelli oceanografici e idrodinamici.

Il raggiungimento dell'obiettivo richiede lo sviluppo di modelli di circolazione marina e del moto ondoso per simulare il tipico clima d'onda e correnti presente lungo le aree costiere italiane. I dati così ottenuti servono da condizioni al contorno per i modelli numerici che riproducono il funzionamento dei diversi dispositivi di conversione più adatti ai mari italiani.

L'obiettivo finale dell'attività è la produzione di mappe di indicatori del potenziale energetico marino a diversa risoluzione spaziale, dai 7 km fino a poche centinaia di metri per i siti costieri italiani che risulteranno caratterizzati da un potenziale energetico significativo.

Per questi ultimi sarà inoltre valutata la reale quantità di energia estraibile in funzione delle diverse tecnologie di sfruttamento utilizzabili. Infine, i dati ottenuti saranno

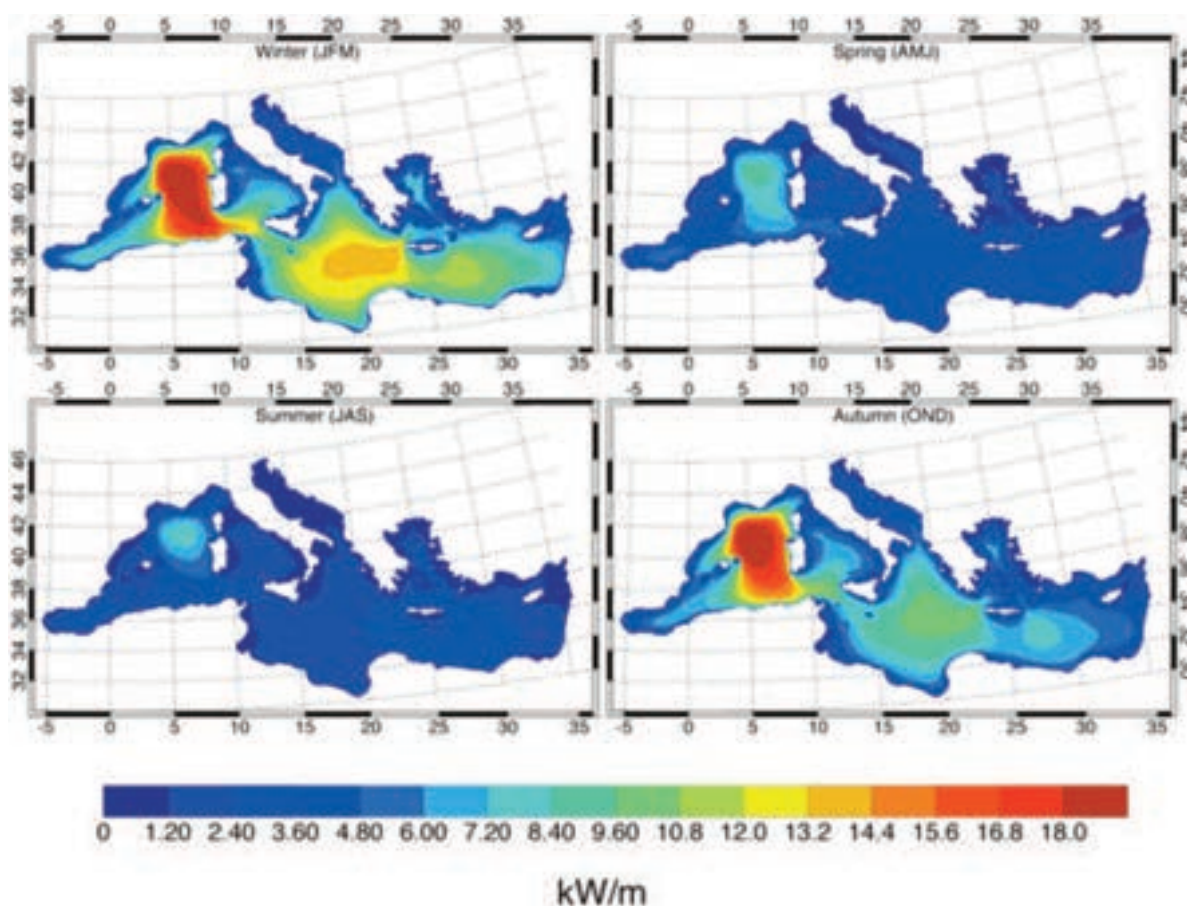
integrati in un sistema GIS che fornirà inoltre dettagli sulle infrastrutture potenzialmente interessate (porti, reti energetiche etc) e sui parametri ambientali di interesse.

Risultati

Nel corso del presente progetto è stato prodotto un data-base dell'energia del moto ondoso per l'intera area del Mediterraneo. Il data-base inserito in un GIS ricostruisce l'andamento dell'energia durante gli ultimi 10 anni con una risoluzione spaziale di circa 7 km, equivalenti cioè a circa 200 boe distribuite lungo tutte le coste italiane.

Le simulazioni sono state condotte con il modello denominato WAM (WAVE Model). Il WAM è un modello che descrive l'evoluzione dello spettro delle onde del mare risolvendo le equazioni del trasporto dell'energia. Lo spettro delle onde è modificato localmente da una funzione sorgente che rappresenta l'energia di input dovuta al vento, la ridistribuzione dell'energia dovuta alle interazioni non lineari e la dissipazione dell'energia dovuta alla rottura delle onde e agli attriti sul fondo.

In particolare, per quanto interessa le coste italiane, i valori più elevati sono presenti, nel corso dei mesi autunnali e invernali, lungo tutta la costa occidentale della Sardegna e la costa sud-ovest della Sicilia.



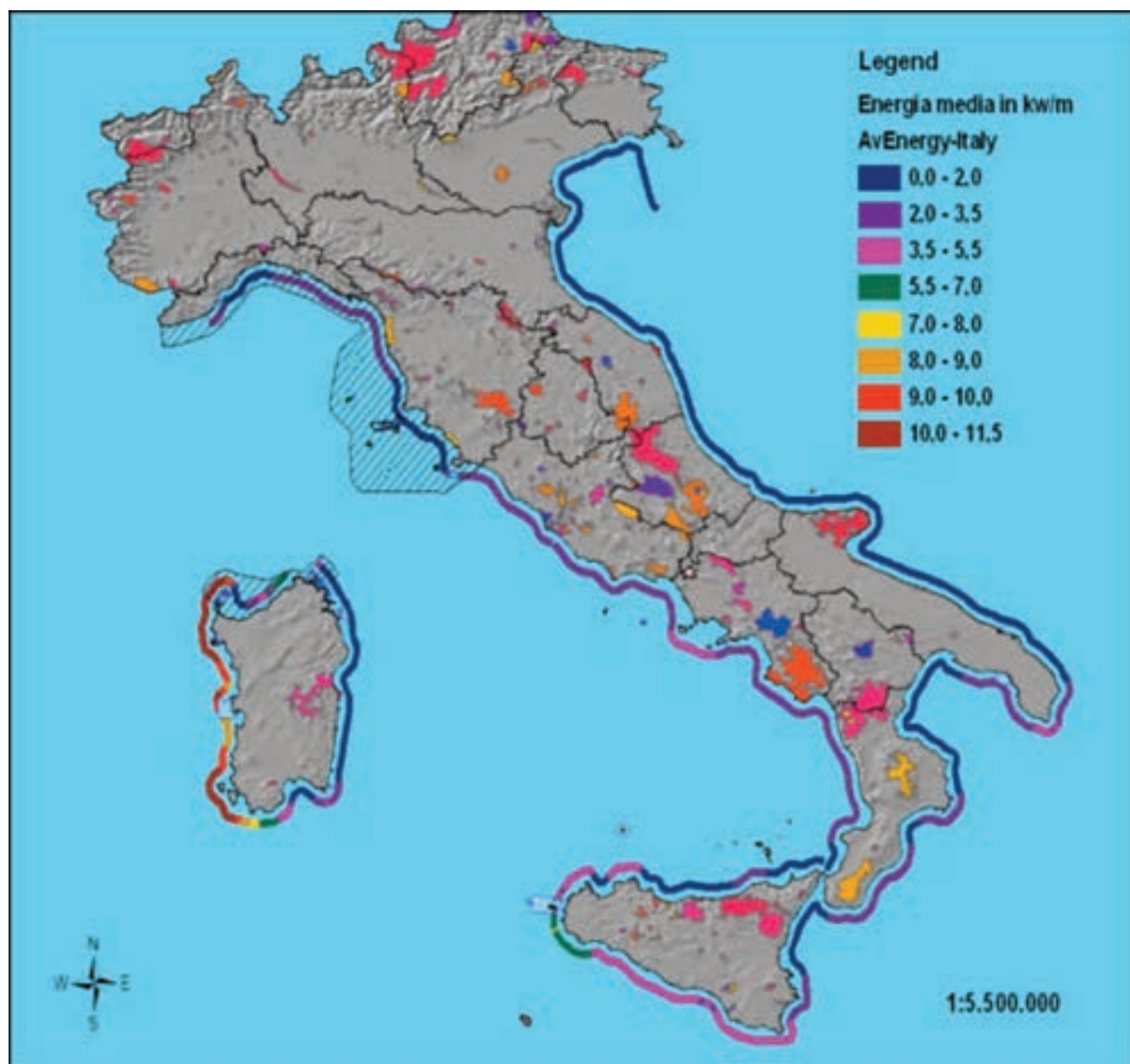
Mappe di potenziale energetico (in kW/m) calcolate dai dati del modello WAM. I valori riportati si riferiscono alla media stagionale calcolata per l'intervallo 2001-2010

Vale la pena sottolineare che la costruzione di mappe permette di stimare i valori del potenziale in tutto il dominio di calcolo; è possibile quindi ottenere valutazioni utili anche in zone isolate quali piccole isole. Ad esempio dall'analisi risulta che l'area caratterizzata dai valori più alti di potenziale energetico si estende all'interno del canale di Sicilia, potrebbe perciò essere interessante una stima più accurata per l'isola di Pantelleria.

Per evidenziare i risultati per la costa italiana, i valori del potenziale energetico sono stati estratti lungo la fascia costiera italiana (circa 12 km dalla costa).

I risultati ottenuti hanno mostrato differenze signifi-

cative del potenziale energetico ondoso in aree limitrofe. Le correnti di marea rappresentano la risposta barotropica delle masse d'acqua marine alle fluttuazioni della superficie del mare dovuta alle maree. Le correnti di marea sono quindi movimenti orizzontali di acqua che risentono fortemente della variazione di profondità del fondo marino, e per questo motivo si intensificano negli stretti e canali. Per questa loro caratteristica le correnti di marea, di intensità sufficiente per essere convertite in energia elettrica, sono localizzate in poche regioni della superficie terrestre. In Europa, il potenziale energetico delle correnti di marea è limitato a pochi Paesi: Scozia, Irlanda, Grecia, Francia e Italia. In Italia le regioni più

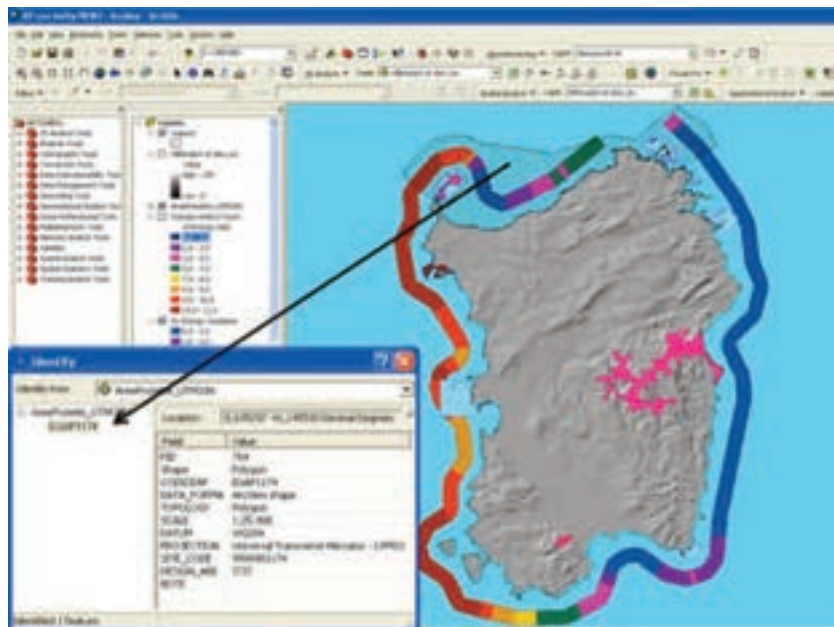


Rappresentazione GIS della mappa dell'energia media annuale del moto ondoso disponibile lungo le coste italiane calcolata per il periodo 2001-2010

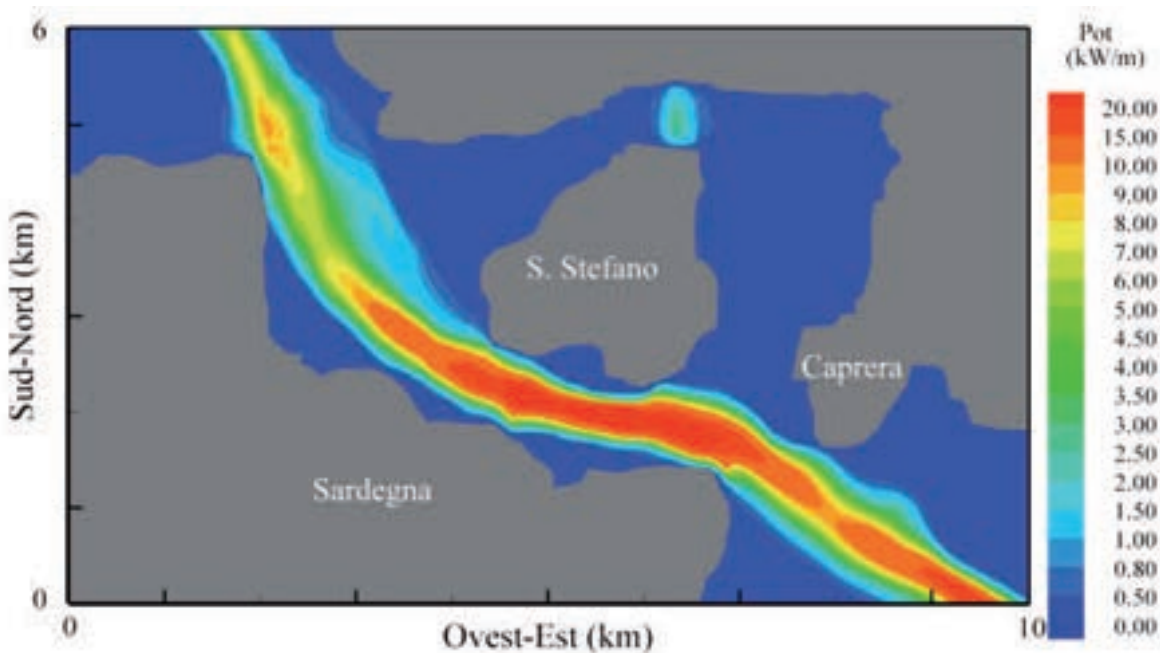
interessanti in termini di correnti di marea sono lo stretto di Messina, la laguna di Venezia, il canale di Sicilia e le Bocche di Bonifacio in Sardegna.

In questo progetto è stato messo a punto un modello numerico di circolazione marina che simula le maree dell'intero bacino mediterraneo ad una risoluzione orizzontale di 7 km. I dati ottenuti da questo modello sono stati utilizzati come condizioni al contorno per la simulazione a più alta risoluzione spaziale (90 m) del Canale di Bonificaio. È stata calcolata la media mensile della potenza della corrente, integrata lungo la colonna d'acqua (kW/m), per il periodo Gennaio-Novembre 2009. In tutti i mesi analizzati la regione del massimo interesse il tratto compreso tra Punta Sardegna e Capo D'Orso, con particolare riferimento alla regione localizzata a sud dell'isola di S. Stefano (20 kW/m).

Infine è stata svolta un'attività che ha riguardato la descrizione delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento dell'energia da onda e corrente con particolare riferimento alle tecnologie che meglio si adattano ai siti costieri italiani.



Rappresentazione GIS: particolare della Sardegna con le aree protette terrestri e marine



Mappa della potenza media della corrente calcolata per le Bocche di Bonifacio

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

Progetto 2.1.5: Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

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

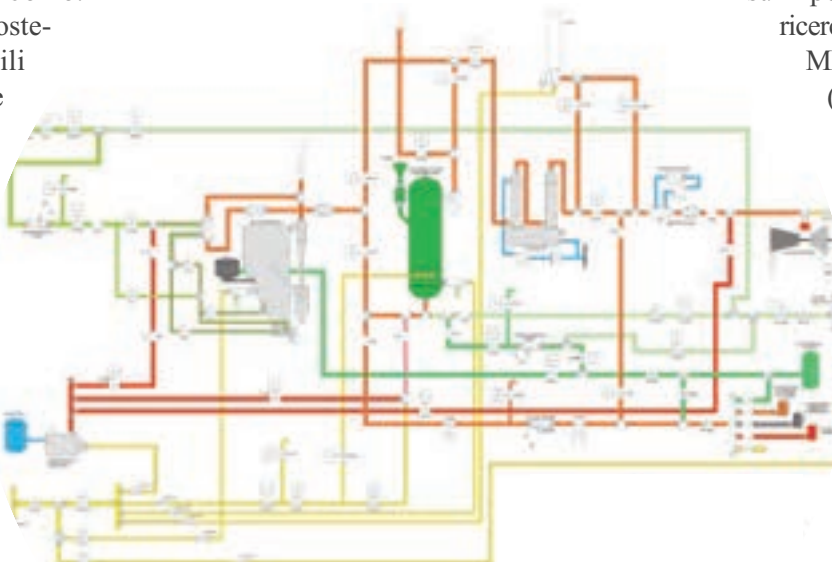


Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂

Scenario di riferimento

L'impossibilità di sostituire, almeno per qualche decennio, quote significative di combustibili fossili con fonti alternative a basse o nulle emissioni, rende necessario adottare soluzioni che limitino l'impatto conseguente al loro utilizzo, e siano compatibili con gli obiettivi di contenere le alterazioni climatiche. Queste considerazioni valgono in particolare per il carbone che è il principale combustibile impiegato a livello mondiale per la produzione di energia elettrica, e allo stesso tempo quello a maggiore intensità di carbonio.

L'obiettivo di un uso sostenibile dei combustibili fossili e in particolare del carbone, di cui è nota l'abbondanza ed economicità, può essere perseguito puntando al miglioramento dell'efficienza energetica, legata all'innovazione dei cicli termodinamici e all'utilizzo di materiali innovativi, e in particolare allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie CCS (Carbon Capture and Storage) in grado di catturare la CO₂ e confinarla in maniera definitiva senza immetterla in atmosfera e senza rischi futuri per l'ambiente. Tali obiettivi risultano credibili e praticabili, grazie alle nuove tecnologie già oggi disponibili e alle prospettive offerte dalla ricerca e sviluppo, e in tale ambito l'ENEA è da tempo impegnato con importanti iniziative di ricerca e dimostrazione.



Obiettivi

Obiettivo finale di tale programma di attività è quello di favorire lo sviluppo di tecnologie avanzate per un utilizzo pulito dei combustibili fossili e del carbone in particolare, supportando la realizzazione di impianti dimostrativi con l'ambizione di contribuire al superamento delle principali problematiche legate alla penalizzazione, in termini di costo e di rendimento, che lo stato attuale delle tecnologie CCS implicano

nelle applicazioni energetiche. A tal fine le attività vengono condotte su importanti infrastrutture di ricerca di ENEA (ZECOMIX) e di SOTACARBO (COHYEXCE), inserite nella roadmap italiana delle Infrastrutture di Ricerca di interesse paneuropeo, dislocate rispettivamente presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA e presso il Centro Ricerche Sotacarbo in Sardegna. I principali obiettivi riguardano:

- a. Definizione e messa a punto delle migliori tecnologie per produrre un syngas idoneo, sia come composizione che come pulizia, ai successivi processi di trasformazione in combustibili liquidi o gassosi;
- b. Studio e ottimizzazione dei processi di produzione di combustibili liquidi da carbone (CTL -Coal To Liquid);
- c. Sviluppo di tecnologie "pre-combustion" basate sull'uso di sorbenti solidi ad alta temperatura;
- d. Ottimizzazione di tecnologie ossicombustione in condizioni atmosferiche e pressurizzate ;
- e. Sviluppo di tecnologie "post-combustion" basate su ammine;

- f. Attività progettuale per il dimensionamento di un impianto dimostrativo che preveda la cattura e il sequestro della CO₂ in sito idoneo;
- g. Valorizzazione della CO₂.

Risultati

Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

Le attività hanno riguardato l'ottimizzazione di processi e apparecchiature per la gassificazione del carbone a letto fisso e di sensoristica innovativa per la diagnostica e il controllo. Attività sperimentali sono state condotte su impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo e presso il C.R. ENEA Casaccia, operando con diversi agenti gassificanti e in diverse condizioni di funzionamento. Sono stati acquisiti dati e competenze sui processi di cleaning del syngas da gassificazione (lavaggio, desolforazione e separazione di polveri e tar). Gli impianti Sotacarbo sono stati inoltre utilizzati per effettuare test di produzione di energia elettrica. È stato sviluppato e validato un codice per la simulazione del processo di gassificazione utilizzando dati sperimentali provenienti dall'impianto di gassificazione a letto fisso (GESSICA) di ENEA.

Processi avanzati di gassificazione/pirolisi per il clearing di syngas

Sono state approfondite le conoscenze sui processi di devolatilizzazione e pirolisi applicati a tipologie di carbone di basso rango, finalizzate alla messa a punto di un processo innovativo di produzione di syngas pulito e di char a basso contenuto di zolfo. L'attività di laboratorio, effettuata variando i principali parametri operativi dei processi, ha permesso la caratterizzazione sia dei prodotti gassosi che del solido residuo (char e ceneri). È stata valutata la possibilità di utilizzare un sorbente a base di dolomite come catalizzatore delle reazioni sul tar e come assorbitore di CO₂ e di composti solforati (H₂S). La caratterizzazione delle ceneri ha fornito informazioni utili a valutare il loro possibile utilizzo in processi di carbonatazione minerale.

Produzione di combustibili liquidi da carbone (Coal To Liquid)

È stata definita la configurazione impiantistica, la taglia e la tecnologia più idonea per la realizzazione di un impianto per produzione di combustibili liquidi anche da carboni di basso rango (elevato contenuto di zolfo e tar). L'ana-



Piattaforma Pilota Sotacarbo



Piattaforma sperimentale ZECOMIX

lisi di sistema ha riguardato sia la taglia di un impianto dimostrativo, che a quella per l'integrazione con la piattaforma sperimentale di Sotacarbo. Sono state condotte analisi di sensibilità con codicistica di sistema per individuare e dimensionare l'impianto. È stato condotto lo studio di prefattibilità tecnico-economica delle differenti configurazioni individuate. Attività sperimentali, a supporto dell'analisi di sistema, condotte su scala laboratorio, hanno riguardato lo studio del processo Fisher Tropsch, e le condizioni operative.

Cattura della CO₂ a elevata temperatura mediante sorbenti solidi a base di ossido di calcio

È stato messo a punto un sorbente solido della CO₂ ad alta efficienza e durata. È stato completato l'impianto sperimentale ZECOMIX, per prove di assorbimento della CO₂ e dell'H₂S dal syngas prodotto mediante gassificatore di carbone a letto fluido a ossigeno.

È stato allacciato il gassificatore a letto fluido a ossigeno, il reattore di decarbonatazione (carbonatatore), per testare il processo di produzione e la concomitante pulizia di un syngas a elevato contenuto di idrogeno e senza composti solforati, da mandare in turbina. Lo stesso sorbente, utilizzato per la cattura della CO₂, può essere utilmente impiegato per l'assorbimento dell'H₂S. A differenza dei sistemi di cattura con solventi, i sorbenti solidi, lavorando a temperature prossime a quelle di produzione del syngas, consentono configurazioni impiantistiche con minori perdite energetiche. Il sorbente solido utilizzato è a base di ossidi di calcio con l'aggiunta di opportuni inerti e catalizzatori. Esso mira a raggiungere un compromesso tra efficienza di assorbimento della CO₂ alla temperatura desiderata (500-700 °C) e durata del sorbente stesso (numero di cicli assorbimento /rigenerazione). L'aggiunta di opportuni additivi e una scelta ottimale della granulometria contribuisce a ritardare fenomeni di sinterizzazione che fanno diminuire la superficie utile per la diffusione della CO₂ all'interno del sorbente, e quindi aumentare il numero di cicli efficaci per il processo.

Processi di cattura della CO₂ con solventi

Sono state acquisite competenze in merito alla cattura della CO₂ da syngas con ammine. È stata effettuata una comparazione prestazionale tra ammine primarie, secondarie, terziarie e/o miscele, valutando l'influenza dei principali parametri di processo sull'efficienza di cattura. È stato analizzato il processo di rigenerazione termica dei solventi. In parallelo è stata sviluppata una modellistica specifica relativa all'impiego di diversi solventi. La finalità è quella di sviluppare modelli di supporto alle attività sperimentali.

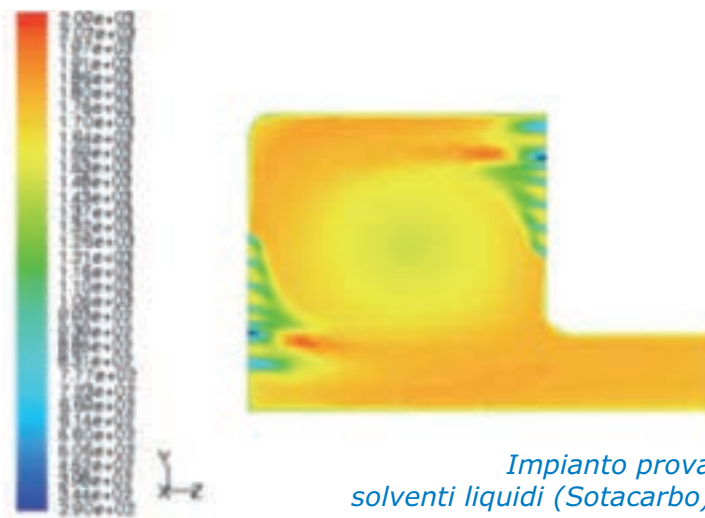


Impianto prova solventi liquidi (Sotacarbo)

Sviluppo di nuovi bruciatori avanzati per la combustione di syngas ricchi di idrogeno

È stato sviluppato un nuovo bruciatore avanzato per turbogas, di tipo "Trapped Vortex" per una combustione stabile, efficiente, e a basse emissioni di syngas ricchi di idrogeno, da impianti operanti in modalità "pre-combustion".

Tale bruciatore realizza condizioni di combustione estremamente innovative, con sostanziale assenza del fronte di fiamma (combustione Flamaless), ampliando grandemente il range operativo di combustione stabile rispetto agli attuali sistemi "lean-premix". L'attività ha visto una prima fase di analisi numerica attraverso la quale si è pervenuti al progetto che verrà realizzato e testato su impianti ENEA.



Impianto prova solventi liquidi (Sotacarbo)

Ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone

Sono stati sviluppati strumenti numerici per la simulazione non stazionaria di flussi multifase in dispositivi a ossi-combustione di interesse industriale. Gli sviluppi modellistici fisico-numerici sono stati finalizzati all'integrazione nel codice CFD-LES HeaRT di proprietà ENEA. Accanto allo sviluppo di modelli per la fisica delle miscele multifase sono state sviluppate tecniche numeriche atte a consentire tempi ragionevoli di simulazione. Queste tecniche sono state integrate nel codice HeaRT. Parallelamente alle attività di tipo numerico-informatico è stata sviluppata modellistica multi-fase, sulla base dei risultati di validazione ottenuti nell'anno precedente. Un'altra attività ha riguardato la cinetica chimica legata ai processi di volatilizzazione e ossidazione di carbone. È stato sviluppato un modello cinetico dettagliato, basato su un meccanismo a 59 specie e 70 reazioni. Contemporaneamente è stato sviluppato un modello cinetico semplificato, specifico per ciascun carbone, da integrare in codici CFD commerciali, con risultati sufficientemente accurati. Sono state condotte sperimentazioni sugli impianti IPFR e FOSPER di IFRF, al fine di ottenere dati sperimentali da utilizzare per la validazione dei modelli.

Tecnologie alternative di utilizzo e fissaggio della CO₂

È stato sviluppato e affinato il processo di metanazione. È stato allestito un apparato sperimentale per studi sulla resa finale della reazione, e sulla valutazione degli effetti di avvelenamento, da parte di composti solforati (SO₂ e H₂S), del catalizzatore di reazione. Parallelamente, è stato sviluppato un nuovo solvente per l'assorbimento della CO₂ in effluenti gassosi provenienti dai grossi impianti di combustione. Sono stati effettuati test del nuovo solvente brevettato, basato su resorcina in ambiente basico. La semplicità del processo di cattura rende tale metodo particolarmente adatto all'impiego ciclico (assorbimento e desorbimento della CO₂). I risultati su un sistema non ancora ottimizzato, mostrano prestazioni incoraggianti per il futuro.

Pre-fattibilità di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO₂

È stato realizzato uno studio relativo alla realizzazione e gestione di un impianto dimostrativo di produzione di energia da carbone, con contemporanea cattura e stoccaggio della CO₂ prodotta, con confinamento geologico

in un idoneo sito localizzato nel bacino del Sulcis. In tale ambito è stata condotta un'importante attività di sperimentazione e ottimizzazione della relativa rete di monitoraggio geochimico. Oltre all'inquadramento del progetto nello specifico bacino minerario, si è proceduto all'aggiornamento del quadro normativo relativo alla produzione e distribuzione di energia elettrica. Sulla base delle tecnologie disponibili, è stata operata la scelta tecnica relativa alla tipologia di impianto più idonea. Sono state condotte analisi e valutazioni economico-finanziarie relative all'investimento.

Comunicazione e diffusione dei risultati

Sono state realizzate azioni di promozione dei risultati ottenuti nel campo delle tecnologie CCS e CCT, organizzando convegni, e partecipando a gruppi di lavoro a supporto dei Ministeri. Tra questi ultimi: il Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), la piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), i gruppi di lavoro dell'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center" e la European Energy Research Alliance (EERA) nell'ambito del Joint Program su CCS.



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

Progetto 2.2: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂

Referente: : A. Calabrò, antonio.calabro@enea.it

AREA

RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA



Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi

Scenario di riferimento

Il Piano di Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica intende mobilitare la società civile, i responsabili politici e gli operatori del mercato per trasformare il mercato interno dell'energia, in modo da fornire ai cittadini infrastrutture, prodotti, processi e servizi energetici che siano globalmente i più efficienti sul piano energetico.

Il Piano mette in luce l'importanza di applicare norme minime di rendimento energetico ad un ampio ventaglio di apparecchiature e prodotti (dagli elettrodomestici come i frigoriferi e i condizionatori, televisori, scaldacqua ecc., fino ai motori e agli inverter industriali), per gli edifici e per i servizi energetici. In questo contesto verranno proseguite le attività per l'adeguamento della normativa nazionale alla legislazione europea in merito a requisiti minimi (Eco-Design) ed etichettatura. Un importante ruolo è assegnato alla promozione dell'autoproduzione di energia nel settore terziario e dei servizi, al fine di rimuovere ostacoli e barriere frapposti all'estensione del mercato, anche attraverso l'analisi di meccanismi di incentivazione normativi ed economici.

Un altro aspetto cruciale riguarda lo sviluppo di strumenti e servizi per l'efficienza energetica con il duplice scopo di contribuire a ridurre i consumi aggiungendo "intelligenza" a sistemi complessi (sistemi di controllo per ecobuildings, reti attive di distribuzione, integrazione di sistemi di produzione di energia basati su fonti rinnovabili) oltretutto sui singoli componenti, consentendo di ottimizzare le operazioni nell'ottica di un mi-

nore consumo.

In tale contesto le politiche centrate sullo stimolo della domanda hanno elevato considerevolmente il livello d'informazione sulle singole tecnologie e la disponibilità di normative forzanti o incentivanti, rendendo economicamente attraente il ricorso alle tecnologie efficienti e all'integrazione delle fonti rinnovabili.

Obiettivi

L'obiettivo finale dell'attività consiste nella realizzazione di strumenti e metodi per la promozione di tecnologie ad alta efficienza energetica allo scopo di favorire il mercato di prodotti più performanti, sia a livello di componenti che consumano energia, sia a livello di sistemi che la producono. Indispensabile è anche l'integrazione e la gestione ottimale di tali tecnologie in un contesto territoriale circoscritto, per mezzo di una configurazione di rete secondo il modello di generazione distribuita orientata al settore dei servizi.

Tali obiettivi prevedono un programma articolato di azioni sinergiche tra cui: la definizione di requisiti minimi, come l'etichettatura energetica e la direttiva Eco-Design, per spingere i produttori a migliorare i propri apparecchi; lo sviluppo e la dimostrazione di nuove soluzioni e architetture di impianto in contesti territoriali localizzati con forte componenti di autoproduzione di energia e fonti rinnovabili; la creazione di meccanismi di promozione per la diffusione di interventi di riqualificazione energetica; l'implementazione di strumenti



software che diano all'utente la possibilità di effettuare realmente le simulazione di sistemi tecnologicamente avanzati.

Risultati

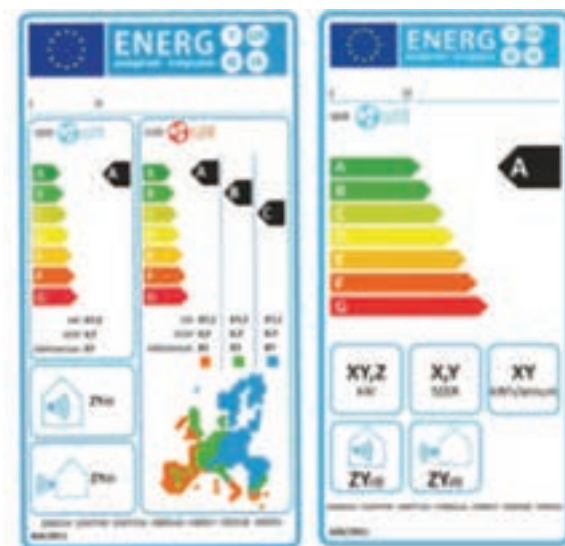
Sviluppo di specifiche per la progettazione ecocompatibile: promozione della nuova etichetta energetica

ENEA ha partecipato alla discussione fra gli Stati Membri e la Commissione, in seno al Comitato di Gestione e al Consultation Forum delle direttive quadro Ecodesign (2009/125/EC), Etichettatura (2010/30/EU), Edifici (2010/31/EU) e del programma Energy Star (dove il nuovo Accordo Internazionale con gli USA è in preparazione per le apparecchiature per ufficio) per la definizione dei requisiti minimi di efficienza energetica ed eco-progettazione e delle etichette energetiche dei prodotti relativi all'energia (beni e servizi che consumano energia nella fase d'uso o che hanno influenza sul consumo di energia quando installati), sia del settore domestico che di quello commerciale (frigoriferi commerciali).

Sono state discusse le proposte di etichettatura e requisiti di ecodesign per le cappe aspiranti, gli apparecchi di condizionamento (condizionatori) e gli apparecchi e impianti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale (scalda-acqua e boiler).

ENEA si è attivata con i produttori nazionali di cappe per raccogliere i dati necessari a supportare una proposta che prevede la definizione di requisiti di efficienza energetica basati su uno specifico algoritmo di calcolo dell'Indice di Efficienza Energetica definito ad hoc solo per le cappe e che tenesse conto del consumo annuo di energia. Lo stesso algoritmo è utilizzato anche per definire le classi di efficienza energetica della nuova etichetta. Per quanto riguarda gli apparecchi di condizionamento (condizionatori) la proposta di requisiti minimi di Ecodesign è stata positivamente votata dagli Stati Membri il 31 maggio 2011 (ed è ora in fase di approvazione finale da parte di Parlamento e Consiglio) mentre il Regolamento sull'etichetta energetica (Regolamento delegato 626/2011/UE) è stato pubblicato nel luglio 2011.

Allo scopo di diffondere l'impiego di "acquisti pubblici verdi", ENEA ha seguito la realizzazione di quattro progetti pilota relativamente ad impianti di illuminazione, presso la sede centrale di Roma e due sviluppati presso i comuni di Ottone (PC) e Marcallo con Casone (MI). I criteri alla base della scelta dei prodotti coinvolti nei progetti sono stati derivati per quanto possibile dai requisiti di eco progettazione e dall'etichettatura energetica. Le attività inoltre si sono focalizzate sulla campagna di informazione del nuovo schema di etichettatura energetica, ovvero la descrizione delle caratteristiche e la



Nuove etichette per i condizionatori (reversibili e non)

spiegazione del ruolo che tale etichettatura gioca per il miglioramento dell'efficienza energetica dei prodotti a livello nazionale in sinergia con i requisiti di ecodesign.

Implementazione e controllo dell'etichettatura energetica e dei requisiti Ecodesign

Le misure di implementazione definite nell'ambito delle Direttive Quadro 'Ecodesign' ed 'Etichettatura Energetica' prevedono che gli Stati Membri debbano svolgere azioni di sorveglianza del mercato ovvero effettuare verifiche di conformità dei prodotti alla suddetta legislazione avvalendosi di Laboratori in grado di svolgere tali tipi di verifiche.

ENEA, ha supportato la creazione di una rete di laboratori sul territorio nazionale che rispondono (o si sono impegnati ad adeguarsi rapidamente) a requisiti di affidabilità e capacità di prova, ed è stata avviata una attività di comunicazione dei criteri/protocolli.

I laboratori hanno fornito contributi attivi per l'implementazione del Network con suggerimenti sull'opportunità di organizzare ring test, definire le modalità di prelievo a campione dei prodotti da testare, identificare un format condiviso per i report dei risultati delle prove e sulla formazione del personale. Al fine di consolidare i contatti sono state organizzate visite ENEA ai laboratori del Network.

L'attenzione si è concentrata sugli apparecchi del lavaggio (lavatrici e lavastoviglie) che sono il secondo più importante gruppo di apparecchi domestici impiegati nel settore residenziale.

Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi

Le attività si sono focalizzate sullo studio e l'analisi di strumenti e meccanismi di incentivazione atti ad agevolare la promozione degli interventi di efficientamento energetico.

È stato condotto uno studio sull'impatto dei Certificati Bianchi (o Titoli di Efficienza energetica -TEE) che ha evidenziato alcune criticità, nonostante il successo dell'iniziativa dimostrato dagli 8 Mtep risparmiati dall'entrata in vigore del meccanismo.

Lo studio ha evidenziato come il meccanismo abbia influito sul mercato, quali stimoli abbia dato nei vari settori e, poiché la maggior parte dei risparmi sono riscontrabili nel settore civile, si vuole capire come possa essere coinvolto in maniera più attiva il settore industriale.

Il sistema presenta ancora difficoltà per le quali sono state elaborate delle proposte di soluzione che potrebbero dare una nuova spinta al meccanismo e aprire la strada a settori che non si sono ancora interessati al sistema.

Allo scopo di creare strumenti di promozione della riqualificazione energetica dei settori economici, è stato condotto un studio sui fondi garanzia, uno strumento complesso nella sua predisposizione e gestione, ma che ha il vantaggio di poter essere rotativo, garantendo una continuità temporale, e di essere più efficace, in quanto il coinvolgimento iniziale degli istituti di credito facilita l'accesso ai finanziamenti e dunque favorisce gli investimenti.

Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio-impianto in un contesto di rete complessa

La promozione di tecnologie efficienti per la climatizzazione degli edifici è un elemento cruciale per il raggiungimento degli obiettivi nazionali ed europei di



Interfaccia della piattaforma ODESSE per la scelta dei layout preconfigurati

riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂. Spesso, la diffusione nel mercato è ostacolata dalla mancanza di strumenti a disposizione dei professionisti del settore per semplificare la progettazione di tecnologie efficienti complesse e non ancora ben conosciute. Sono stati a tal fine integrati nel software ODESSE (Optimal DESign for Smart Energy) un certo numero di layout di impianto preconfigurati, caratterizzati da mix energetici complessi e soluzioni tecnologicamente avanzate.

In particolare sono stati sviluppati e integrati i seguenti layout di impianto:

- sistema tradizionale pompa di calore elettrica e caldaia (tradizionale e condensazione);
- sistema co-trigenerativo con motore a combustione interna di piccola taglia e microturbina;
- sistema Dessiccant cooling classico integrato con motore a combustione interna per la rigenerazione della ruota entalpica;
- sistema ibrido: prevede l'integrazione di fonti rinnovabili con le tecnologie tradizionali: generazione elettrica da fotovoltaico, generazione termica da collettore solare, integrati con pompe di calore elettriche e caldaia a gas di backup per la produzione di ACS;
- sistema di solar cooling con gruppo frigo ad assorbitore a bromuro di litio e collettori solari sottovuoto.

Per ciascun layout è stato sviluppato un proprio sistema di controllo che determina l'accensione, lo spegnimento e la regolazione dei principali componenti secondo logiche che normalmente caratterizzano gli impianti reali. ODESSE si candida così ad essere non solo un software per la valutazione rapida di mix energetici innovativi, ma anche uno strumento di divulgazione tecnica di soluzioni impiantistiche che non trovano ancora nel mercato un unico referente per la commercializzazione



e che necessitano quindi di una figura capace di metterle a sistema (es. il solar cooling, il DEC sia in configurazione solare sia in configurazione ibrida, sistemi trigenerativi ecc.).

È stato affrontato lo studio tecnico-economico di soluzioni sperimentali per il monitoraggio in rete dei consumi elettrici, nel settore terziario, e lo sviluppo di metodologie per il loro contenimento, attraverso modelli di simulazione per l'attuazione di strategie di controllo e ottimizzazione dei flussi energetici, provenienti anche da fonti non programmabili, in un contesto di distretto energetico in modo da integrare l'energia prodotta localmente senza causare criticità, per la valorizzazione del modello di generazione distribuita dell'energia.

È stato applicato un algoritmo di controllo progettato per l'ottimizzazione dei set point dei generatori all'interno di una microrete.

La soluzione proposta tiene conto dell'incertezza legata alla previsione tanto dei prelievi da parte degli utenti quanto delle grandezze meteorologiche su un orizzonte temporale di diverse ore. La sperimentazione si è svolta facendo riferimento a due sistemi elettrici di test: la rete di distribuzione dell'area denominata "La Capanna" del Centro Ricerca ENEA di Casaccia (Roma) e il sistema di alimentazione della Test Facility di Generazione Distribuita di RSE SpA (Milano).

Comunicazione e diffusione dei risultati

I risultati relativi a tutti gli argomenti studiati sono stati diffusi attraverso la produzione di materiale informativo, l'organizzazione di workshop e seminari tematici e la partecipazione a workshop organizzati da altri soggetti.

La promozione dell'attività della rete dei laboratori è stata avviata sul sito web della sede ENEA di Ispra, e veicolata tramite la creazione di uno specifico logo e di un pannello espositivo per gli eventi.

Nell'ambito della campagna di comunicazione e diffusione della nuova etichetta energetica e degli acquisti verdi (green procurement) sono state realizzate numerose iniziative.



Esempio di una campagna di comunicazione e diffusione della nuova etichetta energetica



Logo della rete dei laboratori qualificati

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

Progetto 3.1: Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi

Referente: : I. Bertini – ilaria.bertini@enea.it



Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica

Scenario di riferimento

L'illuminazione pubblica è uno dei settori su cui agire per raggiungere gli obiettivi del Piano d'Azione per l'Efficienza energetica in Italia, e per contribuire agli obiettivi "20-20-20" a livello europeo.

L'innovazione di prodotto sta orientandosi decisamente verso tecnologie a stato solido (LED e OLED), il cui vantaggio non è tanto in termini di efficienza energetica intrinseca dei singoli componenti base,

quanto nella versatilità per produrre dispositivi orientati all'applicazione e quindi, in molti casi,

competitivi con le migliori tecnologie tradizionali.

È sempre più sentita

l'esigenza di una visione di sistema, per affiancare alle tec-

nologie più efficienti la gestione intelligente dell'impianto che

permette risparmi potenziali signifi-

cativi e tempi di ritorno degli inve-

stimenti accettabili.

Inoltre l'illuminazione pubblica, se orien-

tata verso specifiche tecnologie (Power Line

Communication a banda larga)

rappresenta una grande opportunità in quanto si propone come la tec-

nologia abilitante (in quanto permette l'integrazione di molte altre funzionalità) per città so-

stenibili (smart cities) su cui il SETPlan europeo ha deciso investimenti massicci per i prossimi anni.

Obiettivi

Le attività riguardano l'insieme di strumenti per la razionalizzazione e il risparmio nell'uso dell'energia elettrica in illuminazione pubblica, da concretizzare in situazioni pilota su scala reale e valorizzare attraverso

un piano di diffusione, discendono dalla ricerca dell'annualità precedente e aprono vie nuove (V. Ricerca di Sistema Elettrico su www.enea.it).

Nell'ambito delle finalità generali che caratterizzano lo scenario di riferimento l'obiettivo è quello di soddisfare le esigenze degli utenti finali, tramite le amministrazioni pubbliche, nel rispetto dell'ambiente e con un uso

razionale dell'energia. Gli elementi individuati per arrivare a questo obiettivo sono:

- Lo sviluppo di un nuovo sistema per il controllo completo della strada, "smart street", basato su rete di lampioni intelligenti.
- Lo sviluppo e la qualificazione di nuove tecnologie per l'illuminazione pubblica (LED e OLED) e valutazione delle criticità e opportunità di impiego.
- La sperimentazione/dimostrazione in scala reale in un paese pilota, la diffusione dei risultati e l'estrapolazione delle potenzialità a livello nazionale.
- L'avvio e il supporto, nel contesto del network Lumière, di un significativo numero di progetti di riqualificazione che abbiano come riferimento tecnologico la piattaforma tecnologica sviluppata.

Il caso pilota scelto rappresenta una realtà italiana tipica, replicabile: l'interesse dimostrato dal Network dei Comuni del progetto Lumière (www.progettolumiere.enea.it) ne è un esempio rilevante.

Il progetto può essere portato come esempio anche ai tavoli normativi e legislativi su efficienza energetica, comfort visivo, ecodesign, inquinamento luminoso ecc. e può



generare a tutti gli effetti un modello di illuminazione pubblica molto più integrato nella città. Questo grazie alle soluzioni tecnologiche scelte che candidano la rete a diventare la piattaforma tecnologica su cui aggregare molte più funzionalità quali monitoraggio del traffico e della qualità ambientale, dei consumi degli edifici e della valorizzazione del patrimonio urbano e culturale (smart cities). Il modello è quindi molto più competitivo e attraente e può rappresentare la chiave di volta per la diffusione capillare dell'efficienza energetica in questo settore.

Risultati

Sviluppo di un nuovo sistema per il controllo completo della strada, "smart street"

È stata sviluppata una metodologia di regolazione adattiva e automatica del flusso luminoso per massimizzare risparmi energetici e comfort. Il sistema si presta particolarmente per arterie veicolari o pedonali cittadine dove il consumo elettrico per l'illuminazione è molto significativo e la regolazione ha un ruolo critico nel salvare grandi quantità di energia. La metodologia è finalizzata alla realizzazione di un sistema intelligente per la regolazione adattiva punto-punto dell'illuminazione. Tra i passi principali si citano qui di seguito:

- Lo sviluppo di una metodologia di modellazione della domanda di illuminazione per arterie stradali, in termini di predizione dei flussi di traffico a breve termine. La metodologia è ispirata all'attuale fronte di ricerca dell'intelligenza artificiale, essenzialmente reti neurali, e utilizza diversi approcci. L'errore di predizione sui flussi di traffico è risultato minore dell'8%.
- Lo sviluppo di una metodologia di controllo adattivo del flusso luminoso in relazione alla richiesta dell'utenza; sono state impostate regole basate sulla fuzzy logic, per tradurre il flusso di traffico predetto in potenza di alimentazione delle lampade, rispettando i vincoli tecnologici e le normative stradali.
- La validazione della metodologia sviluppata su dati reali di flussi di traffico: sono stati usati dati provenienti dalla città di Terni sia per le metodologie predittive che per le regole di controllo. È in corso uno studio comparativo fra condizioni diverse: senza sistema di controllo, con controllo statico e con controllo adattivo, con valutazione dei risparmi energetici conseguiti.
- Una comparazione tecnico-economica dell'approccio tecnologico innovativo proposto da ENEA rispetto all'approccio di mercato più diffuso su una realtà urbana di medie dimensioni, per valutare efficacia e competitività della soluzione proposta e preparare le basi per la implementazione sulla rete IP di servizi smart. È stato effettuato un audit energetico sull'impianto di illuminazione pubblica a Castelnuovo Magra (provincia SP, 8200 ab., 868

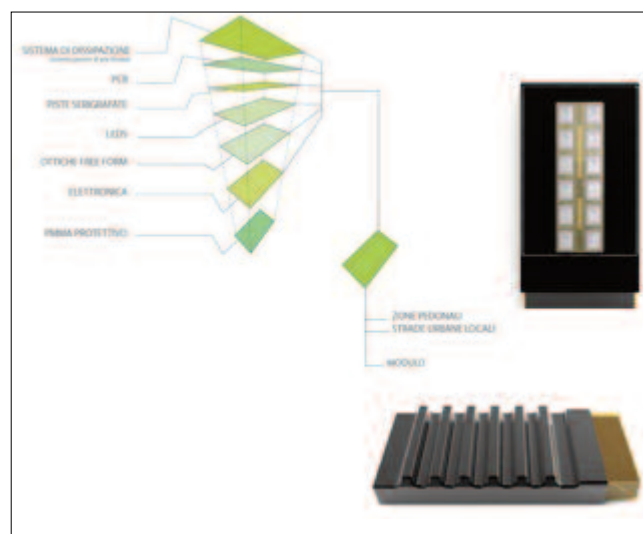
punti luce). Dall'audit è emerso che il risparmio energetico potenziale è dell'ordine del 31% (inclusa la sostituzione di lampade) con la regolazione di linea (approccio convenzionale di mercato). Introducendo la telegestione adattiva punto-punto (metodologia ENEA) il risparmio sale al 41%. I costi della manutenzione nel caso della metodologia ENEA diminuiscono del 49% a fronte del 38% della regolazione di linea. Il costo di investimento della metodologia ENEA ammonta a circa 270 k€, con un tempo di ritorno dell'investimento di circa 7 anni (contro i 5 anni della regolazione di linea) e VAN positivo finale di circa 230 k€ con un significativo incremento del livello di comfort e l'abilitazione dei servizi smart.

Sviluppo e qualificazione di nuove tecnologie per l'illuminazione pubblica (LED e OLED)

La ricerca sperimentale e la qualificazione sistemi di illuminazione innovativa ha esaminato molti aspetti, soprattutto legati alla tecnologia LED e alle sue caratteristiche spettrali e di affidabilità, dal punto di vista teorico e sperimentale. Parallelamente è stato analizzato l'indice di resa cromatica, oggi non più sufficiente proprio in funzione della diversa emissione di luce dei LED rispetto alle sorgenti tradizionali, e sono stati valutati nuovi indici. Sono stati svolte anche campagne sperimentali sul contrasto percepito.

Sono disponibili report tecnici su:

- Modello di affidabilità degli apparecchi a LED
- Distribuzione spettrale di sorgenti e apparecchi a LED
- Valutazione di impatto di illuminazione artificiale sull'ambiente
- Studi su indice di resa cromatica e contrasto e software relativo (presentato a Conferenza Nazionale Colore, Roma, settembre 2011)
- Studi e simulazioni in realtà virtuale



PLUS: schema funzionale e render

È stato progettato e realizzato un prototipo di apparecchio di illuminazione modulare a LED, con caratteristiche particolari anche in termini di design, chiamato PLUS.

Il concept del modulo e del sistema modulare si allontana completamente dal concetto di apparecchio monoblocco che ospita tutti gli elementi funzionali all'illuminazione (testa luminosa e componenti elettriche) all'interno di una scocca unica posta in testa al palo.

Il design del modulo e del sistema modulare prevede la distinzione in più componenti o blocchi logici funzionali del sistema di illuminazione ("design by components") per ottenere un sistema riconfigurabile, flessibile, facilmente manutenibile e con una forma funzionale estremamente nuova rispetto alla tradizione.



PLUS: una possibile configurazione

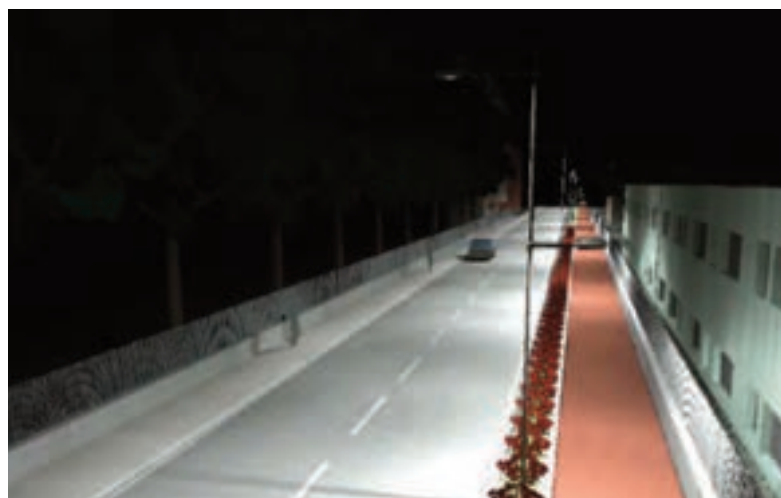
L'oggetto è più funzionale e più sostenibile perché composto da elementi facilmente disassemblabili e sostituibili separatamente (in base al proprio ciclo di vita), con un'estetica e una forma completamente autonomi rispetto al tradizionale apparecchio di illuminazione per esterni.

PLUS è quindi composto da blocchi logici funzionali che permettono, grazie alla ricombinazione delle parti e al design di un sistema aperto, diverse configurazioni e possibili applicazioni ed è già aperto a diventare un apparecchio "smart".

Sono proseguite le attività sperimentali su STAPELIA, apparecchio fotovoltaico a LED brevettato ENEA.



PLUS: prototipi realizzati



Il nuovo impianto di via Roma a Marcallo con Casone

Sperimentazione/dimostrazione in scala reale in un paese pilota

La sperimentazione/dimostrazione in scala reale si è svolta nel paese pilota di Marcallo con Casone (MI). In ottobre 2010 si è chiuso il bando per la progettazione e realizzazione di nuovi impianti di illuminazione in zone campione della città (piazza di pregio, parco, vie di traffico e rotonda). Dopo la valutazione delle proposte, il Comune ha deciso di realizzare l'impianto del tratto interno di via Roma, strada che porta da Magenta al centro storico di Marcallo. L'inizio lavori è settembre 2011.

Nello stesso Comune è proseguito il monitoraggio sugli impianti esistenti in zone campione. È stato eseguito il monitoraggio, con valutazioni circadiane, della sala Biblioteca Comunale, come esempio di interno pubblico.

È stata effettuata una campagna sperimentale per la valutazione della luce dispersa verso l'alto di diverse soluzioni tecnologiche applicate alla stessa situazione di illuminazione stradale.

Progetto Lumière

Il Progetto Lumière è dedicato alla diffusione dei risultati per la replicazione sul territorio della piattaforma tecnologica sviluppata, per facilitare e supportare le pubbliche amministrazioni nel programmare e realizzare interventi di efficientamento degli impianti d'illuminazione pubblica e nell'acquisire maggiore consapevolezza e competenza nella gestione energetica del territorio, attraverso un modello d'illuminazione pubblica efficiente.

Quattro diversi pool operativi, costituiti da soggetti pubblici e privati, collaborano gratuitamente e volontariamente per promuovere l'efficienza energetica nell'illuminazione pubblica: Network dei Comuni, Network delle Esco, Produttori delle tecnologie, Promotori della Sostenibilità.

Si è definita una metodologia per intervenire in modo costruttivo e operativo sul territorio, per coinvolgere le amministrazioni sia nell'individuare lacune e ostacoli riscontrati sia nell'elaborare proposte risolutive, siano esse tecnologiche, economiche, sociali ecc.

Il sito del Progetto (www.progettolumiere.enea.it) è il punto di confluenza tra l'attività di Ricerca e quella di trasferimento e applicazione dei risultati conseguiti nel settore e tra le competenze tecnico-scientifiche e le pro-

blematiche connesse alle esigenze e difficoltà delle realtà applicative.

Sono state pubblicate le Linee guida economico-finanziarie per la realizzazione d'interventi di riqualificazione energetica degli impianti d'illuminazione pubblica a supporto dei pubblici amministratori. Le Linee guida possono costituire un percorso standardizzato di riferimento per la gestione energetica del territorio, oppure un punto di partenza per acquisire maggiore competenza e consapevolezza.

È stato elaborato un modello sperimentale di audit energetico, preludio alla progettazione di interventi di riqualificazione energetica tesi al miglior risultato conseguibile in termini di efficienza. L'audit dovrebbe anche garantire il rispetto dei tempi di rientro degli investimenti ipotizzati, grazie alla valutazione puntuale dell'impianto e dei risparmi energetici potenziali.

Con questo modello si stanno svolgendo audit energetici gratuiti presso Comuni del Network, ad opera delle Esco del Network.

Sono stati organizzati Workshop di trasferimento dei risultati del Progetto ai Comuni e presentazioni su invito di istituzioni e associazioni di settore.

Si è iniziato a impostare il percorso verso la trasformazione dei Comuni in città smart.



Illuminazione notturna del Comune di Vernazza

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

Progetto 3.2: Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica

Referente: S. Fumagalli, simonetta.fumagalli@enea.it



Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Scenario di riferimento

L'evoluzione dei consumi energetici degli edifici italiani mostra un evidente aumento dei consumi elettrici, prevalentemente imputabile alla maggior richiesta di condizionamento estivo. Le recenti normative europee sull'efficienza energetica degli edifici, in particolare le direttive 2002/91/CE, 32/2006/CE, 31/2010/CE, il PAN 2011, il PAEE 2011 e i Dlgs di recepimento 192/05 e s.m.i., 115/08 e 28/2011, richiedono, per la loro efficace attuazione, un'approfondita analisi del sistema edificio-impianto. È necessario disporre di dati e informazioni per indirizzare la governance e gli operatori del settore verso scelte mirate al raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei consumi e delle emissioni di gas climalteranti. L'attuale quadro di norme consente ai progettisti di muoversi in un quadro normativo certo per quanto riguarda la determinazione dei consumi energetici sia invernali che estivi. Difficoltà permangono nello stabilire regole adeguate per la certificazione e la limitazione dei consumi energetici estivi. Oltre alle difficoltà di determinare i valori di benchmark per il non residenziale, sono ancora poco conosciuti i consumi energetici per illuminazione, il cui impatto sui consumi energetici e su quelli per il condizionamento estivo è considerevole. È necessario sviluppare strumenti tecnici e progettuali che consentano un più largo uso di sistemi di illuminazione naturale e artificiale ad alta efficienza.



Obiettivi

L'obiettivo generale è quello di supportare il legislatore, sia nazionale sia regionale, nell'emanare le misure di recepimento delle direttive europee in tema di efficienza energetica degli edifici e fornire ai professionisti e tecnici del settore metodi, strumenti e parametri prestazionali, in particolare per la climatizzazione estiva. Gli obiettivi specifici fissati sono:

- L'Aggiornamento dell'Archivio dei Dati Climatici per dotare il quadro normativo italiano di dati aggiornati e di strumenti innovativi di valutazione e classificazione del clima, quale l'indice di severità climatica. L'attività prosegue quella sviluppata nella precedente annualità utilizzandone i risultati e definendo i dati climatici aggiornati per le regioni del centro sud.
- La definizione di edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio, e verifica dell'applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani. La conoscenza della consistenza e delle caratteristiche energetiche del parco edilizio nazionale per usi non residenziali (NR) è, allo stato attuale, molto incerta. Connotato da una composizione (edilizia, impiantistica e di destinazione d'uso) molto eterogenea, questo settore presenta una scarsità di dati sulla consistenza e qualità del parco immobiliare e molte lacune sulla conoscenza degli aspetti gestionali e manutentivi. È pertanto necessario proseguire l'indagine statistica svolta nella precedente annualità sulla consistenza numerica, la distribuzione territoriale e sulle caratteristiche strutturali

ed impiantistiche del settore non residenziale in riferimento alle tipologie bancario, assicurativo e centri commerciali.

- Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile utilizzando sistemi di Domotica e/o di Smart Building e sistemi integrati da fonte rinnovabile. Negli ultimi anni diverse attività si sono focalizzate sullo studio e sviluppo di questi sistemi, ma con approcci poco integrati nel sistema edificio impianto.
- L'efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica. Anche se il quadro normativo sull'efficienza energetica non prevede per questi edifici particolari prescrizioni, il tema è molto sentito dagli operatori del settore e sono necessari indagini e studi che possano caratterizzare il parco degli edifici e definirne il potenziale di risparmio.
- La caratterizzazione dei componenti di involucro per il controllo solare e l'illuminazione naturale degli edifici mediante attività sperimentale e di calcolo atta a caratterizzare i materiali semitrasparenti di facciata, per una accurata valutazione delle prestazioni energetiche ed illuminotecniche degli edifici. Lo studio riguarda anche i componenti opachi, in particolare attraverso la valutazione dei benefici energetici ed ambientali derivanti dall'utilizzo di rivestimenti ad elevata riflessione solare. L'attività è importante ai fini dell'ottimizzazione delle prestazioni dell'edificio durante la stagione estiva.
- La partecipazione a gruppi di lavoro internazionali per una presenza coordinata e razionalizzata nei gruppi di lavoro (Implementing Agreements) della IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia) impegnati sui temi della Efficienza Energetica negli edifici (ECBCS - Energy Conservation in Buildings and Community Systems).

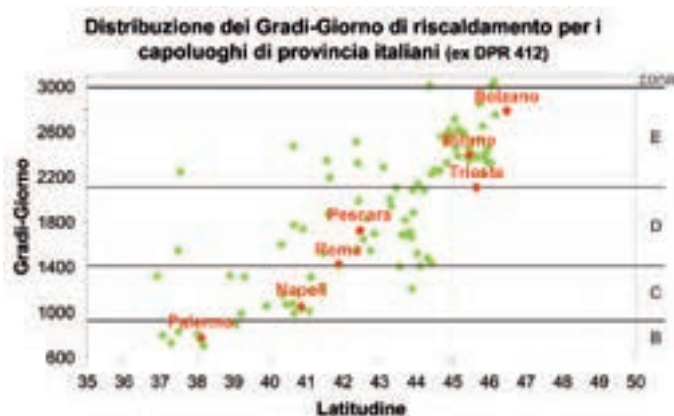
Aggiornamento dell'Archivio dei Dati Climatici

L'attività ha prodotto lo studio "Metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento degli edifici", che ha interessato le regioni del centro e del sud. Lo studio contribuisce a colmare alcune delle lacune esistenti nella normativa tecnica e ha lo scopo di costruire "l'anno tipo" e l'aggiornamento della norma UNI 10349.

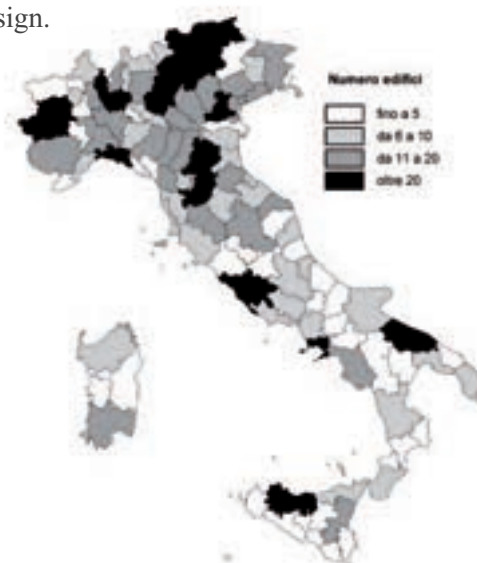
Altro risultato è l'applicazione dell'**Indice di severità del clima (ISC)**, che mette in relazione il fabbisogno di energia per il raffrescamento degli edifici, per la individuazione di zone climatiche estive in cui suddividere il territorio nazionale. È stata condotta un'analisi di sensibilità per verificare, mediante simulazioni su un edificio del terziario, la congruità dell'ISC.

Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati

Sono state svolte simulazioni e indagini per poter sottoporre edifici "tipo" ad attività di valutazione e ottimizzare i sistemi disponibili per avviare, in seguito, il monitoraggio degli edifici nei mesi di interesse per le stagioni invernale ed estiva. È stata condotta una indagine statistica approfondita (dopo quella per gli uffici, scuole e alberghi) dedicata alla "Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso, bancario assicurativo e centri commerciali" per caratterizzare gli edifici con queste destinazioni d'uso e definire una serie di parametri edilizi e impiantistici rappresentativi degli edifici, tra cui la zona geografica e quella climatica. Sono state inoltre sviluppate una ricerca per la definizione di una metodologia per l'audit energetico negli edifici del residenziale e del non residenziale e una metodologia per l'etichettatura degli infissi. Tale attività si inserisce in quelle previste per l'applicazione della Direttiva dell'ECO-Design.



Selezione delle località in base alla classificazione climatica nazionale di riferimento



Distribuzione provinciale degli edifici ad uso bancario

Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile

La ricerca ha evidenziato la convenienza tecnico-economica dei sistemi di Domotica e/o di Smart Building per minimizzare i consumi energetici negli edifici integrando a sistema gli impianti di illuminazione, di climatizzazione invernale e estiva assistiti da fonti rinnovabili e con applicazioni di tecnologie informatiche. Tale razionalizzazione dei consumi energetici e il controllo ambientale potranno trovare applicazione in un complesso urbano significativo. Si è sviluppata una ricerca di approfondimento nel settore Ospedaliero, mirata a strutturare meglio le attività di diagnosi e benchmarking delle strutture del settore, che sono le più energivore del terziario.

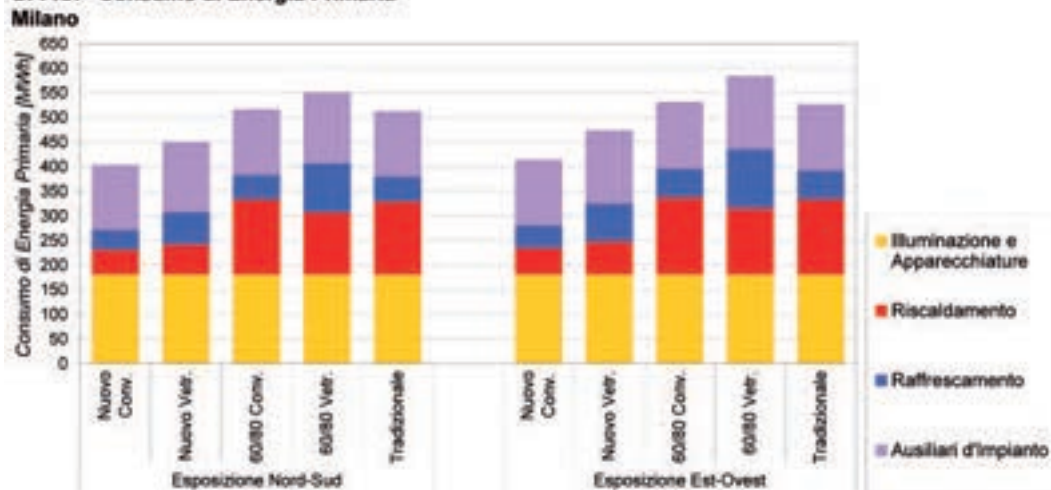
Efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica

Le attività sono state svolte nel complesso del Parco di Villa Reale a Monza individuando edifici di pregio su cui concentrare l'applicazione di metodologie e tecnologie per il miglioramento della loro prestazione energetica e per una efficiente gestione del sistema edificio-impianti propedeutiche alla redazione di un piano di intervento finalizzato alla riduzione dei consumi.

Sviluppo ed assessment di cool materials per l'efficienza energetica ed il controllo ambientale a scala urbana e di edificio

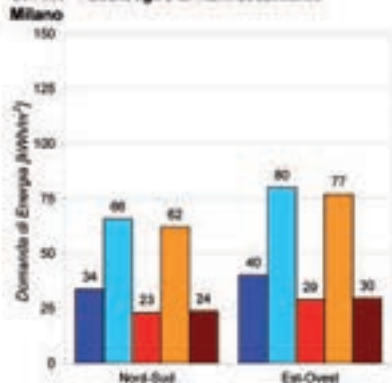
L'utilizzo di cool materials per le coperture e le facciate degli edifici limita l'apporto solare e quindi la richiesta energetica per il raffrescamento. L'utilizzo di questi ma-

UFFICI - Consumo di Energia Primaria

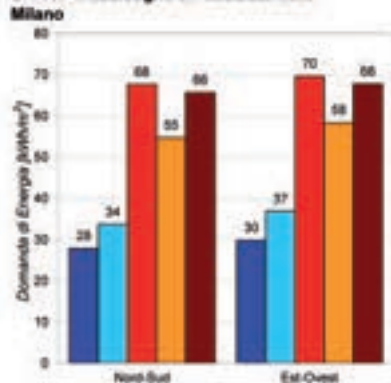


Composizione del consumo di energia primaria per i piani adibiti ad uffici nella città di Milano

UFFICI - Fabbisogno di Raffrescamento



UFFICI - Fabbisogno di Riscaldamento



■ Nuovo Convenzionale ■ Nuovo Vetrato ■ 60/80 Convenzionale ■ 60/80 Vetrato ■ Tradizionale

teriali riduce la temperatura dell'aria in ambiente urbano, migliorando il comfort termico e riducendo il salto termico tra ambiente interno ed esterno. Infine l'utilizzo di materiali generalmente chiari consente di ridurre la potenza degli impianti di illuminazione esterna a parità di prestazione illuminotecnica e riveste quindi una notevole importanza per l'efficienza energetica negli usi finali, in particolar modo per quelli elettrici. L'attività ha affrontato il tema dei materiali ad elevata riflessione solare come strumento per migliorare il comfort in ambienti esterni e confinati e, soprattutto, ridurre la domanda di energia elettrica negli edifici. È stato seguito lo sviluppo di nuovi materiali da utilizzare anche a scala urbana e di edificio, con focus sulla verifica il loro impatto sulla mitigazione dell'isola di calore.

Sviluppo ed assessment di cool materials ad elevate prestazioni

Le vernici e le guaine a base organica sono i prodotti attualmente più diffusi e meno costosi per la creazione di cool roofs, ovvero cool materials applicati sulle coperture degli edifici, ma possono andare incontro ad un rapido degrado delle prestazioni iniziali dovuto all'azione degli agenti atmosferici, all'inquinamento e all'invecchiamento dei materiali. Sono stati condotti studi aventi come obiettivo la creazione di prodotti per coperture ad alta riflettanza basati su materiali ceramici. Questi sono in grado di fornire prestazioni uguali o superiori a quelle offerte dai materiali organici in termini di riflettanza solare e molto superiori in termini di durabilità della performance dopo invecchiamento.

L'utilizzo dei cool materials comincia a diffondersi anche per i materiali urbani (marciapiedi, aree pedonali, strade), combinando l'elevata riflettanza al biossido di titanio, utilizzato per la fotocatalisi e, dunque, per la riduzione di inquinanti nell'aria. A titolo indicativo si riportano l'immagine termica e l'immagine reale di cin-

que prodotti per asfalto caratterizzati da una notevole risposta all'infrarosso vicino. I campioni, di diverso colore, sono stati posti sull'asfalto ed esposti alla radiazione solare. Dalle immagini si evince come le temperature superficiali dei cool materials siano decisamente inferiori all'asfalto, che ha generalmente una riflettanza solare compresa tra il 5% (nuovo) ed il 15% (invecchiato).

Comunicazione e diffusione dei risultati - Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

Le attività svolte nell'ambito dei gruppi di lavoro IEA permettono la realizzazione di studi mirati ai temi afferenti ai singoli Implementing Agreements. Nel dettaglio, i temi affrontati dai gruppi di lavoro italiani nell'Energy Conservation in Building and Community Systems Programme sono stati: Annex 52 Net Zero Energy Buildings) - sviluppo di concepts per la progettazione e la realizzazione di edifici a zero emissioni (Gruppo eERG del Politecnico di Milano); Annex 53 Benchmark - sviluppo di metodologie e strumenti per la misura e l'analisi dei consumi energetici degli edifici ; Annex 53: Total Energy Use in Buildings - Analysis and evaluation methods-'approfondimento dei metodi di previsione dei consumi totali di energia negli edifici, con particolare riferimento agli usi finali (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino); Annex 56 Energy + GHG Optimised Building Renovation - promuovere un concetto di ristrutturazione degli edifici economicamente e tecnicamente ottimizzato, al fine di contribuire all'efficientamento del parco edilizio esistente e alla mitigazione dei cambiamenti climatici (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano); Annex 46 Low Exergy sustainable buildings sviluppo di una metodologia condivisa e internazionalmente valida per gli audit, applicabile in particolare agli edifici governativi e pubblici (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano).

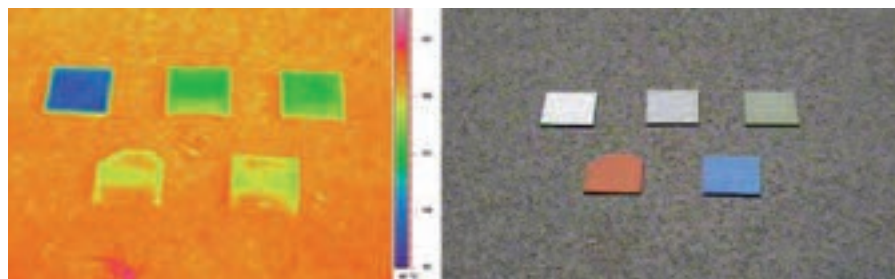


Immagine termica e reale di cool materials per aree urbane esposti alla radiazione solare

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

Progetto 3.3: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

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



Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

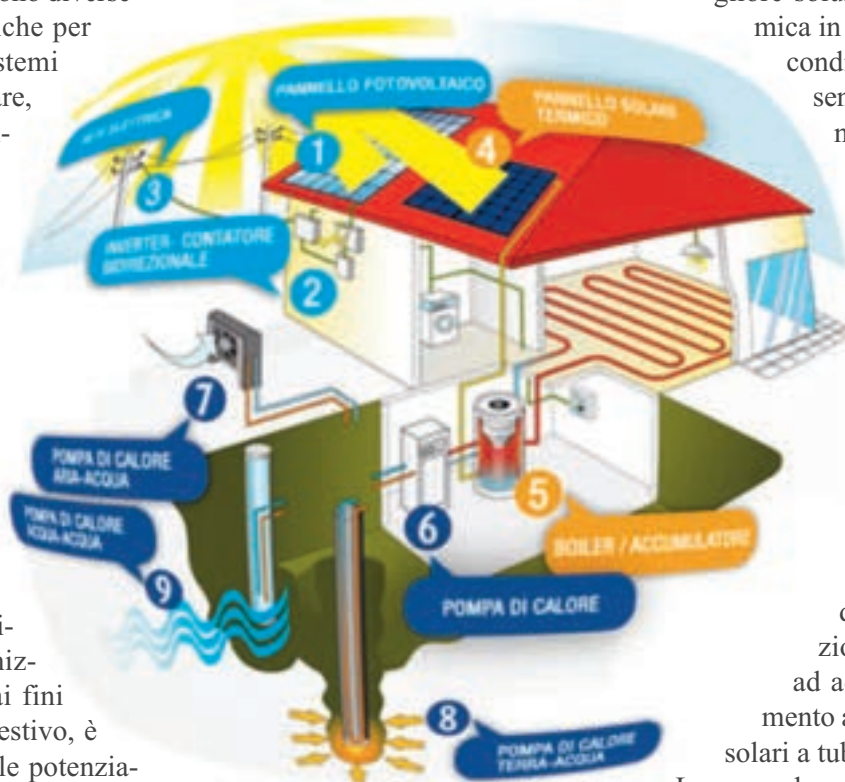
Scenario di riferimento

Negli ultimi anni diverse attività di ricerca e sviluppo hanno studiato processi innovativi per il condizionamento degli edifici basati su tecnologie che utilizzano l'energia solare (solar cooling). 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 del picco di domanda elettrica con il periodo di massima disponibilità di energia solare. Attualmente esistono diverse componenti tecnologiche per la realizzazione di sistemi di raffrescamento solare, tuttavia non esiste ancora una soluzione tecnologica integrata di facile applicazione, con il risultato che gli impianti di questo tipo sono ancora per lo più di tipo sperimentale e come tali molto costosi e poco competitivi. Per migliorare la competitività di tali sistemi, oltre a ottimizzarne le prestazioni ai fini del condizionamento estivo, è necessario indagarne le potenzialità d'impiego invernale integrando diverse tipologie di collettori solari con dispositivi innovativi quali pompe di calore elioassistite, macchine ad assorbimento o pompe di calore a CO₂. In tal modo si potrà ottimizzare il processo di climatizzazione nell'arco di tutto l'anno solare in ogni condizione climatica del Paese.

Obiettivi

Il progetto ha lo scopo di definire e sviluppare un sistema integrato robusto, competitivo e di riferimento per il "sistema Italia", in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione, estiva e invernale. A tal fine si è ritenuto di dover procedere nello sviluppo di:

- Componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- Tecnologie integrate di climatizzazione che consentano la selezione della migliore soluzione tecnico-economica in relazione alle diverse condizioni climatiche presenti nel territorio nazionale.



Risultati

Messa in funzione e analisi sperimentale di pompa di calore ad assorbimento del tipo acqua-ammoniaca

È stato installato un test rig per impianti di solar cooling funzionanti con macchine ad adsorbimento/assorbimento accoppiate a collettori solari a tubi evacuati.

Le prove hanno evidenziato che la macchina frigorifera può essere alimentata dai collettori in condizioni d'irraggiamento normale; se la temperatura di produzione dei collettori si mantiene sotto gli 80 °C si deve ricorrere a una caldaia d'integrazione o al calore immagazzinato nel sistema di accumulo.

Analisi sperimentale sugli heat pipe

Sono state eseguite prove sperimentali sull'impianto denominato TOSCA (Thermalfluid-dynamics Of Solar Cooling Apparatus), che hanno consentito di analizzare l'andamento dei coefficienti di scambio termico e della resistenza termica totale del dispositivo in funzione del grado di riempimento, della potenza elettrica fornita, della portata di fluido refrigerante.

Monitoraggio dell'Edificio F51 C. R. ENEA Casaccia

Nella stagione invernale 2010-2011 è stata completata la campagna di monitoraggio invernale sull'impianto di solar cooling installato a servizio dell'edificio F51.

La sperimentazione ha verificato l'affidabilità, la versatilità e in generale la fattibilità (anche economica) di questa tipologia d'impianto.

L'efficienza del sistema si è mantenuta su valori molto elevati e sicuramente superiori a molte altre applicazioni di fonti rinnovabili.

Le misurazioni effettuate nel periodo di prova mostrano che l'energia solare captata dai pannelli ha provveduto al riscaldamento dell'edificio per il 40%, con punte del 50% nei mesi di febbraio e marzo.

Analisi sperimentale del prototipo di macchina elioassistita

È stata completata e messa in servizio la facility per la prova di impianti a pompa di calore elioassistiti. I test condotti nel periodo invernale sull'impianto hanno indicato un incremento dell'efficienza della macchina installata: aumentando la temperatura d'ingresso al secondario da 5 °C a circa 20 °C, il COP passa da 2,6 a circa 3,3 crescendo di circa il 27%.

Nella campagna di test condotta nel periodo estivo si è valutata l'opportunità di sfruttare i collettori solari come dissipatori di calore per il fluido avviato al condensatore della pompa di calore. L'analisi dei dati consentirà



Facility di test per pompe di calore elioassistite

di confrontare questa soluzione progettuale con quelle utilizzando sonde geotermiche per la fornitura di calore al secondario della pompa di calore.

Sviluppo di una facility per la caratterizzazione di sistemi solar cooling

Presso l'edificio F92 del CR ENEA Casaccia è stato installato un impianto di solar heating and cooling a servizio di una pompa di calore ad assorbimento acqua-ammoniaca di tipo reversibile per la realizzazione di un sistema di condizionamento innovativo.

L'edificio da condizionare è costruito su tre livelli per ognuno dei quali è stata prevista una gestione autonoma



Impianto di solar heating and cooling innovativo a servizio dell'edificio F92 del CR ENEA Casaccia

del sistema di climatizzazione.

La pompa di calore adottata, progettata e costruita presso il CR ENEA Casaccia, sarà in grado di utilizzare l'acqua calda prodotta dai pannelli solari durante il periodo invernale quale sorgente per l'evaporatore, che verrà riscaldato da una corrente a bassa temperatura ($\sim 20^\circ\text{C}$).

Analisi sperimentale di una pompa di calore a CO_2 (R744)

L'utilizzo della CO_2 come fluido refrigerante consente il funzionamento della pompa di calore anche a temperature esterne prossime a -25°C ossia in zone climatiche "rigide", dove le tradizionali pompe di calore hanno il problema dello sbrinamento delle batterie esterne. L'impianto è stato progettato e realizzato, presso l'area dell'edificio F92 del CR ENEA Casaccia, con l'obiettivo di produrre acqua calda e acqua fredda per la climatizzazione annuale di un locale di prova appositamente strumentato e con utenza simulata. I flussi termici e di massa uscenti dalla pompa di calore sono avviati all'UTA e ai fan coils, a servizio del locale di prova, da un sistema di monitoraggio e controllo di temperatura e umidità.

Geodatabase open source dei Dati geo-litologici nazionali

È stato reso accessibile via web il geodatabase open source dei Dati geo-litologici nazionali. Il geodatabase, che sarà integrato con stratigrafie rappresentative di quattro aree scelte nelle città di Palermo, Napoli, Roma e Milano, rappresenta un importante strumento d'informazione condivisa, a supporto della diffusione della tecnologia delle pompe di calore geotermiche.

Sperimentazione e qualificazione di collettori solari a media temperatura

Le attività presso il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia hanno riguardato la modellazione teorica delle diverse tipologie di concentratori abbinata ad analisi termofluidodinamiche e ottiche e alla verifica sperimentale di componenti commerciali e/o prototipi in fase di sviluppo.

Le analisi teoriche condotte con l'ausilio dei modelli matematici sviluppati hanno fornito una serie d'indicazioni sulle modifiche da apportare al sistema ottico di concentrazione e alla configurazione del ricevitore termico per una ottimizzazione complessiva dei prototipi. Sono stati inoltre condotti una serie di test su differenti tipologie di collettori a concentrazione per applicazioni a media temperatura commerciali con lo scopo di qualificare i suddetti



Facility di test pompa di calore a CO_2 (R744)

componenti in conformità alla normativa tecnica di settore.

Analisi e caratterizzazione energetica degli accumuli termici per applicazioni solari

Presso il Laboratorio di qualificazione dei collettori e sistemi solari del CR ENEA Trisaia è stata realizzata una piattaforma sperimentale costituita da due circuiti di prova da utilizzarsi per l'effettuazione dei test di carica e scarica del serbatoio solare.



Laboratorio di sperimentazione e qualificazione collettori solari a media temperatura del CR ENEA Trisaia

Realizzazione di un circuito di test per prove indoor su collettori solari

È stata realizzata la parte termo-idraulica di un stazione di prova indoor basata su un simulatore solare, per dotare il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia di un impianto sperimentale per l'esecuzione di test indoor in condizioni controllate.

Sviluppo di modelli predittivi di richiesta energetica per la climatizzazione

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo delle metodologie di modellazione predittiva del sistema edificio-climatizzazione, attraverso cui si vuole ottenere un ulteriore margine di efficienza ma anche garantire la robustezza complessiva del sistema. In particolare è stata sviluppata una metodologia innovativa per la previsione a breve termine della richiesta energetica di un edificio complesso e è stata effettuata la sperimentazione su un edificio ENEA. L'approccio sviluppato raggiunge un'accuratezza maggiore rispetto ai metodi di previsione convenzionali e sfrutta maggiormente l'aggiunta di dati esterni, come ad esempio il numero degli occupanti dell'edificio.

Metodologia di ottimizzazione multi obiettivo della regolazione

È stato studiato e sviluppato un sistema intelligente di monitoraggio energetico-ambientale per edifici a destinazione d'uso terziaria e progettata l'architettura del sistema di monitoraggio per un caso reale. Parallelamente, è stato condotto uno studio riguardante lo sviluppo di procedure di analisi a supporto di attività diagnostiche, basate sui dati acquisiti dai monitoraggi e finalizzate al miglioramento delle prestazioni energetiche e alla qualità climatica degli ambienti confinati. È stato eseguito uno studio sulle tecniche di modellazione e sulle strategie di controllo e gestione per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche e la riduzione dei consumi per una specifica soluzione tecnologica (solar cooling) di la climatizzazione ambientale.

Diffusione dei risultati

Per la diffusione dei risultati è stato allestito un sito web dedicato ai "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili" <http://climatizzazioneconfontirinnovabili.enea.it/>

Inoltre, in collaborazione con il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università degli Studi di Roma "Roma TRE" è stato allestito un portale che rende fruibile in ambiente G.I.S. una banca dati per lo sfruttamento delle risorse geotermiche a bassa entalpia (<http://www.litologia-geotermia.enea.it/>).



Facility per l'analisi sperimentale della pompa di calore ad assorbimento del tipo acqua-ammoniaca



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

Progetto 3.4: Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

Referente: A. Calabrese – andrea.calabrese@enea.it



Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Scenario di riferimento

Gli obiettivi del Piano d'Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica e del Piano d'Azione per le Energie Rinnovabili comportano interventi per l'efficienza e la diversificazione delle fonti energetiche in tutti i settori, compreso quello dei trasporti che assorbe circa il 23% dei consumi totali del paese (43 MTep su 185 MTep totali, da Bilancio Energetico Nazionale 2009). L'alleggerimento dei veicoli nei casi in cui l'inerzia

e l'attrito hanno rilevante influenza sui consumi, e l'elettificazione dei sistemi di trasporto, in particolare ricorrendo a sistemi di accumulo, costituiscono le principali risposte alle esigenze di diversificazione delle fonti e di riduzione dei consumi "dal pozzo alla ruota".

Il ricorso a nuovi materiali, polimerici o metallici a struttura cellulare, richiede anche lo sviluppo dei relativi processi di produzione. Crescente è inoltre l'interesse dell'industria e della ricerca verso la sostituzione delle matrici termoindurenti con quelle termoplastiche e l'utilizzo di resine e fibre da fonti naturali.

Nel campo dei materiali metallici cellulari le innovazioni vanno dallo sviluppo di procedimenti per la schiumatura delle leghe di acciaio per usi strutturali all'ibridizzazione con materiali polimerici per migliorarne le proprietà, con la realizzazione anche di sandwich multilayer per applicazioni speciali e scudi balistici.

Le tecnologie di produzione di Aluminum Foam Sandwich (AFS) per impiego strutturale sono basate principalmente sulla Metallurgia delle Polveri (MP). Questi materiali hanno ancora un costo elevato e sono utilizzabili per automobili di alta fascia; le ricerche in corso (body in white di autoveicoli dedicati principalmente a

concept di auto sportive con dimostratori prototipali) evidenziano come ulteriore ricaduta un miglioramento notevole delle proprietà di crashworthiness.

Il mercato è attualmente dominato dal gruppo Alulight (in applicazioni crashworthiness per la Audi Q7 e in componenti di rinforzo del frame della Ferrari spider 430 sviluppati in collaborazione con ALCOA).

Nel campo dell'elettificazione del trasporto stradale (e del mercato "off-road":

veicoli per cantieri cittadini, pulizia delle strade, giardinaggio, orticoltura e serre, tempo libero) i progressi tecnologici sono stati notevoli e, a parità di contenuto energetico, una batteria Li-Ion pesa 1/3 di una tradizionale batteria piombo-acido, seppure con un costo maggiore.

Un problema rilevante per le batterie Li-Ion è la disponibilità commerciale. Infatti, pur in presenza di molti produttori di celle, pochi sono i produttori di moduli e sistemi.

I grandi gruppi automobilistici (giapponesi, e tedeschi) sono in grado di superare la difficoltà stipulando accordi diretti, non lo è però la piccola e media industria tipica del sistema produttivo italiano. La disponibilità di elementi modulari consentirebbe ai vari operatori di soddisfare le esigenze applicative a prezzi più contenuti. Quanto a sistemi di accumulo basati sui supercondensatori, questi trovano sempre più applicazione nel settore energetico (eolico) ma soffrono la concorrenza delle batterie nel settore dei trasporti, pur essendo invece i due sistemi complementari o addirittura integrabili in condizioni particolari.

La ricarica rapida e la diffusione delle micro vetture,



nuovo segmento “sub A” e quadricicli, infine, consentiranno di ridurre in modo considerevole la taglia delle batterie per l’uso urbano dell’auto, abbattendone i costi. Secondo la "Strategic Analysis of the European Micro-cars Market" (Frost & Sullivan, 2011) questo settore diventerà una delle principali fonti di reddito per oltre 30 competitor del mercato, incluse 7 tra le 10 maggiori case automobilistiche a livello globale. Lo studio prevede che oltre il 75% delle miniauto annunciate consisterà di veicoli elettrici a batteria.

Obiettivi

L’obiettivo generale è l’estensione dell’elettrificazione dei trasporti su gomma essendo l’impatto ambientale della trazione termica, in termini di CO₂/kWh alla ruota, ben maggiore di quella elettrica. Ad esempio, da un recentissimo studio commissionato da Trenitalia ad ENEA risulta che l’emissione di CO₂, per passeggero, su tratte servite dall’Alta Velocità è il 50% di quella dovuta al trasporto su gomma. Per i veicoli a batteria il vantaggio si riduce, ma, a parità di servizio (uso urbano) l’emissione resta inferiore del 35-40% rispetto a quella del corrispondente veicolo convenzionale.

Le linee di ricerca, tre, sono rivolte allo sviluppo di metodologie di progettazione, realizzazione ed assemblaggio di materiali e strutture leggere e riciclabili, ai sistemi di trazione elettrica, allo studio di LCA su queste tecnologie.

Risultati

Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS (battery management system)

È stato condotto uno studio, in collaborazione con l’Università di Pisa, per l’identificazione della tipologia più adatta (Litio-ione ferro-fosfato), per range di tensioni di funzionamento e caratteristiche di sicurezza, come alternativa alle batterie al piombo per l’avviamento del motore, l’accensione e l’alimentazione degli ausiliari. Sono stati individuati, per le stesse batterie, due settori d’impiego “non automobilistici” in cui è lecito attendersi importanti ricadute, quello dei veicoli “off-roads” e quello della nautica (ausiliari, special-



Componenti realizzati con sandwich di schiume metalliche

mente alla fonda, e/o propulsione in aree protette, manovre in porto).

L’analisi del mercato “off roads” ha stimato un “volume” di vendita al 2020 per oltre 500.000 kWh, equivalenti a circa 20.000 auto elettriche di taglia media. Ai fini della standardizzazione, si è definita una taglia piccola (30 Ah) per la batteria d’avviamento, una taglia “media”, 60 Ah, e una grande, 90 Ah, accoppiabili in parallelo per realizzare moduli da 120 Ah e 180 Ah.

Sono state provate in laboratorio celle di quattro diversi fornitori, effettuata la progettazione preliminare per le tre taglie, definite in via preliminare le specifiche progettuali dei relativi battery management systems; è stato realizzato e testato un sistema d’accumulo, 200 Ah/48 V adatto ad un’ampia serie di usi, dal trattoretto da giardinaggio, alla piattaforma aerea, alla motofalciatrice; la sperimentazione fornirà utili elementi per la realizzazione del sistema con i moduli standardizzati da 12V/90Ah.

In collaborazione con l’Università di Pisa è stata condotta un’analisi delle problematiche di monitoraggio ed equalizzazione comuni a tutte le applicazioni veicolari ed un’analisi bibliografica sullo stato dell’arte dei BMS, completata con l’acquisizione e la valutazione comparata in laboratorio di 2 sistemi commerciali, uno dei quali riferito al sistema d’accumulo per il trattoretto.



Sistema d’accumulo Li-Io 200Ah/48 V realizzato e testato in ENEA



Accumulo misto batterie + supercondensatori sviluppato in ENEA



Microvettura Urb-e sviluppata in ENEA

Studio di altri sistemi avanzati di accumulo di energia, quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori)

Lo studio di sistemi misti batterie+supercondensatori ha evidenziato le condizioni in cui questi possono costituire una valida alternativa alle batterie al litio (Politecnico di Milano). Le valutazioni sperimentali sono state condotte su un sistema a 48 V realizzato nell'ambito del programma, costituito da batterie da trazione (6V/200 Ah) e supercondensatori e da una interfaccia per la gestione dei flussi di potenza sviluppata in collaborazione con l'Università di Padova; l'interfaccia consente la soppressione dei picchi di corrente per le batterie. Le prove hanno permesso di misurare anche un incremento di "capacità estraibile in cicli dinamici", quindi di autonomia del veicolo, pari al 15% in condizioni di massimo sfruttamento dei supercondensatori.

Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento a veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida

Uno studio in collaborazione con l'Università dell'Aquila ha confermato la possibilità di adattamento per un convertitore di piccola potenza sviluppato per l'uso delle rinnovabili (fotovoltaico e micro-eolico) al quadriciclo ibrido Urb-e dell'ENEA realizzato nel corso di

precedenti attività e riconvertito in versione "pure electric" nell'ambito del programma. Sono state effettuate prove di ricarica rapida ed extrarapida su moduli Li-Ion per la parametrizzazione dei modelli termici delle stesse.

Life-Cycle Assessment energetico ambientale

È stata effettuata la raccolta dati, modellazione e quantificazione del Life Cycle Assessment per batterie Li-Ion di ultima generazione; in particolare, con il supporto del Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali dell'Università di Palermo sono state effettuate le seguenti attività:

- Analisi dello stato dell'arte internazionale sulla LCA applicata alle batterie al Li-Ion. Il contenuto di Li in una batteria è pari a circa lo 0,7% (1,4% in peso) e, sebbene presente nella crosta terrestre in concentrazione inferiore a 0,01% e considerato a scarsa disponibilità, questo utilizzo ha un piccolo impatto in termini di Abiotic Resource Depletion; piccolo è anche l'impatto secondo categorie correlate al consumo energetico. Gli altri metalli presenti nella batteria e nel BMS e i processi di realizzazione danno invece un contributo significativo.
- Valutazione energetico-ambientale delle batterie, comprensive del sistema BMS (Battery Management System), tramite l'applicazione della metodologia LCA (ISO 14040). Per la fase di uso i dati primari derivano dalle prove presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi (DESE) Università di Pisa. Oggetto dell'analisi le batterie litio ferro-fosforo, di taglia 30, 60, 90 Ah e con tensione nominale di 14 V.
- Definizione del data set conforme all'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook per la gestione e documentazione dei dati raccolti ed elaborati.

Analisi dello stato dell'arte e qualificazione chimico/fisica di AFS standard e sviluppo di processi di schiumatura innovativi

Sono stati acquisiti e qualificati sia precursori sia pannelli Aluminum Foam Sandwich. In collaborazione con l'Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria meccanica ed industriale, sono stati analizzati i materiali base mediante test di microscopia ottica ed elettronica con analisi semi quantitativa dei componenti.

L'analisi SEM EDS dei precursori ha permesso di valutare la composizione chimica e la distribuzione delle particelle costituenti (alluminio SiC e TiH₂) e di mettere in luce la presenza di elementi apparentemente estranei quali Ag e Pb, che molto probabilmente giocano un ruolo determinante nella creazione del legame core-pelle. L'Università Tor Vergata ha condotto studi

per la produzione di schiume di alluminio su scala di laboratorio, ottimizzando i parametri in termini di tempi, temperature, contenuto e dimensioni di SiC e TiH₂. Questi studi, condotti in laboratorio e su pellet piccola dimensione, andranno replicati per verificare se per componenti di maggiori dimensioni i parametri debbano subire modifiche sia per la dimensione dei componenti che per quelle delle apparecchiature da utilizzare. Lo studio dei parametri preliminari di schiumatura sui precursori commerciali è stato effettuato in ENEA su micro pellet mediante un DSC (Differential Scanning Calorimeter).

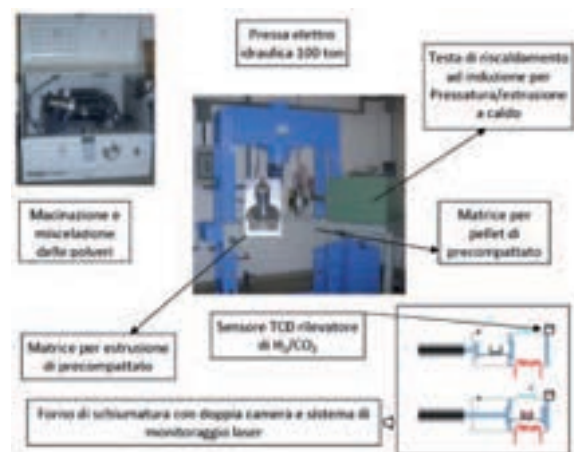
È stata progettata e collaudata un'attrezzatura specifica per la realizzazione di test di flessione su 4 punti in conformità allo standard ASTM C393 "Flexural Properties of Sandwich Constructions" da applicare sulla macchina di prove universali MAYES da 100 kN.

L'analisi dello stato dell'arte sui processi di produzione di schiume e pannelli AFS ed i test sperimentali condotti hanno permesso di individuare il processo di Metallurgia delle Polveri (MP) come tecnologia più adatta allo sviluppo di processi di produzione di componenti in schiuma metallica di alluminio.

È stato progettato un impianto pilota per la produzione dei precursori (pressa/estrusore) che grazie ad un apposito forno con doppia camera, calda e fredda, permette di studiare il processo di schiumatura di nuove miscele su componenti di dimensione rappresentativa.

Sviluppo delle tecnologie di giunzione

Sono stati realizzati i piani sperimentali a due differenti velocità definendo le finestre in termini di focalizzazione, deflessione e corrente di saldatura mediante EBW e testati tre differenti tipi di inserto per l'accop-

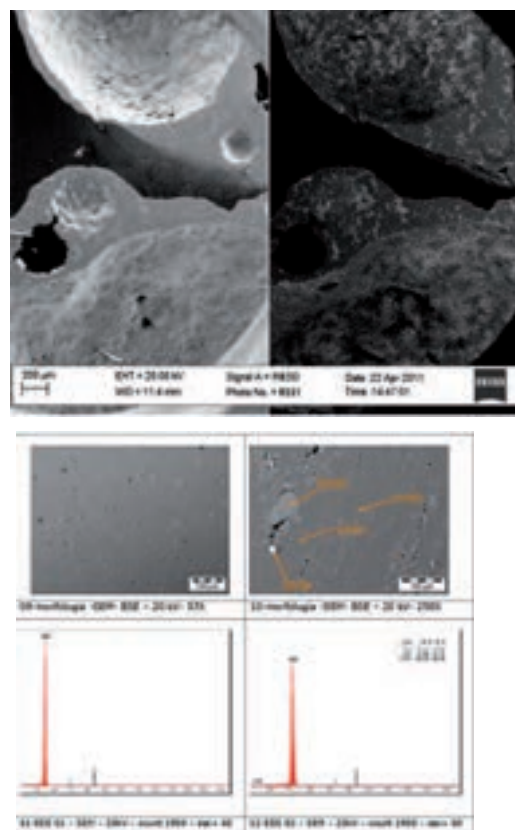


Schema dell'impianto pilota per la produzione di schiume metalliche ENEA

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

Progetto 3.5: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Referente: G. Pede, giovanni.pede@enea.it



Analisi SEM EDS delle schiume (microstruttura dei pori e delle pelli) e dei precursori

piamento AFS-AFS e AFS con strutture primarie in estrusi di alluminio. È stato sviluppato un processo di saldatura laser TIG ad alta produttività con velocità di saldatura fino a 3 metri al minuto.

Sviluppo di processi di ibridizzazione di microsfere metalliche con polimeri termoplastici e per l'impiego di fibre naturali in compositi termoplastici

Oltre alla realizzazione di WPC (Wood Polymer Composite), è in corso di sperimentazione la preparazione di compositi polimerici a base di resine riciclabili e biodegradabili rinforzati con fibre naturali.

Il programma prevede la preparazione di compositi mediante melt compounding utilizzando le matrici termoplastiche acquisite e le fibre corte naturali, e mediante il processo di laminazione utilizzando matrici e fibre naturali, insieme alla caratterizzazione meccanica mediante prove statiche di trazione (e flessione). Sono in corso prove preliminari finalizzate alla produzione di materiali cellulari ibridi a base di resine termoplastiche e sfere cave ed alla loro caratterizzazione micro strutturale.