



Accordo di Programma MSE/ENEA 2006-08

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del secondo anno di attività

A cura di Marina Ronchetti

NOVEMBRE 2011

Accordo di Programma MSE-ENEA 2006-08 RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO Risultati del secondo anno di attività

A cura di *Marina Ronchetti*

con i contributi di

S. Giammartini, P. Deiana, A. Calabrò, P. Delli Veneri, S. Monti, A. Moreno,

G. Fasano, N. Calabrese, E. Ferrero, S. Fumagalli, I. Bertini

2011 ENEA

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

Lungotevere Thaon di Revel, 76 00196 Roma

ISBN 978-88-8286-251-0



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

Accordo di Programma MSE-ENEA 2006-08

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del secondo anno di attività

a cura di Marina Ronchetti

con i contributi di

S. Giammartini, P. Deiana, A. Calabrò, P. Delli Veneri, S. Monti, A. Moreno, G. Fasano, N. Calabrese, E. Ferrero, S. Fumagalli, I. Bertini

Ringraziamenti
Un sentito ringraziamento ai colleghi che hanno partecipato all'elaborazione della pubblicazione:
Vincenzo Cincotti Vincenzo Gerardi Agostino Iacobazzi Rosa Provaroni

Indice

Presentazione	7
PRODUZIONE DI ENERGIA E FONTI RINNOVABILI	
Sviluppo di un sistema innovativo di combustione - di tipo flameless - di polverino di carbone per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO ₂	9
Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO ₂	57
Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno	91
Sviluppo di tecnologie avanzate per componenti fotovoltaici innovativi	111
Nuovo nucleare da fissione	135
Sviluppo di tecnologie innovative per le applicazioni stazionarie cogenerative delle celle a combustibile anche con l'utilizzo di biogas e biomasse	161
USI FINALI	
Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. interazione condizionamento e	200
illuminazione	209
Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili	261
Elettrotecnologie innovative per i settori produttivi	297
Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica	337
Sviluppo di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici su scala territoriale e urbana	359
Elenco Documenti Tecnici	405

Presentazione

Il presente volume riporta i risultati delle attività svolte dall'ENEA, in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Università con 65 dipartimenti coinvolti) e le società partecipate Sotacarbo ed FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, nella seconda annualità (PAR 2007) dell'Accordo di Programma 2006-08 con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

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

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico (2006-08), il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato una serie di Accordi di Programma con vari soggetti, tra cui l'ENEA.

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

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

Le attività svolte hanno riguardato 11 progetti di ricerca all'interno, come previsto dal Piano triennale, di due grandi aree: Area Produzione e fonti energetiche (studi e ricerche sull'utilizzo sostenibile del carbone e le tecnologie di cattura e sequestro dell'anidride carbonica, sul nuovo nucleare da fissione, sul fotovoltaico innovativo e sullo sviluppo di celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative anche con l'utilizzo di biogas e biomasse) e Area Usi finali (determinazione dei fabbisogni energetici nel settore civile residenziale e non, sviluppo di strumenti per la promozione di tecnologie efficienti, applicazioni di tecnologie innovative per l'illuminazione pubblica, studi e sperimentazioni sulla climatizzazione estiva e invernale assistita da fonte solare).

Di seguito per ognuno degli undici di ricerca viene riportata una descrizione dell'attività svolta e dei principali risultati raggiunti. Maggiori dettagli possono essere acquisiti dal sito ENEA sulla ricerca di sistema (http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico), che consente di accedere con facilità a tutta la documentazione tecnica prodotta.

Vincenzo Porpiglia Responsabile Unità di Progetto Ricerca di Sistema Elettrico

Sviluppo di un sistema innovativo di combustione - di tipo flameless - di polverino di carbone per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO₂

Il carbone rappresenta a livello internazionale un'alternativa concreta e sicura per la produzione di energia. Anche il nostro Paese si sta indirizzando verso un incremento nell'uso di tale fonte (oggi pari a un terzo della media Europea) attraverso un insieme di attività di ricerca e sviluppo di tecnologie pulite, in grado di aumentare l'efficienza di conversione e contenere i costi di investimento.

L'utilizzo tecnologicamente avanzato del carbone consente già oggi livelli di emissioni molto al di sotto dei limiti imposti. Per la riduzione delle emissioni di CO₂ si può intervenire attraverso l'incremento dell'efficienza e, ancor più significativamente, attraverso la sua separazione, cattura e successivo sequestro.

Le moderne tecnologie prevedono la combustione diretta del polverino di carbone in una caldaia per la produzione di vapore (impianti SuperCritici e UltraSuperCritici) oppure la gassificazione e combustione in turbogas del syngas prodotto in impianti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycles). Successivamente allo sfruttamento energetico, per ridurre significativamente le emissioni di CO₂, occorre far ricorso a tecnologie CCS (cattura e sequestro della CO₂). Un'alternativa promettente alle tecnologie citate è rappresentata dalla combustione in ossigeno (ossicombustione), che produce una corrente concentrata di CO₂ e vapore, facilmente separabili per condensazione, a cui far seguire la fase di cattura e sequestro.

Il presente progetto opera nella filiera della combustione diretta del polverino di carbone per impianti di produzione di elettricità, attraverso lo sviluppo di un sistema innovativo, in quanto realizza una combustione altamente controllabile, efficiente ed a bassissime emissioni, di tipo flameless e perché si basa sulla oxycombustione, che mira alla separazione e cattura della CO₂ prodotta, per un suo successivo confinamento geologico.

La tecnologia proposta offre una serie di vantaggi, che costituiscono anche gli obiettivi tecnologici ed ingegneristici che nel progetto si intendono verificare e dimostrare:

- forte riduzione, in fase di combustione, di agenti inquinanti quali polveri, NOx, metalli pesanti, ed altri inquinanti, riducendo significativamente la necessità di sistemi di depurazione dei gas;
- produzione di scorie vetrificate inerti facilmente riciclabili;
- gas combusti costituiti prevalentemente da CO₂ e da vapor d'acqua, il che consente la cattura e la separazione della CO₂ senza pesanti penalizzazione economiche ed energetiche;
- rendimenti complessivi nella produzione di energia elettrica più elevati rispetto ai tradizionali cicli a vapore in configurazione con sequestro della CO₂. In particolare si ipotizza, sulla base di dati di letteratura e valutazioni ottenibili applicando metodi di stima correnti, un'efficienza del 36,8% contro il 31,4% di un impianto SC con cattura, ed il 35,6% di un IGCC, ed un COE di 6,91 c€/kWh contro gli 8,16 per SC ed i 7,1 per IGCC (valutazioni ottenute considerando il prezzo del carbone a 1,55 \$/GJ);
- dimensioni contenute dell'impianto operante in regime di combustione in pressione;
- alimentazione del carbone con granulometrie non spinte, riducendo rispetto ai classici combustori a polverino di carbone le necessità di macinazione.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività è finalizzata allo sviluppo di un sistema di combustione ad elevata efficienza di conversione energetica, a basse emissioni di macro e micro inquinanti e di CO₂, da impiegare in impianti per produzione di elettricità, che utilizza polverino di carbone e aria arricchita in ossigeno, applicando la tecnologia avanzata di combustione senza fiamma "flameless", già sperimentata su scala pilota.

Obiettivo finale del progetto è quello di sviluppare le conoscenze di base e i metodi di progettazione per la realizzazione di impianti, a partire da una taglia significativa di 50 MWt (impianto dimostrativo) fino ad una taglia industriale di 320 MWe, per produzione di energia a costi competitivi, ad elevata efficienza energetica, caratterizzati da un ridotto impatto ambientale sia in termini di emissioni nocive, sia in termini di produzione di CO₂ poiché predisposto per il suo sequestro.

9

Il rendimento atteso nella produzione di energia elettrica, dell'ordine del 37%, è più elevato rispetto ai tradizionali cicli a vapore considerando incluso il sequestro della CO₂. Il sistema è idoneo al retrofit di impianti esistenti.

Il progetto si sviluppa nell'arco di tre anni e prevede:

- attività di sperimentazione sul combustore ISOTHERM da 5 MW realizzato presso il centro Ansaldo Caldaie di Gioia del Colle;
- lo sviluppo di diagnostica avanzata per il monitoraggio ed il controllo del reattore;
- lo sviluppo e validazione dei sistemi di simulazione per la progettazione del combustore di taglia industriale;
- l'analisi dei cicli basati sull'impiego di tale combustore e loro efficientamento;
- lo studio di componenti innovativi quali il dispositivo di pompaggio, i sistemi avanzati di trattamento fumi in temperatura e a pressione, l'espansione diretta dei fumi in una turbina a vapore innovativa.

Il lavoro svolto nel primo anno ha riguardato:

- un primo studio parametrico e di sensitività sulla termofluidodinamica e chimica della combustione MILD in condizioni di oxy-combustione;
- l'avvio degli studi sull'interazione bifase (solido-gas) in zona primaria di combustione, condotti con numerica avanzata (codice ENEA proprietario);
- studi preliminari sulla cinetica chimica ridotta del processo di gassificazione e ossidazione in presenza di elevate percentuali di CO2 e H2O;
- una prima campagna sperimentale su ISOTHERM (impianto pilota da 5 MWt di Sofinter) per la validazione dei codici;
- l'allestimento di un laboratorio per la caratterizzazione chimico-fisica dei carboni;
- l'allestimento di un sistema di campionamento integrato e prime caratterizzazioni del particolato emesso (componente organica e inorganica);
- prime prove per lo sviluppo di sistemi diagnostici avanzati per il monitoraggio ed il controllo;
- analisi preliminari di ciclo.

Nella seconda annualità erano previste le seguenti attività:

- sviluppo dei metodi di progettazione, attraverso l'impiego di codici di simulazione termofluidodinamica commerciali, opportunamente implementati con routine esterne, e lo sviluppo di codici proprietari (codice "Heart" messo apunto da ENEA), concentrando l'attenzione su aspetti di particolare rilievo, come il processo di volatilizzazione e successiva combustione delle specie gassose e del "char", i fenomeni radiativi gas-gas ed il complesso delle reazioni chimiche;
- sviluppo di strumentazione e metodi per diagnostica avanzata, di tipo generalmente non invasivo, per una caratterizzazione termica, chimica e fluidodinamica del processo di combustione e per il suo controllo;
- prosecuzione delle prove sperimentali, condotte sull'impianto pilota a ossicombustione da 5 MWt di Sofinter, al fine di produrre dati sperimentali utili a validare gli strumenti progettuali e verificare le migliori condizioni di funzionamento (temperatura, pressione, ricircolo fumi, concentrazione ossigeno, modalità iniezione combustibili, granulometria combustibili, contenuto di acqua negli slurry; ed ancora verifiche essenziali sulla pulizia fumi, contenuto di polveri e metalli pesanti, etc..);
- validazione dei sistemi di simulazione e verifica di criteri di progettazione. Sulla base delle simulazioni effettuate e delle prove di validazione, si procede alla valutazione della influenza dei parametri di scala e di orientazione sugli aspetti termochimici e fluidodinamici;
- studio di alcuni aspetti particolarmente innovativi dell'impianto, legati a componenti quali il dispositivo di pompaggio, i sistemi avanzati di trattamento fumi in temperatura e a pressione.
- analisi di cicli termodinamici e configurazioni d'impianto Vengono effettuati studi e approfondimenti di ciclo che consentiranno, sulla base delle performance raggiunte dal combustore, con particolare attenzione alle caratteristiche dei fumi prodotti (contenuto di polveri, ecc.), di porre le basi per la progettazione del circuito dimostrativo finale, ed effettuare le integrazioni di ciclo con le sezioni recupero energetico e sottrazione della CO₂.

Nello specifico l'attività si articola in tre obiettivi intermedi:

A. Simulazioni stazionarie e dinamiche per lo sviluppo dei criteri di progettazione e di "scaling" di un bruciatore per slurry di carbone, operante in condizioni di "oxy-combustion flameless"

Prosegue l'attività avviata nel primo anno relativa alla determinazione dei criteri di scaling alla luce delle sperimentazioni e delle simulazioni condotte. Si tratta di un'attività teorico-sperimentale finalizzata alla comprensione delle fenomenologie di base del processo di oxy-combustione, alla verifica delle condizioni di combustione "flameless" ed alle scelte tecnologiche inerenti alla realizzazione di un dimostrativo da 50 MW_t.

È prevista l'effettuazione di simulazioni stazionarie dell'intero dominio reagente con codice RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), con approfondimento di aspetti legati alla granulometria ed al tipo di carbone, al contenuto di acqua nello slurry, alle caratteristiche di immissione dello slurry in camera di combustione, alla portata e temperatura dei gas ricircolati, a diverse configurazioni geometriche del combustore, nell'ottica del dimostrativo da 50 MWt.

Sono previste inoltre simulazioni dinamiche, con metodologia LES (Large Eddy Simulation), del processo di interazione del getto di slurry con l'ambiente del reattore, ed in particolare del fenomeno di rottura del getto di slurry e dell'interazione tra le diverse fasi di miscela. A tal fine viene applicato un codice LES proprietario (HeaRT^{*}) limitatamente alla zona primaria del reattore. Una accurata predizione delle caratteristiche termo-fluidodinamiche dell'iniezione comporta una migliore predizione dell'estensione della zona relativa all'iniezione ed alla gassificazione delle particelle di carbone. Ciò implica anche una migliore predizione della distribuzione di specie chimiche e di temperatura a monte della successiva zona di combustione.

L'attività di CFD viene supportata da una attività di modellazione di cinetica chimica, relativa alla modellazione della volatilizzazione e ossidazione del carbone del Sulcis. In questa attività, che prosegue dall'anno precedente, il modello di rilascio pirolitico dello zolfo sviluppato viene accoppiato ad un modello di degrado del carbone, per consentire la simulazione del degrado termico complessivo. Il modello è validato con i risultati sperimentali reperibili in letteratura o acquisiti ad hoc. Il modello di rilascio è accoppiato con una modellazione cinetica dettagliata in fase gas dei composti solforati (in particolare ossidazione di H₂S). uno schema cinetico in fase omogenea consente di caratterizzare l'ossidazione di H₂S in SO₂, per analizzare l'insorgenza i potenziali fenomeni corrosivi.

L'obiettivo si conclude con una indagine teorico-sperimentale sull'instaurarsi locale di condizioni "flameless" in un bruciatore a polverino di carbone. Tale attività analizza le strutture reattive che si instaurano in condizioni locali di flusso ricche di anidride carbonica ed vapore, cioè condizioni "flameless".

Parte delle sperimentazioni a supporto della validazione numerica è condotta sull'impianto pilota a oxycombustione ISOTHERM di Sofinter e sugli impianti FOSPER e l'IPFR di ENEL-IFRF (International Flame Research Foundation, Pisa).

B. Sviluppo e test sperimentali con diagnostica non invasiva per il monitoraggio ed il controllo del processo dinamico di oxy-combustione. Determinazione di parametri sintetici di stabilità.

L'attività ha come obiettivo lo sviluppo e/o l'applicazione di metodi diagnostici avanzati per: migliorare la comprensione della fenomenologia di base, verificare le condizioni "flameless", acquisire dati di processo (stabilità, velocità media, temperatura, concentrazioni), sviluppare tecniche e metodologie per il controllo, e validare le simulazioni. A tal fine viene utilizzata diagnostica di tipo non invasivo, acquisita o di brevetto ENEA.

La sperimentazione è condotta sull'impianto pilota ISOTHERM di Sofinter, da 5 MWt, su analogo impianto non pressurizzato FOSPER di IFRF (della stessa potenza) e su IPFR, sempre di IFRF, con l'ottica di sviluppare e mettere a punto metodi per la diagnostica di processo e controllo per un dimostrativo da 50 MWt.

C. Sviluppo di componenti e analisi di sistema. Sviluppo di una tecnologia innovativa di pompaggio della miscela acqua-carbone. Simulazioni di ciclo per l'efficientamento della centrale di potenza

Al fine di assicurare la stabilità di alimentazione dello slurry, viene sviluppata e provata un'innovativa tecnologia di pompaggio basata su un dispositivo volumetrico a pistoni di nuova concezione. L'attività si articolerà in due fasi:

messa a punto della tecnologia con prove di laboratorio condotte su facility ENEA in piccola scala. Vengono provate soluzioni tecniche alternative in relazione al tipo ed azionamento delle valvole, al tipo di diaframmi di separazione tra il fluido di processo (slurry) e quello ausiliario (olio), in grado di risolvere i problemi di continuità e stabilità riscontrati sui sistema di alimentazione dello slurry convenzionali;

 una volta verificata la tecnologia è prevista l'implementazione della dotazione diagnostica (trasduttori di pressione, accelerometri ecc.) in grado di fornire un ulteriore valore aggiunto rappresentato dalla capacità di "autodiagnostica" del componente stesso e il suo controllo anche in modalità remota.

Obiettivo dell'attività di efficientamento di ciclo è l'analisi delle possibili configurazioni impiantistiche finalizzate alla definizione ottimale di un impianto oxy-fuelled. Tale analisi prende come riferimento la configurazione sviluppata per l'impianto ISOTHERM da 5 MWt e le specifiche tecniche di quest'ultimo. Vengono esaminate differenti alternative di processo, volte ad ottenere da un parte rendimenti di ciclo elevati e dall'altra emissioni quasi nulle di gas serra e gli inquinanti più comuni.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Simulazioni stazionarie e dinamiche per lo sviluppo dei criteri di progettazione e di "scaling" di un bruciatore per slurry di carbone, operante in condizioni di "oxy-combustion flameless"

Simulazioni stazionarie per lo sviluppo di criteri di "scaling"

Nella progettazione di combustori industriali, fondamentali sono le prove effettuate su prototipi in scala. I risultati ottenuti possono essere estrapolati ai bruciatori in scala reale con la raccomandazione di usare opportuni criteri di scalatura per quanto riguarda le variabili in gioco nel processo, come ad esempio velocità, tempi di residenza, volumi, ecc.. In questa attività i progettisti devono correttamente tenere conto da una parte degli aspetti più propriamente chimici e dall'altra di aspetti legati alla fluidodinamica ed allo scambio termico.

Da un punto di vista generale, quindi, l'impiego di prototipi in scala è possibile perché l'analisi teorica approfondita consente di definire dei parametri fisico-matematici che consentono di "tradurre" e applicare all'esemplare reale, gli studi e i risultati ottenuti sul modello. I parametri coinvolti sono di tipo geometrico (dimensioni e forma), fisici (natura del fluido) e termofluidodinamici (condizioni di lavoro del fluido).

A questo scopo occorre precisare che due grandezze fisiche y' e y'' stanno in similitudine se esiste tra loro, in punti omologhi nello spazio e nel tempo, proporzionalità diretta, cioè se $y'' = c \cdot y'$, in cui c è il fattore di similitudine (costante). La similitudine non deve essere pensata come un fatto puramente geometrico, ma deriva dalle interazioni dei parametri geometrici con quelli che esprimono le condizioni di lavoro: quindi modello e oggetto potrebbero non differire solo per un fattore di scala.

La teoria della similitudine si basa sul teorema Π o di Buckingham. Il quale afferma che, scelta una funzione obiettivo y_1 descritta da n variabili:

$$Y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$$

il fenomeno rappresentato può essere studiato tramite una funzione ${\sf f_1}^*$ espressa in termini adimensionali:

$$\Pi y_1 = f_1^*(\pi_1, \pi_2, \pi_3, ..., \pi_n)$$

dove il numero di parametri adimensionali m è pari a n-q, essendo q il numero di unità fondamentali (lunghezza L, tempo T, massa M e temperatura Θ). Il teorema Π permette quindi di ridurre il numero di variabili da controllare. Questo indipendentemente dalla forma matematica assunta dalle funzioni f_1 e f_1^* . Per conoscere tali funzioni sarà poi necessario ricorrere alla sperimentazione.

Nel caso in oggetto, l'interesse è legato all'influenza che ha una variazione della potenza termica di un combustore sui criteri di progettazione, sulla caratterizzazione della fiamma, sulle emissioni, ecc...

I criteri maggiormente utilizzati nel caso di combustori industriali sono quello basato sulla invarianza della velocità e quello basato sulla invarianza del tempi di residenza. Il criterio basato sulla invarianza del numero di Reynolds viene usato raramente, in quanto nel caso di combustori industriali tipicamente tale numero è superiore a 10⁵.

o Criterio a invarianza della velocità

La relazione fondamentale per la potenza termica (Q) è la seguente:

$$Q = K\rho_0 U_0 D_0^2$$

dove ρ_0 , U_0 e D_0 si riferiscono rispettivamente alla densità del fluido in ingresso (tipicamente dell'aria di combustione), alla velocità del fluido in ingresso ed al diametro caratteristico del bruciatore (tipicamente diametro della gola del bruciatore). K è una costante di proporzionalità. Quando un bruciatore viene scalato, portandolo ad una diversa potenza, usando il criterio della velocità costante (U_0 =const), il nuovo diametro caratteristico è valutabile dalla seguente relazione:

$$D_0 \sim Q^{1/2}$$

quindi se si mantiene la similitudine geometrica del bruciatore, le altre dimensioni possono essere calcolate.

o Criterio a invarianza di tempo di residenza

In questo criterio si mantiene costante il rapporto D_0/U_0 . Tale rapporto rappresenta il tempo caratteristico convettivo. Ad alti numeri di Reynolds, tutti i tempi caratteristici (tranne quelli legati alla dissipazione a livello molecolare), sono proporzionali al suddetto rapporto.

Partendo dall'equazione $Q=K\rho_0U_0D_0^2$ ed imponendo il vincolo D_0/U_0 =const, si ottiene:

$$D_0 \sim Q^{1/3}$$

Nel caso di combustori a polverino di carbone, nei quali sia presente un forte ricircolo interno, dovuto alla presenza di flussi swirlati e/o generati dalla configurazione geometrica del combustore stesso, risulta importante la valutazione del grado di penetrazione delle particelle all'interno della zona di ricircolo. In prototipi di piccola scala il grado di penetrazione (dato dalla distanza di penetrazione divisa per la dimensione della zona di ricircolo) è sensibilmente maggiore di quanto non lo sia per i combustori a scala industriale. Questo tipo di problema può essere risolto prevedendo di usare una granulometria più fine per i combustori di piccola taglia.

Nella zona di fiamma all'interno di un combustore, le temperature sono determinate dalla velocità di reazione, dallo stretching e dal trasporto radiativo. Nella zona a valle, dove il rilascio termico dovuto alle reazioni chimiche è terminato, la velocità con la quale i prodotti di combustione diminuiscono la propria temperatura, è dovuto principalmente a scambio radiativo e convettivo.

Un aumento della potenza (quindi del carico termico) non deve influire sul campo di temperature nel combustore (nel caso non-adiabatico). Questo significa che nell'effettuare un'operazione di scalatura si devono tenere in debito conto gli effetti dello scambio termico radiativo e convettivo. Un criterio spesso adottato è quello di mantenere costante la frazione di energia scambiata per trasporto radiativo (frazione radiante).

Nel combustore ISOTHERM, funzionante a slurry di carbone, un componente importante, e per certi versi anche critico, è rappresentato dal sistema di pompaggio ed atomizzazione dello slurry. Nel processo di atomizzazione un volume di liquido (nel nostro caso slurry che sostanzialmente è una mistura di acqua e polverino di carbone), viene convertito in goccioline. Il problema della scalatura del reattore, appare principalmente un problema di scalatura dell'elemento essenziale del sistema, rappresentato dalla lancia di iniezione/atomizzazione dello slurry.

In un atomizzatore l'azione distruttiva delle forze aerodinamiche dovute ai getti ad alta velocità, è opposta alla forza di riaggregazione dovuta alla tensione superficiale ed alla viscosità. Quindi alla formazione di goccioline contribuiscono fondamentalmente due meccanismi, tenendo conto dei quali Lefebvre [1] ha formulato la seguente relazione empirica per l'atomizzazione di un liquido:

$$SMD/L_c = (A \cdot We^{-1/2} + B \cdot Z)(1 + W_F/W_A)$$

dove:

We = $\rho_A U_A^2 D_F / \rho_L$ (numero di Weber) con ρ_A densità, velocità dell'aria; ρ_L densità del liquido; D_F diametro dell'orifizio

W_F/W_A - rapporto tra la portata di combustibile e quella di aria

 $Z = \eta_F/(\sigma_L \rho_F D_F)^{1/2}$ (numero di Ohnesorge) con η_F viscosità apparente del combustibile; σ_L tensione superficiale;

SMD = diametro medio di Sauter delle goccioline

A, B = costanti

 L_c = lunghezza caratteristica.

Altre relazioni dello stesso tipo si possono ottenere partendo da considerazioni analoghe. Oltre all'SMD si può introdurre il parametro MMD (diametro medio di massa). I due parametri risultano approssimativamente proporzionali. In tal caso :

$$MMD/D_F = (A \cdot We^{-x} + B \cdot Z^{2x})(1 + W_F/W_A)^y$$

Queste relazioni esprimono in formule la dipendenza del diametro delle particelle ottenute dai due meccanismi citati: il "wave mechanism" (effetto della tensione superficiale) ed il "ligament mechanism" (effetto della viscosità del fluido). Le costanti delle relazioni riportate vanno determinate per ogni tipologia di atomizzatore, interpolando i dati sperimentali. Le dimensioni delle particelle di carbone incidono sulla dimensione delle particelle di slurry atomizzate e sul valore delle costanti. La presenza di particelle di carbone comporta una variazione del meccanismo fondamentale che determina la distribuzione delle particelle atomizzate, con la predominanza dell'effetto della viscosità del combustibile rispetto alla sua tensione superficiale. Molto importante risulta

l'effetto di impacchettamento delle particelle tra di loro, che dipende dal tipo di macinazione del carbone. Pertanto nella scalatura della lancia occorre considerare l'effetto dei parametri fisici riportati, garantendo che questi (velocità e proprietà dei fluidi, dimensioni caratteristiche) varino in modo da mantenere la stessa qualità dell'atomizzazione.

Simulazioni

Il problema della scalatura del combustore ISOTHERM, in questa prima fase, è stato affrontato con un approccio basato sulla invarianza della velocità in ingresso del combustibile (slurry e vapore) e del comburente (gas ricircolati arricchiti di ossigeno). Si è supposto che la lancia di iniezione dello slurry e del fluido atomizzatore (vapore), venga scalata in modo tale da mantenere costanti la velocità di vapore e slurry e la distribuzione granulometrica delle particelle atomizzate. Applicando il criterio della velocità costante, si ricavano i diametri del bruciatore, tali da garantire l'uguaglianza delle velocità per le nuove portate, anche considerando che la pressione operativa del reattore scalato sarà di 10 bar anziché 4. Il diametro del reattore è ricavato mantenendo la stessa proporzionalità tra diametro del reattore e diametro del bruciatore, mentre la sua lunghezza è ricavata imponendo lo stesso rapporto potenza/volume. In definitiva, le dimensioni del reattore risultano D= 2,56 m e L= 11,35 m. In questo modo si ottiene un reattore scalato geometricamente simile a quello reale.

Si è simulato il combustore in una configurazione verticale (così come si prevede che sarà esercito) con ingresso dello slurry dall'alto e l'uscita fumi in basso (le figure seguenti sono rappresentate orizzontalmente per motivi di grafica, ma si deve pensare che il verso del vettore accelerazione di gravità sia quello che va dall'ingresso all'uscita). Tale configurazione permette una più agevole rimozione delle scorie vetrificate sul fondo della camera di combustione.

Per quanto riguarda la modellistica utilizzata nelle simulazioni e la griglia di calcolo si rimanda al rapporto tecnico completo disponibile sul sito ENEA. Sono state prese in considerazione due tipologie di granulometrie per il carbone dello slurry: una più fine ed una più grezza. Di seguito riportiamo i risultati delle simulazioni condotte nelle condizioni operative riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Condizioni operative adottate nella simulazione

	50 W	50 MW
Portata ricircolata	3740 kg/h a 510 K (parzialmente swirlata)	37400 kg/h a 510 K (parzialmente swirlata)
Portata carbone	$508~kg/h$ Distribuzione granulometrica Rosin-Rammler (grossa: d_{min} =0,08 mm d_{max} =0,85mm; fine: d_{min} =0.004mm d_{max} =0.2mm).	5080~kg/h Distribuzione granulometrica Rosin-Rammler (grossa: d _{min} ==0,08 mm d _{max} =0,85 mm; fine: d _{min} ==0,004mm d _{max} =0,2mm).
Contenuto d'acqua dello slurry	47 % in massa.	47 % in massa
Portata vapore propellente	220 kg/h a 474 K	2200 kg/h a 474 K
Pressione operativa	400 kPa	1000 kPa.
Parete	T=1600 K uniforme	1600 K uniforme
Modello di devolatilizzazione	FGDVC	FGDVC.

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni.

Granulometria fine

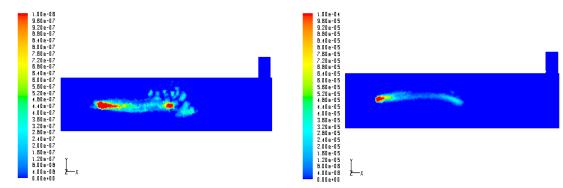


Figura 1. DPM Burnout (kg/s) per \$ MW e 50 MW

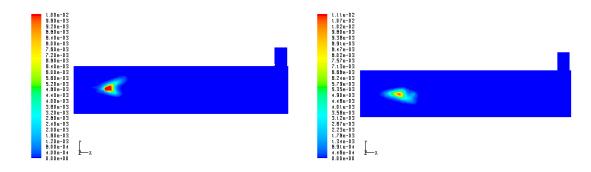


Figura 2. CH₄ Mass Fraction per 5 MW e 50 MW

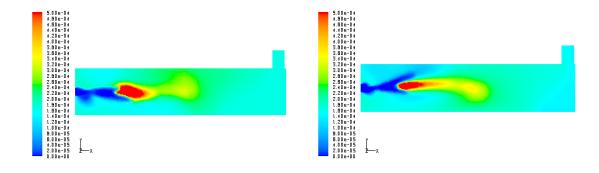


Figura 3. OH Mass Fraction per 5 MW e 50 MW

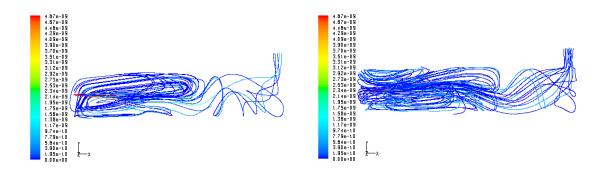


Figura 4. Particle Mass (kg) per 5 MW e 50 MW

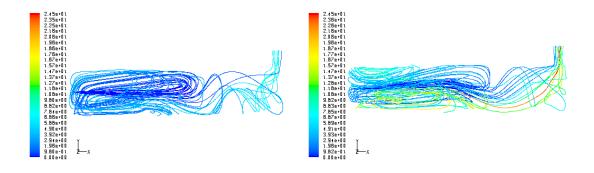


Figura 5. Residence Time (s) per 5 MW e 50 MW

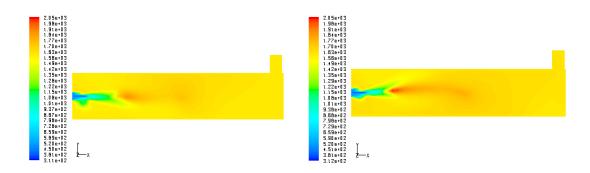


Figura 6. Temperature (K) per 5 MWe 50 MW

Naturalmente mantenendo costante la velocità, i tempi di residenza cambiano. In particolare aumentano per il fatto che le dimensioni geometriche sono maggiori. Questo fatto è chiaramente visibile dall'esame comparato della Figura 5 dove si riportano le traiettorie delle particelle colorate con i tempi di residenza: in uscita si vedono particelle che sono rimaste all'interno della camera di combustione per un tempo maggiore.

Questo stato di cose ha una influenza anche sulle altre variabili. Dall'esame della Figura 1 si vede che la maggior parte della fase carboniosa brucia nella prima parte della camera di combustione relativa alla potenza maggiore (50 MW), mentre nel caso della potenza minore la combustione arriva fin oltre la metà della camera di combustione. Per entrambe le potenze, comunque, osservando la Figura 4 si può notare che le particelle arrivano completamente bruciate in prossimità dell'uscita del combustore.

Per quanto riguarda il campo di temperature, osservando la Figura 6, è da notare come si abbia una sostanziale uniformità di comportamento del combustore da 5 MW e di quello da 50 MW. E' questo un importante risultato in quanto aumentando il carico termico di un combustore, effettuando lo scaling, non si vogliono variare le temperature in uscita del combustore stesso.

Granulometria grossa

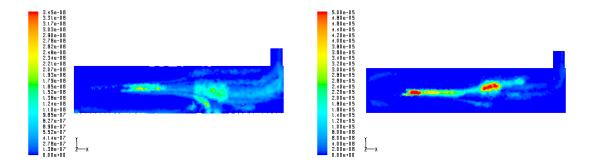


Figura 7. DPM Burnout (kg/s) per 5 MW e 50 MW

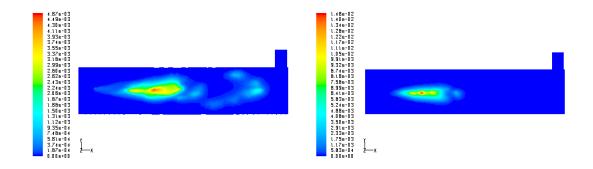


Figura 8. CH₄ Mass Fraction per 5 MWe 50 MW

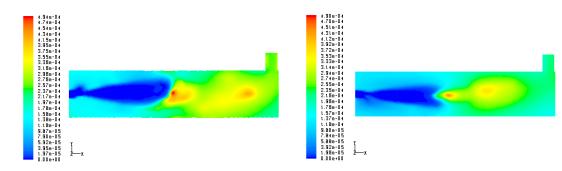


Figura 9. OH Mass Fraction per 5 MW e 50 MW

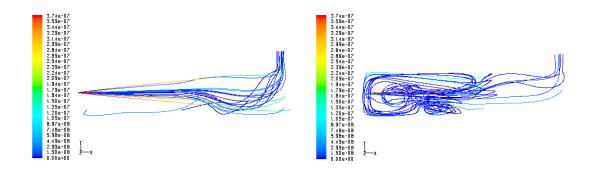


Figura 10. Particle Mass (s) per 5 MW e 50 MW

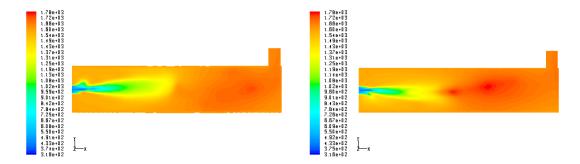


Figura 11. Temperature (K) per 5 MW e 50MW

Nel caso della granulometria grossa, accanto a considerazioni analoghe al caso della granulometria fine, si devono fare alcune osservazioni legate proprio alla tipologia di granulometria, la quale determina un'ulteriore differenza di comportamento tra i due combustori.

Una osservazione che si può fare è che mentre nel caso della granulometria fine le particelle arrivano già completamente combuste all'uscita per entrambe le potenze, nel caso della granulometria grossa la lunghezza del

combustore più piccolo non è sufficiente a far si che le particelle brucino completamente. Inoltre, in questo caso, il moto di tali particelle è dominato dall'inerzia, per cui ricircolano poco e vanno direttamente verso l'uscita ed una frazione non trascurabile urta il fondo del combustore. In generale, l'effetto della verticalità del reattore, dal punto di vista dei campi ottenuti, è da ritenersi trascurabile.

Simulazioni dinamiche

Le simulazioni dinamiche del processo di interazione del getto di slurry con l'ambiente del reattore, condotte con metodologia LES (Large Eddy Simulation) e ricorrendo ad un codice proprietario (HeaRT®), cono state effettuate in collaborazione con l'Università di Roma "la Sapienza" - Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica (DMA).

Implementazione in HeaRT di modelli numerici adatti per simulazioni di processi multifase

Sulla base di un'analisi dei modelli multifase disponibili in letteratura per simulazioni Large Eddy, realizzata in un precedenza, è stato adottato un modello multifase mesoscopico che risolve la fase dispersa in una formulazione euleriana. Scopo di questa linea è stato quello di implementare tale modello nel codice HeaRT, sviluppando le opportune boundary conditions per una miscela multifase e riscrivendo le equazioni che governano i fenomeni in modo da poter trattare geometrie sia cartesiane che cilindriche.

Nel dettaglio le attività hanno riguardato:

- il trattamento automatico di coordinate cilindriche e cartesiane. Le equazioni già implementate in HeaRT e quelle relative al modello mesoscopico sono state riformulate con l'introduzione di un parametro fissato esternamente che ne consente il passaggio automatico da un sistema di riferimento in coordinate cilindriche ad uno in coordinate cartesiane. Sono state anche realizzate le condizioni al contorno per geometrie che necessitano di coordinate cartesiane. E' stato infine valutata l'eventuale estensione ad un sistema di riferimento sferico;
- lo sviluppo di condizioni al contorno non riflessive per le equazioni del modello mesoscopico. Diversamente da quanto inizialmente previsto, poiché le equazioni della fase dispersa sono del tipo noto come pressure-less, tali equazioni non risentono di pertubazioni provenienti da valle del flusso e pertanto non è stato necessario implementare condizioni al contorno non riflessive per la fase dispersa. Sono stati altresì aggiunti i necessari termini sorgente nella formulazione delle condizioni NSCBC per la fase gas.
- o Implementazione in HeaRT di modelli LES e loro validazione mediante simulazioni multifase

Quest'attività ha avuto come scopo lo sviluppo di un modello euleriano per la simulazione di una miscela multifase, la messa a punto di un modello radiativo già presente in HeaRT ma che presentava alcuni vincoli di applicabilità, e la validazione di tali modelli mediante la simulazione di un combustore operante in modalità multifase (caso Sommerfield . Le attività svolte sono riassumibili nei seguenti punti:

- sviluppo di un modello Euleriano polidisperso. Poiché il polverino di carbone utilizzato nelle tecnologie di interesse della ricerca ha una certa granulometria, per simularla è stato necessario sviluppare ed implementare una versione polidispersa (a classi) del modello multifase mesoscopico.
- riformulazione del modello radiativo M1. Il modello radiativo precedentemente implementato in HeaRT è quello noto come M1. Si tratta di un modello diffusivo con un tensore di Eddington modificato ed è stato implementato in versione quasi stazionaria. E' stato osservato che la formulazione del modello M1 implementata non conserva alcune proprietà delle equazioni di partenza del modello: in particolare, nascono dei problemi nel caso di assenza di specie assorbenti o radianti. Tali problemi sono stati analizzati e risolti. Inoltre si è valutata la possibilità di risolvere le equazioni quasi stazionarie del modello M1 con un metodo più accurato ed efficiente.
- validazione dei modelli mediante la simulazione di un test-case di letteratura. Al fine di validare le prestazioni della versione multifase del codice HeaRT, si è scelto di procedere alla simulazione di un caso test accademico, ben noto in letteratura (Somerfeld&Qiu). Tale caso test consiste in una camera di prova cilindrica, nella quale affluisco due correnti d'aria a temperatura ambiente: una corrente primaria con direzione del flusso assiale ed una secondaria, coassiale alla prima, swirlata con numero di swirl pari a 0,47. Tale configurazione è di interesse per applicazioni nella generazione di potenza, sebbene il numero di Reynolds (~50.000) sia in questo caso notevolmente inferiore rispetto a quanto si possa trovare nella pratica. Particelle di vetro, le cui dimensioni sono comprese nel intervallo 15-80 μm, sono introdotte nella corrente primaria e la loro velocità media e fluttuazioni sono riportate per 8 distinte sezioni trasversali della camera di prova. Per ogni sezione le misure sono riportate ad 8 distinti diametri. Tale database sperimentale

costituisce, grazie anche alla complessa struttura del flusso, un eccellente banco di prova per verificare la capacità del codice HeaRT di riprodurre il trasporto in sistemi multifase.

Come mostrato nelle figure riportate più avanti nel documento, il codice HeaRT si è dimostrato in grado di riprodurre la struttura del flusso sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. É da sottolineare come, in particolare, le strutture turbolente risolte siano in grado di interagire con le particelle portando rapidamente alla dispersione del getto iniziale. In Figura 14 è riportato in particolare una isosuperficie di densità volumetrica di fase dispersa. Appare qui evidente in particolare l'effetto della componente di swirl del campo di velocità della fase gas sulla dispersione del getto di fase dispersa.

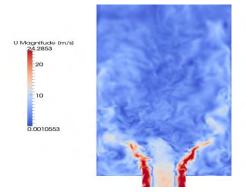
Sebbene la simulazione mostri risultati soddisfacenti, essa ha anche mostrato i limiti del modello mesoscopico. Questi portano in particolare ad una accumulo non fisico delle particelle nelle zone di ristagno. Possibili miglioramenti del modello per migliorare questo aspetto sono stati studiati ed in via di implementazione.

o Simulazioni del combustore a tecnologia ISOTHERM

E' stato effettuato uno studio preliminare del combustore ISOTHERM mediante simulazioni numeriche LES condotte con il codice HeaRT arricchito dei modelli fisico-numerici per flussi multifase sviluppati ad hoc. Le principali azioni hanno riguardato:

- interpolazione tra griglie diversamente strutturate. Il codice HeaRT è stato revisionato completamente, mediante l'introduzione di nuove strutture dati ed algoritmi opportuni, al fine di poter gestire domini di calcolo con griglie sovrapposte a diversa risoluzione spaziale e conseguentemente con diversi passi di integrazione temporale. Tale sviluppo è risultato necessario per poter applicare la tecnica di "mesh refinement" dinamico, la cui struttura è implementata in HeaRT;
- simulazione del combustore ISOTHERM. Le simulazioni LES del combustore ISOTHERM sono state focalizzate sulla termo-fluido-dinamica del getto di slurry e vapore e sull'interazione di questo con i prodotti di combustione caldi ricircolati. La fase gas è stata assunta come fase continua, quella solida come fase dispersa. Inoltre, poiché la fase liquida viene iniettata sotto forma di gocce molto piccole (che si suppongono di circa 5 micron, non avendo riscontri sperimentali), è lecito assumerla come uno scalare passivamente trasportato dal gas e soggetto ad evaporazione. Fatte queste assunzioni, le prime simulazioni hanno avuto lo scopo di valutare l'accuratezza dei modelli fisici e numerici implementati e di permettere un'analisi di massima del campo termofluidodinamico all'interno del combustore. In tale studio sono state fatte le seguenti assunzioni semplificatrici:
 - fase dispersa solida di carbone monodispersa, assumendo il diametro medio di Sauter D32;
 - esclusione del modello di trasporto radiativo dell'energia;
- riduzione del dominio di calcolo alla zona di iniezione dello slurry. Tale semplificazione è stata necessaria per ragioni di costo computazionali volendo adottare modelli dettagliati di devolatilizzazione; ciò anche in ragione del fatto che tale fenomeno risulata di primaria importanza nella fase di iniezione del getto.

Lo studio, qualitativo a causa della non disponibilità di dati sperimentali, ha portato a ritenere che i modelli implementati siano soddisfacenti per simulare processi di ossicombustione del carbone; sono tuttavia necessarie ulteriori simulazioni su casi test che permettano un confronto con dati sperimentali, al fine di validare il codice HeaRT per questo tipo di applicazioni e di indirizzare gli ulteriori sviluppi dei modelli implementati.



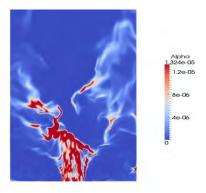
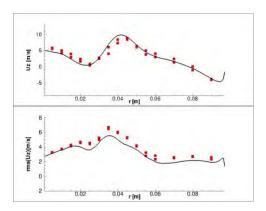


Figura 12. Validazione del Codice HeaRT su Sommerfeld & Qiu tet case: campo di velocità della fase gas (sinistra) e frazione volumetrica della fase dispersa (destra)



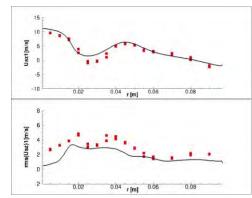


Figura 13. Validazione del Codice HeaRT su Sommerfeld & Qiu test case: confronto tra velocità assiale misurata (simboli) e simulata (linee), per la fase gas (sinistra) e per la fase dispersa (destra) a 52 mm dall'ingresso in camera test. Nella parte alta delle figure sono riportate le velocità medie mentre in basso sono mostrate le fluttuazioni rms

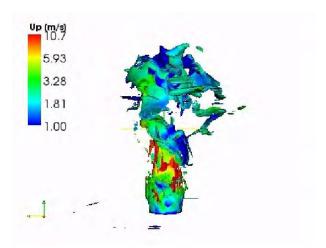


Figura 14. Isosuperficie di Frazione volumetrica 🗈 = 1.E-5 della fase dispersa colorata in base alla velocità della stessa per il caso test Sommerfeld & Qiu

Cinetica chimica

L'attività di CFD è stata supportata da un'ampia attività di modellazione cinetica, svolta in collaborazione con il Politecnico di Milano, l'Università di Roma "La Sapienza" e l'Università di Napoli Federico II.

o Sviluppo di modelli chimico/fisici della gassificazione e combustione di carbone Sulcis

L'attività, svolta dal Politecnico di Milano (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica) si è incentrata su due aspetti fondamentali, da un lato il rilascio di composti azotati dal carbone, dall'altro lo studio dei meccanismi cinetici di ossidazione di composti solforati e azotati in fase gas, le loro interazioni e quelle con altri composti del sistema.

Diverse le motivazioni che hanno condotto e guidato questa attività di ricerca. In primo luogo l'analisi dell'impatto ambientale del carbone. La comprensione dei fenomeni chimici sono un aspetto fondamentale nello sviluppo di tecniche di controllo delle emissioni. Questa attività risulta inoltre una naturale prosecuzione dello studio precedentemente eseguito relativo al rilascio di composti solforati dal carbone.

Base comune a questi modelli è la relativa complessità rispetto a quanto generalmente proposto in letteratura, che descrive la volatilizzazione da combustibili solidi attraverso pochi atti elementari con parametri che necessitano per la loro determinazione di specifiche informazioni sperimentali. La complessità proposta in questo lavoro consente una maggiore accuratezza nelle stime su ampi campi di condizioni operative, che spaziano in termini di temperature, velocità di riscaldamento e tempi caratteristici, ma soprattutto risulta in un modello completamente predittivo, che necessita unicamente della composizione elementare del carbone di partenza. Il modello è proposto in una forma convenzionale, facilmente implementabile in codici fluidodinamici.

D'altro lato anche la successiva evoluzione in fase gas di composti solforati e azotati, la loro ossidazione e soprattutto le loro interazioni e quelle con le altre specie presenti nel sistema richiedono apposite investigazioni.

E' infine da sottolineare come, comunque, le informazioni sperimentali riferite a questi sistemi (sia eterogenei che omogenei) siano ancora insufficienti per avere un quadro completo che consenta di affinare modelli di tipo predittivo. E' altresì da considerare l'elevata variabilità delle misure inerenti il carbone in generale, data l'intrinseca disomogeneità di questo combustibile. Inoltre gli studi cinetici della pirolisi (e combustione) di solidi soffrono dell'impatto dovuto alla presenza di importanti fenomeni di trasporto che risultano essere in alcuni casi gli atti controllanti.

Pur con le incertezze qui proposte i modelli sviluppati sono in ragionevole accordo con i dati sperimentali, ma soprattutto sembrano in grado di prevedere gli andamenti delle emissioni al variare delle condizioni operative.

o Rilascio di composti azotati da carbone

L'approccio seguito è del tutto analogo, in linea di principio, a quanto proposto per il rilascio di composti solforati. I carboni contengono dallo 0,5 al 2% in peso di azoto, ed in particolare carboni con una composizione di circa l'85% di carbonio hanno il più alto tenore di azoto. L'azoto è quasi totalmente di natura organica ed è incorporato all'interno delle macromolecole di carbone sotto forma di strutture aromatiche eterocicliche, come strutture pirroliche (a 5 atomi), strutture piridiniche (a 6 atomi) e strutture quaternarie. L'azoto quaternario evolve a temperature relativamente basse, mentre le forme piridiniche e pirroliche risultano più stabili liberandosi a temperature maggiori.

Dall'analisi della letteratura, è possibile evidenziare un'elevata dispersione delle differenti forme azotate in funzione del rango del carbone. A seguito di ciò e per prevenire errori derivanti da estrapolazione si è scelto di utilizzare semplici correlazioni lineari, analoghe a quelle sviluppate per la volatilizzazione della porzione carboniose del carbone.

Il meccanismo di rilascio delle specie azotate durante il processo di volatilizzazione può avvenire secondo due differenti meccanismi:

- assieme al tar, per rottura dei legami C-C;
- come specie gassose, a seguito della rottura dei legami C-N nell'anello.

Le maggiori incertezze relative al rilascio di specie azotate si riscontrano a livello di specie gassose azotate rilasciate. La decomposizione produce principalmente HCN, NH₃ ed in misura minore HNCO.

Sulla scorta di quest'analisi e delle informazioni reperibili in letteratura si è giunti a proporre un modello di volatilizzazione multi-step, privo di cinetiche ad energia distribuita e/o coefficienti stechiometrici variabili a seconda della natura del carbone. Ogni specie di riferimento evolve secondo il proprio sottomodello cinetico ed il processo di volatilizzazione complessivo è ottenuto come semplice combinazione massiva della pirolisi dei singoli composti di riferimento.

Il modello cinetico proposto si poggia sulle stesse famiglie di reazione del modello cinetico di volatilizzazione del carbone:

- reazioni di bassa temperatura;
- reazioni di alta temperatura;
- reazioni di cross-linking;
- reazioni di thermal annealing.

In Figura 15 vengono riportati in maniera schematica i meccanismi di reazione del modello di pirolisi.

In condizioni di bassa velocità di riscaldamento, le specie di riferimento, denominate COAL-N₁, COAL-N₂, COAL-N₃ e COAL-N_{char}, strettamente connesse alle specie chiave COAL₁, COAL₂, COAL₃, CHAR_C dello schema cinetico di pirolisi del carbone, sono incluse all'interno di una fase denominata metaplasto, simile ad una fase condensata. Pseudo-specie, che sono i precursori delle specie volatili, (indicate nello schema cinetico con soprascritto '*':

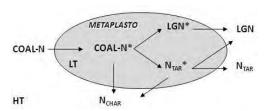


Figura 15. Schema semplificato del chimismo del processo di volatilizzazione

 NH_3 , HCN, N_{TAR}) sono il risultato della decomposizione di bassa temperatura delle specie di riferimento. In queste condizioni la loro energia non è sufficiente a garantire un rilascio diretto in fase gas, rimanendo cosi intrappolate nelle fase metaplasto, pronte per essere rilasciate come specie gassose o come specie tar (NH_3, HCN, N_{TAR}) solo quando la temperatura sarà sufficientemente elevata.

L'energia di attivazione del processo di decomposizione di bassa temperatura è dell'ordine di 33-40 kcal/mol. In condizioni di bassa temperatura, le specie tar ancora intrappolate nella fase metaplasto possono reagire con i frammenti solidi della matrice carboniosa, N_{CHAR}, dando luogo a meccanismi cinetici di polimerizzazione e di reticolazione che prendono il nome di reazioni di cross-linking. Il risultato è un minor rilascio di specie N_{TAR} ed un incremento dell'azoto contenuto sia nella matrice solida sia in fase gas.

In condizioni di alta temperatura, le specie azotate decompongono direttamente in fase gas e tar, senza passare attraverso la fase metaplasto, come indicato in Figura 15. L'energia di attivazione delle reazioni di alta temperatura è compresa tra 61 e 75 kcal/mol. In condizioni di alta velocità di riscaldamento, il diretto rilascio di N_{TAR} domina sulle reazioni di reticolazione e di cross-linking. I parametri cinetici delle reazioni che contemplano le specie N_{TAR} sono presi analogamente a quelli di volatilizzazione del carbone.

Tabella 2. Meccanismo cinetico di pirolisi delle specie azotate

	Meccanismo Cinetico	[A]	[E _{ATT}]
1	$COAL-N_1 \rightarrow 0.1 \text{ NH}_3^* + 0.05 \text{ HCN}^* + 0.85 \text{ N}_{CHAR}$	7.0×10 ⁷	40000
2	$COAL-N_1 \longrightarrow N_{TAR}^*$	1,0×10 ⁸	40000
3	$COAL-N_1 \rightarrow 0.1 \text{ NH}_3 + 0.25 \text{ HCN} + 0.65 \text{ N}_{CHAR}$	6,0×10 ¹⁴	75000
4	$COAL-N_1 \longrightarrow N_{TAR}$	1,0×10 ¹⁴	75000
5	$COAL-N_2 \rightarrow 0.2 \text{ NH}_3^* + 0.05 \text{ HCN}^* + 0.75 \text{ N}_{CHAR}$	3,0×10 ¹⁰	36000
6	$COAL-N_2 \rightarrow N_{TAR}^*$	5,0×10 ¹⁰	36000
7	$COAL-N_2 \rightarrow 0,15 \text{ NH}_3 + 0,3 \text{ HCN} + 0,55 \text{ N}_{CHAR}$	5,0×10 ¹⁷	63000
8	$COAL-N_2 \longrightarrow N_{TAR}$	4,0×10 ¹⁷	63000
9	$COAL-N_3 \rightarrow 0,15 \text{ NH}_3^* + 0,15 \text{ HCN}^* + 0,7 \text{ N}_{CHAR}$	2,0×10 ¹⁰	33000
10	$COAL-N_3 \longrightarrow N_{TAR}^*$	1,6×10 ⁹	33000
11	$COAL-N_3 \rightarrow 0.1 \text{ NH}_3 + 0.15 \text{ HCN} + 0.75 \text{ N}_{CHAR}$	2,0×10 ¹⁸	61000
12	$COAL-N_3 \longrightarrow N_{TAR}$	9,0×10 ¹⁸	61000
13	$N_{TAR}^* \longrightarrow N_{TAR}$	1,0×10 ⁶	32500
14	$N_{CHAR} + N_{TAR} \rightarrow 0.1 \text{ NH}_3 + 0.1 \text{ HCN} + 1.8 \text{ N}_{CHAR}$	7,5×10 ⁷	33000
15	$NH_3^* \longrightarrow NH_3$	4,0×10 ²	23000
16	$HCN^* \rightarrow HCN$	7,0×10 ²	23000
17	$N_{CHAR} \longrightarrow CHAR_C + HCN$	7×10 ⁹	80000

Il modello cinetico è stato convalidato utilizzando informazioni sperimentali riportate in letteratura.

Nelle Tabella 3 vengono riassunte le informazioni sperimentali utilizzate per la convalida del modello cinetico di pirolisi delle specie azotate.

Tabella 3. Condizioni di sperimentazioni di differenti autori

Autore	n° carboni	Velocità [k/s]	T finale	Specie
Bassilakis	8	0.5	1173	NH ₃ HCN
De Long	1	0.5	1173	NH ₃ HCN
Fletcher	5	10 ⁴	1050-1250	Totale Volatili
Hambly	5	10 ⁴	820-1020- 1220	Totale Volatili
Pohl	1	1	2000	N _{CHAR}
Genetti	12	10 ⁵	1641	Totale Volatili
Nomura	5	3000	1350	Totale Volatili
Chen	4	10 ⁴	1270	N _{TAR} HCN

A titolo di esempio si veda il confronto tra dati sperimentali (proposti da Bassilakis et al., 1993) e predizioni del rilascio di NH₃ e HCN al variare della percentuale di carbone presente (Figura 16).

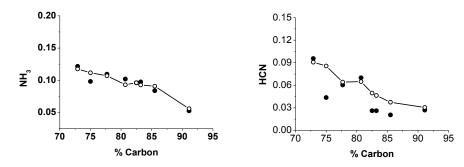


Figura 16. Rilascio di NH₃ e HCN in funzione della percentuale di carbone

Ossidazione dei composti solforati in fase gas e loro interazione con composti azotati

La conoscenza della chimica dello zolfo in fase gas risulta di fondamentale importanza una volta nota la composizione e la quantità di composti solforati rilasciati dalla fase solida.

Vi è un generale consenso in letteratura che, alle temperature di fiamma, la reazione proceda secondo la sequenza generale:

Fuel-S
$$\rightarrow$$
 RS \rightarrow SO \rightarrow SO₂ (\rightarrow SO₃)

dove RS è un radicale contenente zolfo, quale SH, CS, CH₃S o S.

I dati disponibili indicano che la formazione di SO₂ nelle fiamme è rapida, avvenendo su una scala di tempi comparabile a quella delle reazioni di ossidazione del combustibile.

Il meccanismo sviluppato e proposto in questo lavoro, può essere suddiviso in sottomeccanismo che riguardano:

- Reazioni degli SO_x
- Reazioni degli H_xSO_v
- Reazioni degli H_xS_v
- Reazioni SO_x-CO_x
- Reazioni SO_x-NO.

In tabella 4 viene riportato il dettaglio delle reazioni con le costanti cinetiche assunte.

Tabella 4. Meccanismo cinetico dello zolfo. Le costanti cinetiche vengono espresse in m-mol-s-K, secondo l'equazione $k=A.T^{\beta}$ exp(-Ea/RT)

	Reazione	А	β	Ea
	Reazioni degli SO _x			
1	SO+M=S+O+M	.4000E+15	.000	107000.0
2	SO+H+M=HSO+M	.1900E+21	-1.310	662.0
	N ₂ /1.50/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/			
3	SO+OH=SO ₂ +H	.1100E+18	-1.350	.0
	SO+OH(+M)=HOSO(+M)	.1600E+13	.500	-400.0
	LOW/.9500E+28 -3.480 970.0/			
	N ₂ / 1.50/SO ₂ /10.00/H ₂ O/10.00/			
4	SO+HO ₂ =SO ₂ +OH	.3655E+04	2.420	7660.0
5	SO+O ₂ =SO ₂ +O	.7600E+04	2.370	2970.0
6	$SO+O(+M)=SO_2(+M)$.3200E+14	.000	.0
	LOW/ .1200E+22 -1.540 .0/			
	TROE/ .5500 .1000E-29 .1000E+31/			
	N ₂ / 1.50/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/			
7	SO(S)+M=SO+M	.1000E+14	.000	.0
8	$SO(S)+O_2=SO_2+O$.1000E+14	.000	.0
9	SO ₂ +OH=HOSO+O	.3900E+09	1.890	76000.0
10	SO ₂ +CO=SO+CO ₂	.1900E+14	.000	65900.0
11	SO ₂ +S=SO+SO	.6000E-15	8.210	9600.0
12	SO ₂ +H(+M)=HSO ₂ (+M)	.5300E+09	1.590	2470.0
	LOW/ .1400E+32 -5.190 4510.0/			
	TROE/ .3900 167.0 2191./			
	N ₂ / 1.00/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/			

	Reazione	А	β	Ea
13	SO ₂ +H(+M)=HOSO(+M)	.2400E+09	1.630	7340.0
	LOW/ .1800E+38 -6.140 11070.0/			
	TROE/ .2830 272.0 3995. /			
14	N ₂ / 1.00/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/ SO ₂ +O(+M)=SO ₃ (+M)	.3700E+12	.000	1689.0
14	LOW/ .2400E+28 -3.600 5186.0/	.3700E+12	.000	1009.0
	TROE/ .4420 316.0 7442./			
	N ₂ / .00/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/			
15	(+M)SO ₂ +O+N ₂ =(+M)SO ₃ +N ₂	.3700E+12	.000	1689.0
16	LOW/ .2900E+28 -3.580 5206.0/			
17	TROE/.4300 371.0 7442. / SO ₂ +OH(+M)=HOSO ₂ (+M)	.5700E+13	270	.0
	LOW/ .1700E+28 -4.090 .0/	157662*15	1270	
	TROE/ .1000 .1000E-29 .1000E+31			
	N ₂ / 1.00/SO ₂ / 5.00/H ₂ O/ 5.00/			
18 19	SO ₂ +SO ₂ =SO ₃ +SO	.5000E+08	2.000	75000.0
20	SO ₃ +H=SO ₂ +OH SO ₃ +H=HOSO+O	.8400E+10 .2500E+06	1.220 2.920	3320.0 50300.0
21	SO ₃ +0=SO ₂ +O ₂	.2800E+05	2.570	29200.0
22	SO ₃ +OH=SO ₂ +HO ₂	.4800E+05	2.460	27250.0
23	SO ₃ +S=SO+SO ₂	.5120E+12	.000	.0
24	S+O ₂ =SO+O	.2000E+03	1.93	1400
	Reazioni dell'H _x SO _y			
25	HSO+H=SO(S)+H ₂	.1000E+14	.000	.0
26	HSO+OH=SO(S)+H ₂ O	.1000E+14	.000	.0
27	HSO+H=HSOH	.2500E+21	-3.140	920.0
28	HSO+H=SH+OH	.4900E+20	-1.860	1560.0
29	HSO+H=S+H ₂ O	.1600E+10	1.370	-340.0
30	HSO+H=H₂SO HSO+H=H₂S+O	.1800E+18 .1100E+07	-2.470 1.030	50.0 10400.0
32	HSO+H=SO+H ₂	.1100E+07	.000	.0
33	HSO+O+M=HSO ₂ +M	.1100E+20	-1.730	-50.0
34	HSO+O=SO ₂ +H	.4500E+15	400	.0
35	HSO+O+M=HOSO+M	.6900E+20	-1.610	1590.0
36	HSO+O=O+HOS	.4800E+09	1.020	5340.0
37	HSO+O=OH+SO	.1400E+14	.150	300.0
38	HSO+OH=HOSHO HSO+OH=HOSO+H	.5200E+29 .5300E+08	-5.440 1.570	3170.0 3750.0
40	HSO+OH=SO+H ₂ O	.1700E+10	1.030	470.0
41	HSO+O ₂ =HSO ₂ +O	.8400E-06	5.100	11312.0
42	HSOH=SH+OH	.2800E+40	-8.750	75200.0
43	HSOH=S+H ₂ O	.5800E+30	-5.600	54500.0
44	HSOH=H ₂ S+O	.9800E+17	-3.400	86500.0
45	HOSO(+M)=HSO ₂ (+M) LOW/ .1700E+36 -5.640 55400.0/	.1000E+10	1.030	50000.0
	TROE/ .4000 .1000E-29 .1000E+31			
	N ₂ / 1.00/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/			
46	HOSO+M=O+HOS+M	.2500E+31	-4.800	119000.0
47	HOSO+H=SO ₂ +H ₂	.1800E+08	1.720	-1286.0
48 49	HOSO+H=SO(S)+H ₂ O	.2400E+15 .6000E+13	.000	.0
50	HOSO+OH=SO ₂ +H ₂ O HOSO+O ₂ =HO ₂ +SO ₂	.9600E+13	.000 2.355	.0 -10130.0
51	HSO ₂ +H=SO ₂ +H ₂	.5000E+13	.460	-262.0
52	HSO ₂ +OH=SO ₂ +H ₂ O	.1000E+14	.000	.0
53	HSO ₂ +O ₂ =HO ₂ +SO ₂	.1100E+04	3.200	-235.0
54	H ₂ SO=H ₂ S+O	.4900E+29	-6.660	71700.0
55	HOSHO=SO+H	.6400E+31	-5.890 -2.590	73800.0
56 57	HOSHO=SO+H ₂ O HOSHO+H=HOSO+H ₂	.1200E+25 .1000E+13	-3.590 .000	59500.0 .0
58	HOSHO+O=HOSO+OH	.5000E+13	.000	.0
59	HOSHO+OH=HOSO+H ₂ O	.1000E+13	.000	.0
60	HOSO ₂ =HOSO+O	.5400E+19	-2.340	106300.0
61	HOSO ₂ =SO ₃ +H	.1400E+19	-2.910	54900.0
62	HOSO ₂ +H=SO ₂ +H ₂ O	.1000E+13	.000	.0
63 64	HOSO ₂ +O=SO ₃ +OH HOSO ₂ +OH=SO ₃ +H ₂ O	.5000E+13 .1000E+13	.000	.0
65.	HOSO ₂ +OH=SO ₃ +H ₂ O HOSO ₂ +O ₂ =HO ₂ +SO ₃	.1000E+13 .7800E+12	.000	656.0
	Reazioni degli H _x S _y		.555	555.5
	- ,	62005:47	600	
66 67	S+H+M=SH+M S+OH=H+SO	.6200E+17 .3970E+14	600 .000	.0
68	S+O ₂ =SO+O	.5400E+06	2.110	-1450.0
69	S+H ₂ =SH+H	.1400E+15	.000	19300.0
70	S ₂ +M=S+S+M	.4800E+14	.000	77000.0
71	S ₂ +H+M=HSS+M	.1200E+26	-2.840	1665.0
72	S ₂ +0=S0+S	.1000E+14	.000	.0
73	SH+O=H+SO	.1000E+15	.000	.0
74	SH+OH=S+H ₂ O	.1000E+14	.000	.0

Reazione	А	β	Ea
SH+HO ₂ =HSO+OH	.1000E+13	.000	.0
*			17925.0
-			.0
	.3000E+14	.000	.0
H ₂ S+M=S+H ₂ +M	.1600E+25	-2.613	89100.0
	.3500E+08	1.940	904.0
H ₂ S+O=SH+OH	.7500E+08	1.750	2900.0
H ₂ S+OH=SH+H ₂ O	.2700E+13	.000	.0
H ₂ S+S=SH+SH	.8300E+14	.000	7400.0
HSS+H=SH+SH	.9700E+08	1.620	-1030.0
DUPLICATE			
HSS+H=SH+SH	.1100E+14	.353	210.0
DUPLICATE			ĺ
	.1200E+09	1.653	-1105.0
	.4400E+14	.000	6326.0
			2900.0
-			.0
			-600.0
*			-1105.0
			-1672.0
-			57030.0
			-1408.0
			.0
			2900.0
			.0
-			1204.0
		-	-1480.0
			30000
			10000
*			0.0
			0.0
*			0.0
		0.0	10000
-		6.29	-1900
Reazioni SO _x -CO _x			
C+SO ₂ =CO+SO	.4156E+14	.000	.0
-		.000	24001.4
*			2338.9
			8843.0
O+COS=CO+SO	.1930E+14	.000	4628.2
	.1626E+15	.000	1510.2
COS+M=CO+S+M	.1430E+15	.000	61007.0
O+COS=CO2+S	.5000E+14	.000	10990.1
	.1000E+14		.0
			7404.2
Reazioni dell'SO _x -NO _x			-
SO+NO ₂ =SO ₂ +NO	.8400E+13	.000	.0
SO ₂ +NO ₂ =SO ₃ +NO	.6300E+13	.000	27000.0
		.000	.0
SH+NO=SN+OH	.1000E+14	.000	17688.1
		.500	34776.0
	.1000E+15	.000	.0
	•		2007.1
			8008.4
			.0
N+SN=N ₂ +S	.6300E+12	.500	.0
SN+O=SO+N			8008.4
SN+O=SO+N (duplicate)	.1000E+14	.000	.0
			· -
	SH+HO ₂ =HSO+OH SH+O ₂ =HSO+O SH+SH=S ₂ +H ₂ SH+S=S ₂ +H H ₂ S+M=S+H ₂ +M N ₂ / 1.50/SO ₂ / 10.00/H ₂ O/ 10.00/ H ₂ S+H=SH+H ₂ H ₂ S+O=SH+OH H ₂ S+O=SH+OH H ₂ S+OH=SH+SH DUPLICATE HSS+H=SH+SH DUPLICATE HSS+H=SS+HSH DUPLICATE HSS+H=S ₂ +H ₂ HSS+O=S ₂ +OH HSS+O=S ₂ +OH HSS+OH=S ₂ +S ₂ OH HSS+OH=S ₂ +S ₂ OH HSS+OH=S ₂ +S ₃ OH HSS+OH=S ₂ +SSH-S ₂ HSSH+SH-SSH-S ₂ HSSH+SSH-SSH-S ₂ HSSH+SSH-SSH-S ₂ HSSH+SSH-SSH-S ₂ HSSH+SSH-SSH-S ₃ HSSH+SH-BSS+SH HSSH+OH=HSS+H ₂ O HSSH+S=HSS+SH HSSH+OH=HSS+H ₂ O HSSH+S=HSS+SH HSSH+SH-SS+SH HSSH-SH-SS+SH HSSH-SH-SS-SS-SO-SO-SO-SH H ₂ S+O ₂ S-O ₃ H ₂ H ₂ S-O-SO-H ₂ HOSO+H-SO-H ₂ O Reazioni dell'SO _x -NO _x SO+NO ₂ =SO ₂ +NO SO ₂ +NO ₂ =SO ₃ +NO HSO-NO ₂ -SO ₃ +NO HSO-NO ₂ -SO ₃ +NO SH-NO=SN+O SH+NH-SN+H ₂ N+SO-NO+S N+SN=SN+H SN+OS-NO+S N+SN=SN+H SN+OS-SO+N	SHH0;=HSO+OH	SH-HO ₂ -HSO+OH

Anche in questo caso, il modello cinetico è stato convalidato utilizzando informazioni sperimentali riportate in letteratura, in reattori diversi, come CSTR o PFR e in differenti condizioni sperimentali. A titolo di esempio si veda l'analisi dell'effetto di elevate concentrazioni di NO sulla ossidazione di CO in presenza di SO₂ (Figura 17). L'accordo tra modello e misure è soddisfacente e tale risulta anche per le altre condizioni indagate.

Per ulteriori dettagli sulla derivazione del modello e per la completa convalida si faccia riferimento alla relazione completa, dove vengono inoltre riportate diverse analisi di sensitività per individuare le reazioni controllanti a secondo delle condizioni investigate.

Le migliori prestazioni del modello cinetico in fase gas, rispetto a quello per la volatilizzazione dei composti azotati è facilmente comprensibile pensando alla maggiore accuratezza e facilità di analisi in sistemi controllati in fase gas,

alla minore incertezze delle misure e soprattutto dell'omogeneità del combustibile, oltre al maggior dettaglio (in termini di specie e reazioni) del meccanismo in fase gas.

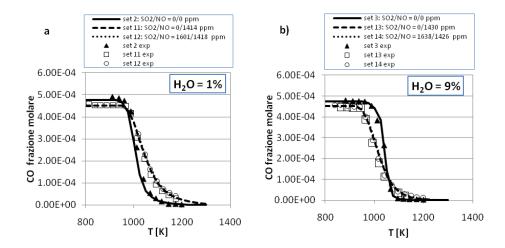


Figura 17. Confronto tra dati sperimentali (simboli) e risultati del modello (linee) per l'ossidazione di CO in presenza e assenza di SO_2 , in funzione della temperatura. Effetto di alte concentrazioni di NO. Le condizioni iniziali sono riportate nella Tabella $4: H_2O = 1\%$, $SO_2 = 0$ ppm, NO = 0 ppm (set 2); $H_2O = 1\%$, $SO_2 = 0$ ppm, NO = 1414 ppm (set 11); $H_2O = 1\%$, $SO_2 = 1601$ ppm, NO = 1418 ppm (set 12); $H_2O = 9\%$, $SO_2 = 0$ ppm, NO = 0 ppm (set 3); $H_2O = 9\%$, $SO_2 = 0$ ppm, $SO_2 = 0$ ppm, $SO_2 = 0$ ppm (set 13); $SO_2 = 0$ ppm, $SO_2 = 0$ ppm (set 14)

L'attività svolta nei due anni di progetto ha consentito di mettere a punto dei modelli predittivi di rilascio di composti solforati e azotati da carbone, nonché un meccanismo di ossidazione di questi composti in fase gas, considerando effetti di interazione. Il naturale sviluppo di questa attività è l'accoppiamento di questi meccanismi in un unico modello che includa anche il modello di volatilizzazione del carbone sviluppato dal Politecnico di Milano, anch'esso in forma analoga a quanto qui proposto.

Il modello risultante sarà poi introdotto in un codice fluidodinamico, dopo averlo ridotto a un numero di reazioni e soprattutto di specie, che consenta una soluzione del campo termofluidodinamico con uno sforzo computazionale adeguato e in tempi compatibili con le necessità di sviluppo.

Questo tipo di riduzione trarrà vantaggio dal fatto che, partendo da un modello generale e predittivo, sarà possibile derivare un modello semplificato specifico per il carbone in esame. Le eventuali 'informazioni sperimentali' necessarie alla definizione del meccanismo semplificato saranno direttamente ottenute utilizzando il modello completo.

<u>Predizione dei prodotti di devolatilizzazione del carbone e individuazione del modello cinetico ottimale in oxy-</u>combustione flameless

Un'altra attività è relativa allo studio del fenomeno di devolatilizzazione in condizioni flameless, volto all'interfacciamento diretto con codici CFD RANS (tipo FLUENT). Essa tende alla predizione dei combustibili che da tale fase originano per la successiva ottimale combustione degli stessi secondo modalità di combustione flameless in ossigeno, in un'atmosfera perciò ricca di CO₂ e H₂O ricircolanti.

L'attività, svolta da ENEA in collaborazione con l'Università di Roma "La Sapienza" (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ambiente), ha riguardato lo studio della oxy-combustione di carbone alimentato in forma di slurry, in condizioni flameless, comprendendo in particolare il fenomeno di devolatilizzazione che avviene immediatamente a valle dell'iniezione del combustibile nel combustore. Lo studio ha perciò riguardato essenzialmente lo sviluppo e l'utilizzo di modelli di predizione quantitativa dei composti che si sviluppano in questa prima fase della combustione e che ne condizionano gli stadi successivi in fase gassosa in modalità di combustione flameless con ossigeno, in un'atmosfera ricca di CO₂ e H₂O assicurata dal ricircolo di parte dei prodotti del processo di combustione.

L'attività si è articolata in due distinte e consequenziali fasi di seguito sintetizzate.

■ Fase 1. Stima a carattere predittivo, condotta facendo ricorso al codice FG-DVC[®] (Functional Group Depolymerization Vaporization Cross-Linking Model), del comportamento del carbone, dopo l'immissione in camera di combustione, e della sua devolatilizzazione con formazione di specie combustibili e non. Nella

pratica vengono effettuate indagini chimiche volte a determinare le specie prodotte a seguito del fenomeno di devolatilizzazione, susseguente al processo di rottura dello slurry di carbone per effetti termofluidodinamici e di pressione, analizzando l'influenza dei parametri di governo (temperatura, pressione, composizione del carbone di partenza) sulla loro formazione e le loro interdipendenze funzionali. Tale procedura richiede la disponibilità di informazioni di carattere chimico-fisico discendenti da competenze specifiche di settore e derivanti dall'utilizzo esperto di codici ad hoc con possibile sviluppo di software dedicato. L'assenza di dati sperimentali sul processo ha reso necessario l'utilizzo del software FG-DVC in grado di simulare il processo di pirolisi del carbone. I soli dati di input richiesti sono l'analisi immediata ed elementare del carbone e la pressione operativa. Il software consente la previsione delle concentrazioni dei prodotti formatisi durante la devolatilizzazione, cioè delle specie volatili (gas e tar) e della rimanente fase solida (char). Il programma calcola, inoltre, per tutte le diverse specie gassose che si formano, le velocità di produzione. In questo lavoro sono state presi in considerazione, per lo sviluppo dello schema cinetico di devolatilizzazione, i composti gassosi principali CH₄, CO, CO₂, H₂O, CO₂ e il tar che è la specie che si forma in quantità maggiore. Sono state effettuate delle prove sperimentali con una bilancia termogravimetrica sul processo di pirolisi per validare il software di simulazione FG-DVC. Il problema dell'utilizzo dei dati sperimentali è legato al fatto che in laboratorio è difficile raggiungere i tassi di riscaldamento tipici delle camere di combustione (10.000 K/s); il confronto è stato fatto per valori del tasso di riscaldamento di 0,7 K/s per valutare se il software fosse in grado di simulare il processo di pirolisi del carbone utilizzato (Sulcis). Il confronto ha dato dei buoni risultati, con un errore commesso dalle simulazioni rispetto ai dati sperimentali inferiore al 5%.

I dati ottenuti sono stati poi processati in ambiente Matlab per il calcolo dei parametri cinetici di formazione delle specie. Sono stati sviluppati tre differenti modelli. Nei primi due si è considerata la formazione di un'unica specie volatile del tipo $C_xH_yO_z$: il primo (a uno step) con parametri cinetici costanti in tutto il campo di temperatura, il secondo (a doppio step) con differenti parametri cinetici per diversi intervalli di temperatura. Il terzo modello (specie per specie) considera la formazione di tutti i composti volatili con i loro relativi parametri cinetici dei quali viene valutata anche la variazione con la temperatura.

■ Fase 2. La seconda fase ha previsto l'implementazione degli schemi cinetici in ambiente FLUENT[®], previo lo sviluppo di routine ad hoc, al fine di pervenire ad una caratterizzazione dei parametri fondamentali rappresentativi del combustore, nell'ipotesi di un'eventuale scalabilità in potenza. Sono state eseguite tre simulazioni nelle quali sono state implementate le tre cinetiche di devolatilizzazione messe a punto. Per quanto riguarda la cinetica di combustione della fase gassosa è stata considerata una reazione a doppio step in cui si forma prima CO che poi si ossida a CO₂. Per quanto riguarda la combustione del char, non avendo a disposizione alcun dato sperimentale, si è utilizzato un semplice modello preimpostato in FLUENT[®].

In mancanza di dati sperimentali relativi al combustore considerato, non si è potuto ottenere un confronto tra i tre modelli cinetici sviluppati e testare quale tra questi meglio ne rappresenti le prestazioni. Un confronto si può tuttavia tentare considerato che il combustore dovrebbe lavorare in condizioni flameless. Dai risultati delle simulazioni si può affermare che i modelli a doppio step e specie per specie rappresentano bene le condizioni flameless, in quanto presentano un profilo di temperatura uniforme, con un valore medio nel reattore che si attesta attorno ai 1650 K. Il modello a singolo step, non tenendo conto della cinetica di devolatilizzazione ad alta temperatura, cioè quella con velocità di reazione maggiore, presenta una zona iniziale più fredda e fornisce quindi un profilo di temperatura non uniforme.

Per quanto riguarda la devolatilizzazione si ha una buona rappresentazione del fenomeno, ad eccezione dell'addensamento di volatili a fondo reattore, un problema che può essere attribuito alla presenza di particelle di grandi dimensioni (850 μ m). Si è riscontrata infatti l'evidenza di un'incompleta combustione delle particelle di questa dimensione. Il tasso di combustione globale nei tre casi si attesta intorno all'80 %.

Si è pensato, infine, di effettuare un confronto con dati sperimentali di letteratura relativi ad un combustore che operasse in condizioni simili. I valori ottenuti dalle simulazioni approssimano piuttosto bene i dati sperimentali. In particolare il modello specie per specie, quello che rappresenta in modo più accurato il reale processo di devolatilizzazione, nonostante sia ancora da affinare, fornisce valori molto prossimi a quelli sperimentali.

Il testing di verifica potrà essere completato avendo a disposizione un'analisi delle emissioni solide e gassose sperimentalmente determinate da ENEA.

I risultati ricavati dallo studio di cinetica chimica descritto, sono stati utilizzati per simulazioni RANS condotte con codice FLUET, attraverso le quali è stata eseguita un'analisi di sensibilità sul reattore ISOTHERM, al variare di parametri fondamentali quali la granulometria del carbone, la portata e la temperatura dei gas esausti ricircolati.

Indagine teorico-sperimentale sull'instaurarsi locale di condizioni "flameless"

Un'importante attività teorico sperimentale, volta all'analisi delle strutture reattive in un bruciatore a polverino di carbone flameless in condizioni locali di flusso ricche di anidride carbonica e vapore, è stata svolta dall'Università di Napoli Federico II (Dipartimento di Ingegneria Chimica).

L'attività di ricerca, svolta nel secondo anno, ha esteso l'analisi delle strutture reattive in un bruciatore a polverino di carbone flameless a condizioni locali di flusso differenti rispetto a quelle valutate nel corso del primo anno. Tali strutture reattive derivano dalla ignizione e dalla ossidazione della frazione volatile dei prodotti della gasificazione del polverino di carbone. Le particolari condizioni di funzionamento del sistema fanno in modo che l'ignizione è assicurata dalla elevata temperatura del flusso di gas ricircolati contenente ossigeno ed un alto tenore di anidride carbonica ed acqua. Per l'esemplificazione delle strutture locali che si creano nelle zone di interesse il processo è stato schematizzato considerando una configurazione a getti contrapposti, messa in evidenza in Figura 18, in cui i due getti sono alimentati in condizioni opportune. In particolare, i due flussi gassosi, l'uno contenente il combustibile e l'altro contenente il comburente, sono preriscaldati e/o diluiti in modo tale da ottenere differenti condizioni di alimentazione.

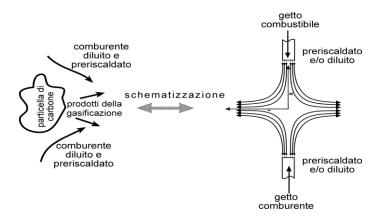


Figura 18. Schematizzazione delle zone reattive nel processo considerato

Facendo riferimento alla temperatura di preriscaldamento e alla diluizione di uno o entrambi i flussi, l'ignizione e la struttura reattiva che ne deriva è identificata in letteratura come Hot Diluted Diffusion Ignition (HDDI)¹.

Nel primo anno l'attività è stata finalizzata alla caratterizzazione delle strutture reattive stabilizzate nelle condizioni Hot Oxidant Diluted Oxidant e Hot Oxidant Diluted Fuel. Nel corso del secondo anno, l'analisi è stata estesa, quindi, alle condizioni in cui il getto di combustibile è contemporaneamente preriscaldato e diluito, identificate come Hot Fuel Diluted Fuel (HFDF). Questa è, tra quelle possibili, la condizione più probabile in cui può trovarsi localmente il combustibile derivante dalla gasificazione del carbone.

Così come fatto per le configurazioni analizzate in passato, relative a condizioni di diluizione e/o preriscaldamento del combustibile e del comburente differenti, lo studio è stato affrontato utilizzando un approccio di tipo numerico. Impiegando un codice di calcolo commerciale e modelli cinetici presenti in letteratura (GRI3.0², è stata condotta un'analisi dettagliata della dipendenza dell'ignizione e della relativa struttura reattiva che si stabilizza in funzione dei parametri operativi. In particolare sono stati valutati gli effetti della composizione dei flussi, della temperatura di preriscaldamento, della pressione e della velocità di stiramento sull'evoluzione del processo ossidativo. Sono quindi state individuate le regioni in cui si stabilizzano i diversi regimi di reazione e come tali regioni dipendono dai parametri considerati.

Come illustrato in Figura 18, è stato utilizzato un modello fisico del sistema che consente di semplificare lo studio del sistema. In particolare, quest'ultimo è stato schematizzato per mezzo di una configurazione costituita da due getti contrapposti, uno contenente il combustibile e l'altro il comburente alimentati ad una temperatura pari a T_0 e T_{in} rispettivamente. Il sistema è rappresentato nella parte superiore della Figura 19 nel caso standard in cui il

28 Volume II

٠

¹ De Joannon, M., Sabia, P , Cavaliere, A (2009). HDDI Mild Combustion. Alternative Ignition Systems. M. Lackner, ProcessEng Engineering GmbH.

² Bowman, C., Frenklach, M, Gardiner, WR, Smith, G (1999). "The GRI 3.0 Chemical Kinetic Mechanism." University of California: Berkeley, CA.

comburente è costituito da aria ed il getto combustibile da metano alimentati alla temperatura $T_0 = T_{in} = 300 \text{ K}$ ed alla velocità $v_0 = 25 \text{ cm/s}$.

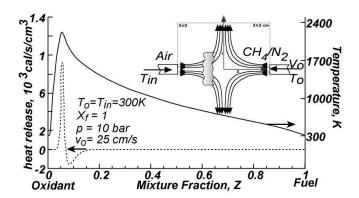


Figura 19. Schematizzazione di getti contrapposti profili relativi ottenuti in condizioni standard

L'analisi delle strutture ossidative è stata effettuata valutando la velocità di rilascio di calore (h) e il profilo di temperatura che si ottengono in tale sistema in funzione della coordinata assiale. Una valutazione più significativa è ottenuta considerando i profili di tali grandezze nello strato di miscelamento, in funzione della frazione di miscelamento Z.

La velocità di stiramento è stata fatta variare in un intervallo tra 10 e 300 s⁻¹. I valori della velocità della corrente ossidante sono stati scelti in maniera tale che i due getti contrapposti avessero la stessa energia cinetica. Ciò si traduce in un'invarianza del punto di stagnazione tra i due getti il quale, per le condizioni scelte, è posto ad una distanza pari a circa metà della distanza tra le due sezioni di ingresso.

La diluizione della corrente di combustibile è stata ottenuta considerando una variazione della frazione molare del combustibile da 1 a 0,02. A tali gradi di diluizione corrispondono degli incrementi massimi di temperatura , relativi alla completa ossidazione del combustibile, che variano dai 50-100 K, fino a circa 2.000 K, per condizioni non diluite.

La temperatura d'ingresso del getto di ossidante è di 300 K, in tutti i casi analizzati. La temperatura del getto di combustibile varia da 600 K fino ai 2400 K in maniera da esplorare i casi in cui la temperatura adiabatica di fiamma delle miscele è maggiore o minore della temperatura del flusso combustibile. Sono stati analizzati due valori della pressione di lavoro 1 e 10 atm.

I valori dei parametri considerati sono stati riassunti in Tabella 5.

Tabella 5. Intervalli dei parametri analizzati

Frazione molare di combustibile	0,01-1
Temperatura getto ossidante	300 K
Temperatura getto combustibile	600 -2400 K
Pressione	1-10 bar
Velocità di stiramento	10 -300 s ⁻¹

Gli effetti della diluizione e del preriscaldamento del combustibile sulle strutture reattive che si stabilizzano sono visibili nei profili di temperatura e di rilascio di calore riportati in figura 20 in funzione di Z su curve parametriche nella concentrazione di combustibile. Essi si riferiscono ad una temperatura di preriscaldamento del combustibile di 1400 K, v_0 = 100 cm/s ed una pressione di 10 bar e 1 bar rispettivamente. La linea tratteggiata sui diagrammi rappresenta la temperatura di miscelazione dei getti di combustile e comburente in assenza di reazione. Il punto presente sulla curva di rilascio di calore rappresenta il valore di $Z = Z_{st}$. Per pressione di 10 bar, il profilo di temperatura ottenuto per X_f = 1, cioè in assenza di diluizione, è molto simile a quello riportato in condizioni standard in Figura 19 sebbene in questo caso il valore massimo di temperatura raggiunto è di 2340K a causa del preriscaldamento del combustibile. Quindi esso decresce fino al valore di preriscaldamento del combustibile per

Z=1. Il profilo di h cresce rapidamente fino a raggiungere un massimo in corrispondenza del massimo di temperatura a Z = 0,053 molto prossimo al valore stechiometrico (Z_{st} = 0,055) quindi decresce fino ad una spalla poco pronunciata a Z = 0,062. Successivamente continua a decrescere, diviene negativo in corrispondenza della zona pirolitica e quindi torna nuovamente verso lo zero. All'aumentare della diluizione del combustibile si hanno un insieme di effetti che determinano un drastico cambiamento della struttura reattiva all'aumentare della diluizione del combustibile. In particolare, il massimo della curva di rilascio di calore si sposta verso Z maggiori in seguito allo spostamento del valore di Z_{st} , il profilo contemporaneamente si estende su un intervallo delle frazioni di miscelamento più ampio, appare un secondo massimo e la zona pirolitica si restringe. In particolare, quest'ultima non è più presente per valori della frazione molare di combustibile minori di 0,1. Nelle condizioni di massima diluizione considerata è possibile ritrovare la caratteristica ben identificata nella configurazione HODF che prevede uno spostamento tra la frazione di miscelamento alla quale si verifica il massimo di e Zst .

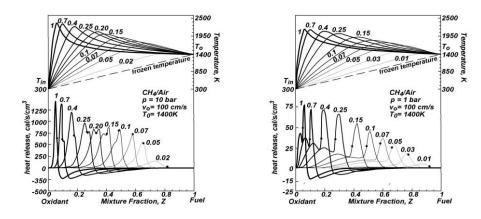


Figura 20. Profili di temperatura e velocità di rilascio di calore ottenuti nella configurazione HFDF alla pressione di 10 e 1 bar

I profili ottenuti a pressione inferiore presentano le stesse caratteristiche principali e la stessa evoluzione che presentano i profili ottenuti a pressione maggiore. In un ampio intervallo di condizioni al sistema è possibile associare soluzioni multiple. E' questo il caso dei profili riportati in Figura 21. Essi corrispondono a profili di velocità di rilascio di calore ottenuti per una temperatura iniziale di 1200 K ed una frazione molare di combustibile pari a 0,5. E' possibile vedere che si possono stabilizzare due strutture reattive differenti, corrispondenti rispettivamente ad una condizione di alta e di bassa conversione. Ai due profili corrispondono caratteristiche sostanzialmente differenti non solo nei valori assoluti delle velocità di rilascio ma anche per la struttura e la posizione rispetto all'asse delle frazioni di miscelamento. Il profilo di alta conversione si stabilizza per valori di Z_{st} intorno allo stechiometrico e generalmente presenta la zona pirolitica. Il profilo di bassa conversione si stabilizza, invece, in corrispondenza di valori di Z molto alti, interessa un intervallo di frazioni di miscelamento più ampio e non presenta la regione pirolitica.

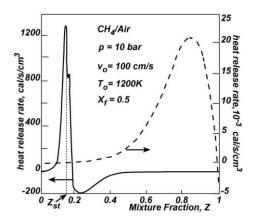


Figura 21. Strutture reattive multiple ottenute nella configurazione HFDF

La possibilità di stabilizzare due strutture ossidative con tipologie sostanzialmente differenti è stata rilevata in un ampio campo di valori della velocità di stiramento, come è possibile vedere dalla Figura 22 dove sono riportati i

valori massimi di h al variare della velocità di stiramento in un intervallo tra $0 e 300 s^{-1}$ per tre temperature di preriscaldamento del getto di combustibile. La doppia soluzione è presente fino a $k = 250 s^{-1}$. Per valori maggiori della k è presente solo la soluzione di bassa conversione. Nell'intervallo di k in cui sono presenti entrambe le soluzioni, quella di bassa conversione acquista sempre più importanza nei confronti di quella di alta all'aumentare della temperatura di preriscaldamento del combustibile.

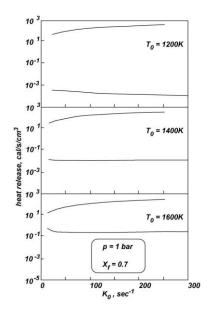


Figura 22. h di alta e bassa conversione al variare della velocità di stiramento

Sulla base della tipologia dei profili di velocità di rilascio di calore ottenuti è possibile individuare differenti regimi reattivi, così come fatto in passato considerando altre configurazioni di alimentazione. E' possibile quindi ottenere una mappa in funzione della temperatura iniziale e dell'incremento ΔT ottenibile nelle corrispondenti condizioni di alimentazione. Le mappe ottenute a 1 e 10 bar per una velocità di stiramento pari a 50 s⁻¹ sono riportate in Figura 23.

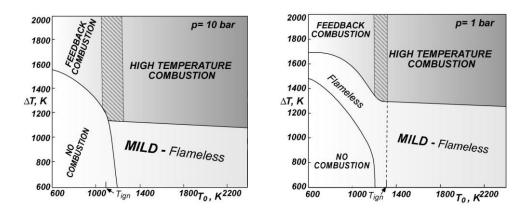


Figura 23. Mappa di comportamento ottenuta per la configurazione HFDF a 10 e 1 bar

Nella mappa relativa alla pressione di 10 bar, la regione in basso a sinistra della mappa, corrispondente ai valori più bassi di T_0 e ΔT , indicata con no-combustion, identifica la zona in cui non è possibile stabilizzare alcuna struttura reattiva. Tale zona si estende fino a $T_0 = T_{ign}$. Nello stesso intervallo di T_0 , un incremento di ΔT porta alla stabilizzazione di una struttura reattiva tipica della combustione tradizionale, determinata dal feed-back di calore e materia dalla zona di reazione vera e propria verso i reagenti. In questo caso, quindi si stabilizza una struttura reattiva tipica delle fiamme a diffusione, dove una zona ossidativa, posizionata a $Z = Z_{st}$ è seguita da una zona pirolitica. Aumentando la temperatura di preriscaldamento del combustibile è presente nella mappa la zona di combustione di alta temperatura. In questo caso la struttura reattiva si estende su un intervallo di Z più ampio rispetto al caso della combustione feed-back mantenendo però inalterate le principali caratteristiche delle

strutture di fiamma tradizionali. La zona tratteggiata indica che il passaggio dalla zona di combustione feed-back alla zona identificata come High Temperature Combustion è graduale. A partire da quest'ultima zona, un decremento di ΔT determina un ulteriore allargamento della zona reattiva fino a raggiungere la zona identificata con MILD. La caratteristica principale in questa regione è la scomparsa della zona pirolitica. L'estensione della zona interessata alla reazione e l'assenza della regione pirolitica sono due caratteristiche tipiche della combustione flameless, così come è evidenziato nella mappa. Una mappa analoga è stata ottenuta per una pressione di 1 bar, e riportata a destra in Figura 23. Le caratteristiche principali delle strutture reattive identificate sono le stesse sebbene gli intervalli dei parametri in cui si verificano differiscono leggermente per un effetto dovuto alla pressione di lavoro. Una differenza non trascurabile, invece, è la presenza di una zona flameless tra la zona di assenza di reazione e la zona di combustione feed-back. In corrispondenza di tale zona si stabilizzano strutture reattive più estese rispetto alle strutture di fiamma tradizionali, cioè interessano un intervallo di Z relativamente ampio rispetto alle strutture relative alla zona feed-back ed inoltre non presentano la regione pirolitica. Tali profili non possono essere classificati come MILD poiché sono relativi a strutture stabilizzate per temperature inferiori alla temperatura di ignizione e, di conseguenza, per definizione tali profili non rientrano nel regime MILD.

In definitiva anche nelle condizioni di alimentazione identificate come HFDF è stata messa in evidenza la possibilità di stabilizzare strutture reattive di differente tipologia ed identificare l'intervallo dei parametri in cui tali strutture sono associabili a regimi di combustione MILD.

E' stata inoltre presa in considerazione la configurazione che prevede l'alimentazione di combustibile e comburente entrambi diluiti e preriscaldati (HODO/HFDF). I prodotti della gasificazione della particella di carbone sono, generalmente, a temperatura maggiore della temperature ambiente. Inoltre, i prodotti gassosi già parzialmente ossidati, e quindi ad alta temperatura, possono mescolarsi ulteriormente con la corrente ossidante, diluita e preriscaldata, per reagire e trasformarsi in prodotti di completa ossidazione. Poiché le strutture reattive riguardanti la diluizione ed il preriscaldamento del getto di combustibile e comburente singolarmente sono state già approfonditamente caratterizzate, è stata focalizzata l'attenzione su una condizione di alimentazione HODO/HFDF che consente la stabilizzazione di una struttura reattiva diffusiva per la quale si possa raggiungere una condizione isoterma all'interno della camera di combustione. Tale condizione identifica, infatti, una condizione limite ottimale di funzionamento nelle condizioni di alimentazione di riferimento. Sono state condotte, quindi, in modo sistematico un significativo numero di simulazioni numeriche per identificare la strategia più opportuna per il raggiungimento di tali condizioni di lavoro. In particolare, sono state effettuate simulazioni per identificare, a partire da una condizione con comburente diluito e preriscaldato, quale fosse la condizione più indicata alla quale associare una condizione di combustibile diluito e preriscaldato. Un esempio delle strutture reattive possibili in queste condizioni è riportato in Figura 24. Queste si riferiscono ad una condizione in cui l'ossidante è diluito e preriscaldato a 900 K ed in combustibile è anch'esso preriscaldato a 1.200K. La frazione molare di combustibile varia tra 1 e 0,1.

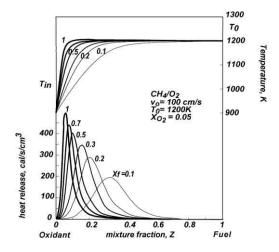


Figura 24. Profili di temperatura e velocità di rilascio di calore ottenuti nella configurazione HODO/HFDF

Anche in questo caso, quindi, è possibile notare un aumento della estensione dell'intervallo di Z interessato alla reazione e l'assenza della regione pirolitica nei profili di velocità di rilascio di calore. E' possibile quindi anche in queste condizioni identificare delle strutture reattive classificabili come MILD.

B. Sviluppo e test sperimentali con diagnostica non invasiva per il monitoraggio ed il controllo del processo dinamico di oxy-combustione. Determinazione di parametri sintetici di stabilità

L'attività, condotta da ENEA in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali dell'Università di Pisa, è volta allo sviluppo e messa a punto di sistemi diagnostici per lo studio delle principali variabili chimico-fisiche di processo, utili all'indagine fenomenologica di base sul processo ed alla validazione di codici di calcolo come strumenti di progettazione. Nello specifico 'attività è stata rivolta allo sviluppo di diagnostica speciale non invasiva da applicare su impianti a oxy-combustione di taglia significativa (3 MWt) per uno studio accurato della oxy-combustione di carbone.

L'attività si è articola in tre fasi, all'interno delle quali sono individuabili distinte e consequenziali azioni:

- 1. sviluppo di diagnostica di tipo intrusivo e non, finalizzata alla misurazione di campi di temperatura, specie chimiche, flussi termici e altre grandezze rilevanti per processi di oxy-combustione. Particolare enfasi è stata data allo sviluppo di diagnostica che possa fornire, in termini di accuratezza e risoluzione spaziale e temporale, basi di dati per la validazione di codici di calcolo CFD.
 - Oltre all'analisi dello stato dell'arte sulla diagnostica per sistemi di oxy-combustione di taglia significativa, in questa fase sono state definite le metodologie diagnostiche da utilizzare nei test in campo ed è stata programmata la sperimentazione;
- 2. test di validazione, condotti su impianti sperimentali messi a disposizione dall'Università di Pisa, operanti in condizioni di oxy-combustione e quindi ad alta temperatura. In questa fase la strumentazione sviluppata, che semplicisticamente indichiamo come convenzionale, è stata impiegata per caratterizzare il processo, in unione con strumentazione non invasiva sviluppata da ENEA, e se ne è valutata la possibile integrazione per l'impiego su impianti dimostrativi di taglia significativa;
- 3. studio ed individuazione di soluzioni ingegneristiche atte a consentire l'impiego di strumentazione ottica non invasiva su facility sperimentali di taglia pilota o industriale. Lo studio ha preso in esame problematiche di protezione termica, meccanica e pulizia di sensori a fibra ottica, considerando condizioni di esercizio pari a 1200°C e 5 bar. Sono stati effettuati test sperimentali per la verifica delle soluzioni impiegate.

Sulla base delle caratteristiche degli impianti utilizzati per la sperimentazione sono state definite le specifiche delle sonde atte a consentire l'impiego di strumentazione ottica non invasiva ENEA.

Gli impianti sperimentali utilizzati per i test sono stati l'Isothermal Plug Flow Reactor (IPFR) e la fornace FOSPER. entrambi eserciti sia in condizioni convenzionali (aria-gas naturale/carbone) che oxy (ossigeno/CO₂ - gas naturale/carbone).

o La strumentazione speciale: il sistema ODC

Il sistema ODC (Optical Diagnostics of Combustion), messo a punto da ENEA, permette di osservare, tramite sonde ottiche per alta temperatura, direttamente i processi combustivi che hanno luogo in una camera di combustione, di rilevarne la fluttuazione radiativa (nel range UV-IR) e di fornirne, tramite elaborazione diretta, informazioni qualitative/quantitative sullo stato termo-fluidodinamico del processo osservato. La possibilità dello strumento di gestire, ad alta velocità di scansione (10 Msamples/s), ed in parallelo (sfasamento temporale nullo) più sonde (4, estendibili ad 8) permette di fornire informazioni sia sullo stato termofluidodinamico locale che sul livello di coerenza tra punti diversi dello spazio di processo; una ricaduta consistente di questa peculiarità è la stima della velocità media dei gas combusti tra punti traguardati (anemometria on-line). Lo strumento, a bassa intrusività, è installabile su impianti industriali, opera on-line e fornisce informazioni in tempo reale. La velocità di risposta del sistema diagnostico (< 1 s) lo rende suscettibile alla integrazione nei loops di controllo dei processi di impianto.



Figura 25. Sonde per alta temperatura, in zaffiro. Fibra ottica in quarzo (45 mt) per remotizzare il segnale ottico delle sonde



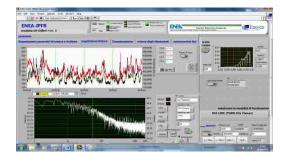


Figura 26. Box di interfaccia per trasduzione otticaelettrica

Figura 27. Pannello interattivo in fase di rilettura dati

La campagna di misure

In riferimento alla qualificazione dello strumento ODC per il monitoraggio e la diagnostica dei processi combustivi legati all'uso di carbone, sia come polverino che come slurry acquoso, è stata predisposta una campagna di misure, coordinata dall'Università di Pisa, in collaborazione con IFRF, su facility del centro sperimentale ENEL di Livorno gestite da IFRF. Gli impianti di interesse sono stati individuati in: FOSPER, forno sperimentale da 5 MWt ed l'IPFR, reattore ad alta temperatura per la caratterizzazione TAR-CHAR del polverino di carbone.

L'obiettivo è stato quello di verificare *l'osservabilità* del processo di combustione del carbone e la consistenza della risposta analitica del sistema ODC (rilevazione delle dinamiche delle strutture del processo).

o Test su Impianto IPFR

L'impianto IPFR è una facility utilizzata da ENEL ed IFRF per la caratterizzazione del polverino di carbone (grana media 40-125 µm) in contenuto di parti combustibile, identificandone le concentrazioni di componenti Tar (volatile) e Char (solido). L'impianto è costituito da un bruciatore (gas metano, premix) e da un reattore verticale (4 m). Il polverino di carbone viene dosato tramite una coclea ed immesso nella parte alta del reattore via flussaggio di azoto. La parte di ossigeno necessario alla combustione del carbone viene fornita come eccesso d'aria nel combustore. La temperatura del reattore è omogenea e tenuta intorno ai 900 °C. La parte volatile, Tar, del carbone brucia e si esaurisce subito, mentre la parte solida brucia lentamente ed il residuo incombusto dipenderà dal tempo di permanenza nel reattore (gestibile tramite la regolazione della portate aria, gas e gas combusti). Stimando il peso delle scorie residue ed il tempo di permanenza nel reattore, si definiscono le caratteristiche del Char. Conoscere la dinamica del processo combustivo permetterebbe di stimare meglio la struttura del carbone (Tar e Char). Sono usate sonde ODC per alta temperatura (T_{oper} max 1800 °C) inserite direttamente nell'ambiente del processo (camera di combustione [sonda CC] e reattore [sonda AD]). In contemporanea vengono registrate le variabili di processo in modo da valutare (off-line) la coerenza. Attualmente, il monitoraggio del processo è delegato solo ad una sensoristica convenzionale.

Gli obiettivi dell'uso del sistema diagnostico ODC sono quelli di:

- verificare stato funzionale del combustore dal punto di vista termo-fluidodinamico: tipo (premix, mild) e stabilità di combustione,
- individuare il flusso delle particelle di carbone in combustione lungo l'asse del reattore, al fine di quantificarne in modo più preciso i tempi di permanenza (velocità del flusso).
- Monitoraggio e diagnostica dello stato combustivo

Il monitoraggio e la diagnostica dello stato combustivo sono stati ottenuti utilizzando due sonde ODC ad alta temperatura affacciate direttamente nella camera di combustione in modo da avere una prospettiva assiale (frontale al bruciatore) ed una radiale in prossimità della fiamma (Figura 28). La differente dislocazione ha uno scopo strategico in quanto:

- la sonda assiale osserva in modo integrale le fluttuazioni radiative della combustione;
- la sonda radiale osserva quelle locali (collimata sulla fiamma).



Figura 28. Sinistra sonda radiale, destra assiale

La combinazione delle due informazioni permette di identificare lo stato combustivo:

- la sonda radiale individua la presenza della fiamma e permette di quantificarne, tramite analisi spettrale, lo stato turbolento;
- la sonda assiale verifica la presenza di fiamma lungo tutto l'asse della camera. Avendo una vista frontale è in grado di rilevare, anche in condizione di combustione flameless la fiamma che, a causa dell'elevata pressione parziale della miscela comburente/combustibile, si ha in prossimità del bruciatore.

Il forno è stato gestito in modo da creare le condizioni di flameless (mild), ossia:

- la temperatura media interna in CC è stato portata ad un valore (1050 °C) superiore a quella di autoaccensione del metano (750 °C);
- la portata aria è stata ridotta compensandola con gas combusti ricchi di CO₂ in modo da ottenere una consistente diluizione della miscela e riduzione dell'ossigeno disponibile.

Nella Figura 29 sono riportati gli andamenti delle variabili di processo con cui si è gestito il combustore IPFR per passare dalla condizione premix a quella mild e viceversa.

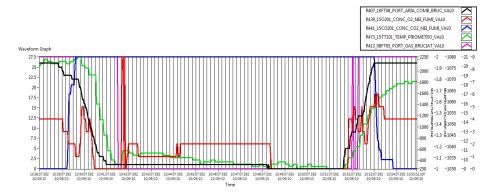


Figura 29. Andamenti delle variabili di processo per ottenere le condizioni di entrata e uscita mild

La coerenza temporale dei segnali ODC - Variabili di Processo non è perfetta in quanto gli orologi dei due sistemi di acquisizione non sono stati sincronizzati (il sistema ODC è in anticipo di circa 3'). Comunque, dai trend delle misure che hanno inseguito le fasi di andata e ritorno premix-mild-premix, dalla Figura 29 alla 33, sono ben visibili i mutamenti della dinamica del segnale ODC e la forte coerenza temporale che questa ha con i trend delle variabili di processo (corrispondenza dell'inizio e durata del fenomeno, circa 13').

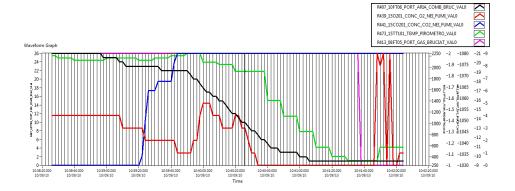


Figura 30. Zoom della fase transitoria premix-mild

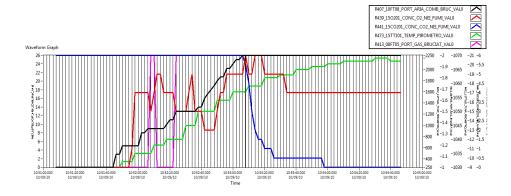


Figura 31. Zoom della fase transitoria mild-premix

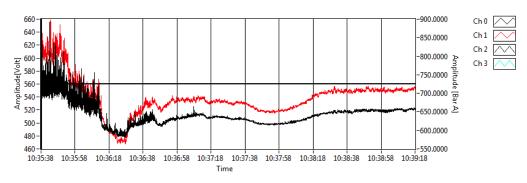


Figura 32. Transitorio premix-mild. Trend dei segnali prodotti dalle sonde ODC. Nero-assiale, rosso-radiale

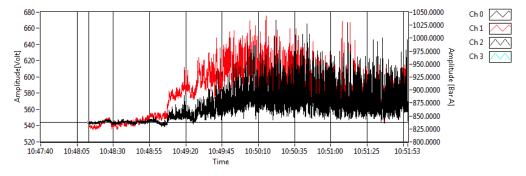


Figura 33. Transitorio mild-premix. Trend dei segnali prodotti dalle sonde ODC. Nero-assiale, rosso-radiale

Sono state eseguite altre due misure in condizioni stazionarie:

condizione premix. Il segnale ODC individua la presenza di una dinamica turbolenta con decadimento inerziale delle grandi scale (zona evidenziata in rosso). Si può notare come i segnali delle due sonde abbiano una coerenza discreta, ma non elevata (indice cross-correlazione medio 0.5): il segnale assiale, con vista integrale, contiene tutte le dinamiche di quello radiale.

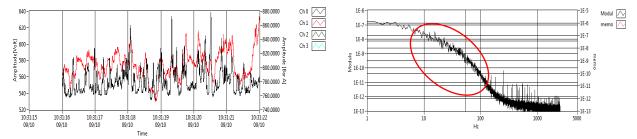


Figura 34. Power spectral density in condizione premix

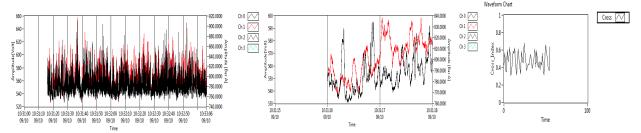


Figura 35. Andamento temporale dell'indice di cross-correlazione in premix

• condizione mild. Il segnale ODC indica assenza di una dinamica turbolenta in entrambe le sonde (Figure 36-37): questo implica che la fiamma è praticamente assente. L'assenza di fiamma (dovuta essenzialmente alla forte diluizione della miscela combustiva che non permette l'autosostentamento locale del fronte di fiamma) fa sì che le reazioni di combustione, e quindi della relativa emissione radiativa, non siano legate al comportamento turbolento della miscela comburente-combustibile, ma essenzialmente alla fluttuazione del loro valore medio, quindi le sonde ODC non vedono la fluidodinamica: infatti lo spettro, tende ad appiattirsi (zona cerchiata in rosso), non sono evidenti le grandi scale ed il relativo decadimento inerziale. L'indice di cross-correlazione medio è alto, 0,7, questo indica che le fluttuazioni radiative tendono a divenire coerenti nell'intero volume della camera di combustione, condizione che caratterizza lo stato di combustione mild (combustione di volume)

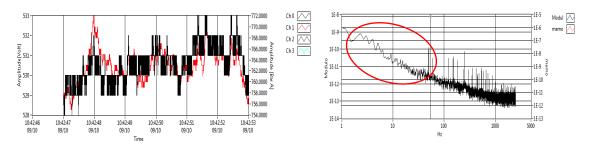


Figura 36. Power spectral density in condizione mild

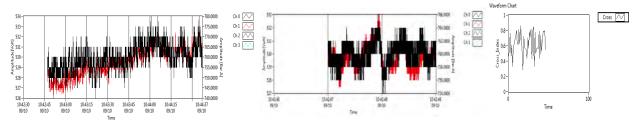


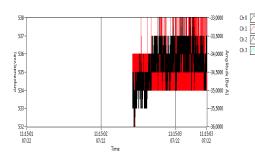
Figura 37. Andamento temporale dell'indice di cross-correlazione in mild

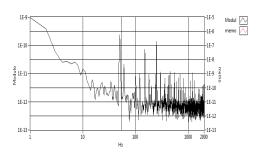
o Individuazione del flusso di particelle di carbone lungo l'asse del reattore

Sono state effettuate delle misure con le sonde ODC inserite in punti di osservazione disposti lungo l'asse del reattore, lo scopo era di verificare l'efficienza delle sonde a rilevare le particelle di carbone che bruciano mentre lo percorrono. Nel dettaglio:

Misura: fondo (senza carbone e con gas di trasporto 1.5 nmc/h)

- ch. 1 modulo M2, Porta 6
- ch. 0 camera di combustione

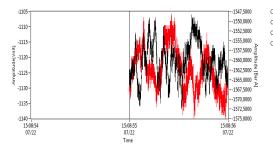


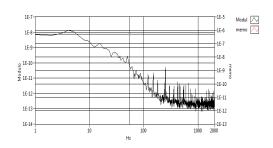


Misura: con carbone 110 g/h e con gas d trasporto 1.5 nmc/h

ch. 1 - modulo M3B, Porta 8

ch. 0 - modulo M4B, Porta 10





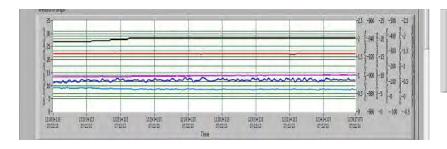
I due test riportati evidenziano:

- la capacità delle sonde ODC di osservare fenomenologie di combustione di polverino di carbone anche con flussi molto piccoli (100 g/h).
- di inseguirne e osservarne lo stato di combustione lungo l'asse del reattore permettendo così di rilevare e valutare i tempi di combustione di questo (permettendo così una sua migliore caratterizzazione)

La distanza delle sonde (25 cm), e la loro posizione, radiale-normale (90°) permettono al sistema ODC di effettuare una stima della velocità media del flusso di polverino, in fase di combustione, lungo il percorso del reattore. Distanze superiori ai 25 cm non permettono di evidenziare strutture tali da consentire la loro rilevazione coerente.

<u>Misura</u>

Sonda CH1 in Porta 6, CH0 Porta 7. distanza relativa 25 cm, posizione radiale-normale. Durata 120 s. Frequenza di campionamento 5 MHz.



R407_10FT08_PORT_ARIA_COMB_BRUC_VAL0

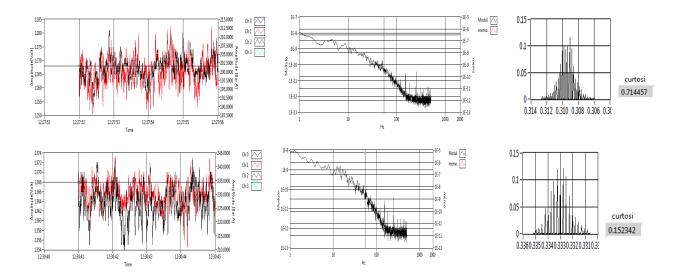
R409_35FT04_PORT_AZOTO_TRASPCARB_VAL0

R415_17FT01_PORT_DOSAT_CARBONE_VAL0

R41_15C0201_CONC_CO2_NEL_FUMI_VAL0

R457_15TT01_TEMP_MODULO_1_VAL0

R413_08FT05_PORT_GAS_BRUCIAT_VAL0



Delle due misure vengono riportati gli andamenti delle variabili di processo, dei segnali ODC nel dominio del tempo e della frequenza, ed una stima della stabilità del processo rappresentata dall'istogramma delle variazioni di segnale, che approssima molto la forma di una gaussiana ottimale (vedi il valore di curtosi). Due metodi di analisi sono stati usati per stimare la velocità media delle particelle, entrambe sono basati sull'analisi della fase relativa tra i due segnali.

Il primo metodo si basa sulla stima dello sfasamento lineare tra i due segnali; nel secondo la stima dello sfasamento viene prima processata ed ottimizzata utilizzando i valori più consistenti dello sfasamento (bassa fluttuazione).

Il primo metodo fornisce due risultati diversi: 12,744 m/s e 4,431 m/s (Figura 38). Il secondo metodo dà una informazione più stabile, in entrambe i casi punta su circa 9-10 m/s (Figura 39).

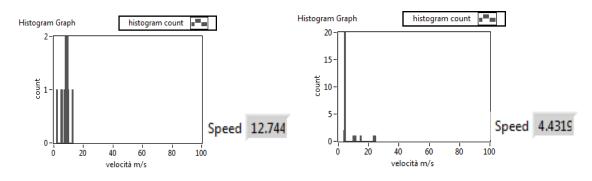


Figura 38. Distribuzione della velocità con il metodo lineare delle fasi

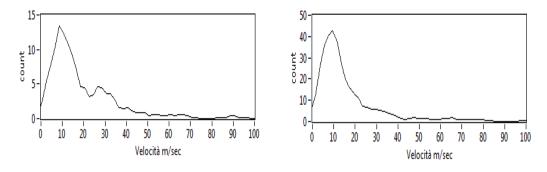


Figura 39. Distribuzione della velocità con il metodo delle fasi ottimizzate

Test sperimentali su impianto Fo.Sper.

L'impianto FOSPER (Figura 40) è un forno sperimentale alimentabile a gas e a polverino di carbone, che può operare in condizioni di oxy-combustione, con forte ricircolo di prodotti di combustione.



Figura 40. Impianto FOSPER, vista laterale con le porte di accesso ottico e vista testa di alimentazione

I test, essenzialmente, sono stati mirati a valutare l'osservabilità, da parte delle sonde ODC, della combustione di polverino di carbone (verificare, ovvero, se l'opacità dell'ambiente impediva l'osservazione in modo consistente del processo) e, successivamente, valutare la potenzialità risolutiva dello stesso sistema ODC. Su FOSPER sono state individuate tre porte di accesso laterali, P1- P3 - P6 (in prossimità dei sistemi di iniezione), su cui sono state effettuate le misure. Il forno, attualmente, viene utilizzato per fare esperienza sulla ossicombustione del polverino di carbone. La procedura usata per andare in ossicombustione è la seguente:

- combustione diffusiva aria-metano, andata a temperatura di esercizio
- ricircolo fumi per diluizione miscela aria-gas (e raffreddamento)
- immissione graduale di ossigeno, andata in ossicombustione gassosa
- immissione di polverino di carbone e contemporanea riduzione gas. La procedura si continua fino a completa sostituzione del gas col carbone
- ossicombustione del carbone.

Le fasi sono state seguite con il sistema ODC. La posizione delle sonde è ipotetica, solo a posteriori (dopo l'analisi delle misure) è possibile individuare la posizione ottimale per l'osservazione delle fenomenologie legate al processo.

Ossicombustione con carbone

Ricircolo gas combusti Ossigeno su aria primaria e secondaria Sonda ch.0 su portina 1 Sonda ch.1 su portina 3

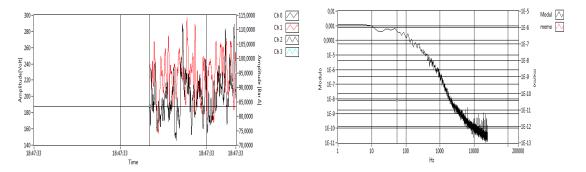


Figura 41. Il sistemo mostra una evidente capacità di rilevazione del flusso in combustione

Il test dimostra che il sistema ODC ha capacità di osservare (non si verifica accecamento delle sonde per opacità d'ambiente) in modo consistente il processo di ossicombustione in atto nel forno , e fornisce informazioni sulla dinamica del flusso di polverino in fase di combustione. L'osservazione contemporanea su due porte vicine P1 e P3 (interasse porte 27,5 cm) permette di effettuare anche una stima della velocità media del flusso in fase di combustione. In fig.46 è riportata la distribuzione delle velocità di flusso di polverino rilevate tra la porta 1 e 3

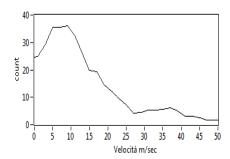


Figura 42. Distribuzione della velocità di flusso di polverino rilevata tra le porte 1-3 (distanza 58 cm)

Anomalie funzionali

Il sistema ODC durante le misure ha evidenziato un comportamento anomalo della dinamica radiativa. Prima di trarre conclusioni è opportuno fare ipotesi con considerazioni critiche anche sul set-up strumentale ODC. Per queste misure sono state usate sonde inserite direttamente nel cavedio ottico, le sonde penetrano per una lunghezza di 20 cm (il diametro è di 5mm) ed il cavedio (50 cm) è flussato con aria per mantenere bassa la temperatura di lavoro delle sonde.

Misura 1 - condizioni:

In ossicombustione con carbone Ricircolo gas combusti Ossigeno su aria primaria e secondaria Sonda ch.0 su portina 1 Sonda ch.1 su portina 3

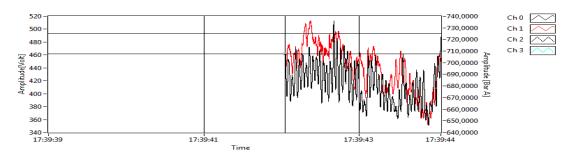


Figura 43. Andamento del segnale ODC. Rosso CH1 (P3), nero CH0 (P1)

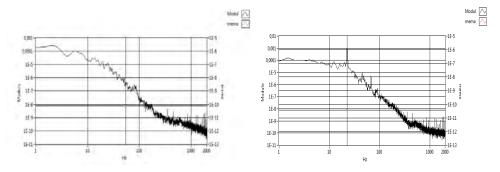


Figura 44. Spettro mediato, sinistra sonda in P3 e destra sonda in P1

La frequenza presente, 22,5 Hz è particolare: è una sub-armonica dei 50Hz della rete di alimentazione elettrica.

Ipotesi 1, critica negativa sul set-up delle sonde ODC

La sonda è una barra di piccole dimensioni inserita in un cavedio flussato con aria in pressione: non si può escludere la possibilità di vibrazione della sonda, con comportamento tipo ancia forzata alla frequenza di 22.5 HZ, che si ripercuote sul segnale acquisito.

Ipotesi 2, fluttuazioni dei sistemi di alimentazione del forno

Questa ipotesi può essere avvalorata dal fatto che è strano che solo una delle sonde veda la fluttuazione e quindi la fenomenologia in atto potrebbe essere limitata al suo campo visivo. Inoltre, va considerato che in successione alle misure il forno è andato in blocco, quindi esisteva effettivamente una condizione di esercizio anomalo.

Per evitare, o meglio ridurre, la possibile anomalia funzionale delle sonde sono state effettuate altre misure usando sonde più corte (15 cm, stesso diametro).

Misura 2 - condizioni:

In ossicombustione con carbone Ricircolo gas combusti Ossigeno su aria primaria e secondaria Sonda ch.0 su portina 1 Sonda ch.1 su portina 3 Sonde da 15 cm (penetrazione 12 cm)

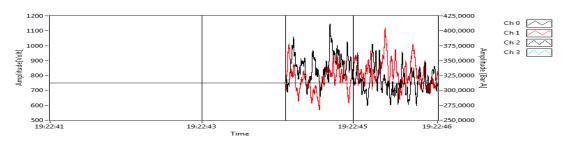


Figura 45. Andamento del segnale ODC. Rosso CH1 (P3), nero CH0 (P1)

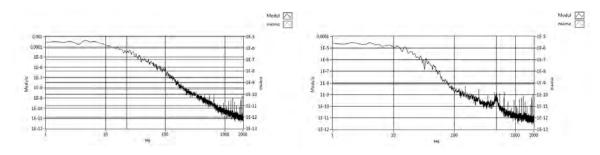


Figura 46. Spettri medi. Sinistra CHO. Destra CH1

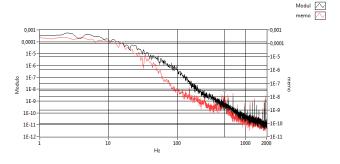


Figura 47. Confronto degli spettri medi. Nero CHO. Rosso CH1

In questa condizione di esercizio (individuabile dal riferimento temporale assoluto) non si nota più l'armonica a 22.5 Hz sulla sonda CHO (P1), ma si evidenzia un picco a 485 Hz solo su CH1 (P3). Inoltre dal confronto degli spettri medi, figura 51, si può notare come il contenuto spettrale si deformi osservando il processo con una distanza

assiale di circa 57 cm (distanza P1-P3). Il decadimento delle scale turbolente si allontana da quello caratteristico dei gas (Kolmogorov), le emissioni radiative sono prodotte dalle polveri di carbone che hanno una fluidodinamica più dura (decadimento più veloce).

Per concludere il sistema ODC dimostra di essere un sistema capace di inseguire i processi termo fluidodinamici relativi alla combustione del polverino di carbone e non risente eccessivamente della possibile opacità legata all'ambiente (camera di combustione). Permette di individuare fenomenologie legate sia intimamente con il processo combustivo che con le condizioni operative di esercizio. Il suo utilizzo promette prospettive diagnostiche diverse dal convenzionale:

- moto/temperatura nella fornace;
- analisi dei segnali per la valutazione della possibilità di utilizzo della tecnica per la validazione di approcci modellistici avanzati (LES, interazione cinetica/turbolenza).

Caratterizzazione del particolato prodotto

L'attività è stata condotta in collaborazione con l'Università di Napoli Federico II (Dipartimento di Ingegneria Chimica).

Due sono gli aspetti fondamentali che rivestono un particolare rilievo ed interesse tecnico-scientifico:

- lo studio delle peculiari condizioni di combustione determinate dal forte ricircolo di gas esausti, ad alto tenore di CO₂ e H₂O, e dei regimi che si instaurano in queste particolari condizioni di funzionamento;
- l'analisi sperimentale del processo di combustione di uno slurry di carbone in reattori in scala pilota attraverso la correlazione delle emissioni di particolato alle condizioni di funzionamento del reattore ad alle caratteristiche chimiche del carbone.

Scopo dell'attività è la caratterizzazione in termini di composizione chimica e dimensionale del particolato prodotto in impianti in scala pilota alimentati con slurry di polverino di carbone al variare delle condizioni operative (pressione e composizione della miscela comburente) e delle caratteristiche dello slurry (tipo di carbone, diametro del polverino).

L'attività ha riguardato una serie di misure in campo che sono state effettuate in due diversi impianti: il reattore ISOTHERM-PWR di ITEA installato nell'impianto di Gioa del Colle ed il reattore FORSPER dell'ENEL, installato nell'area sperimentale di Livorno gestita in collaborazione con Università di Pisa e IFRF.

Sono state condotte tre campagne di misura. Le prime due a Gioa del Colle nei mesi di luglio e dicembre 2009. La terza campagna di misura è stata effettuata nel mese di settembre 2010.

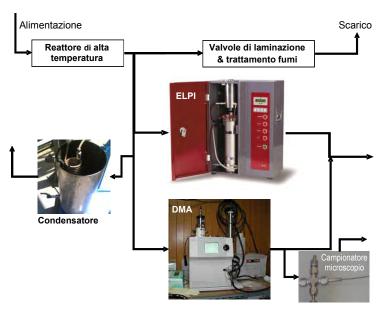


Figura 48. Schema della linea di campionamento

funzione di distribuzione del particolato è stato utilizzato un impattore ELPI, un misuratore di mobilità differenziale delle particelle (DMA) ed un sistema condensazione dell'acqua di combustione. Per la caratterizzazione chimico-fisica del particolato fine ed ultrafine, quello con diametro inferiore a 100 nm, raccolto sia sui vari stadi dell'impattore ELPI che nell'acqua di combustione, sono state effettuate misure di microscopia a forza atomica accoppiate con misure di Raman su singola particella (SERS - Surface Enhanced Raman Spectroscopy). Queste misure sono state affiancate da analisi spettroscopiche sui campioni raccolti in acqua. Misure di mobilità differenziale delle particelle e di scattering dinamico (DLS) nei campioni di acqua condensata sono state effettuate per ottenere informazioni sulle dimensioni e la

Per la misura della concentrazione e della

morfologia delle particelle. Infine misure di microscopia SEM-EDX sono state effettuate per la determinazione della composizione elementare delle polveri. In Figura 48 è riportato uno schema di campionamento delle polveri.

I gas prelevati dal reattore di alta temperatura sono stati convogliati lungo una linea di campionamento lunga circa 15 m e inviati al sistema di misura della concentrazione e delle dimensioni.

Una frazione dei gas ad alta temperatura è stata inviata ad un condensatore per la raccolta dell'acqua di condensa e del materiale in essa disciolto o sospeso. Il materiale condensato in acqua è stato analizzato con spettroscopia di assorbimento e di fluorescenza per la caratterizzazione chimica delle polveri raccolta in acqua e misure di Dynamic Light Scattering (DLS) per la determinazione della funzione di distribuzione delle dimensioni delle polveri.

La rimanente frazione dei gas prelevati ad alta temperatura è stata diluita con aria in rapporto 1/100 o 1/50. L'alto rapporto di diluizione è stato utilizzato per evitare la coagulazione delle particelle di piccole dimensioni e la condensazione del vapor d'acqua sulle particelle stesse. Il rapporto di diluizione più basso è stato utilizzato per rilevare particelle presenti in bassa concentrazione.

Una parte dei gas diluiti è stata inviata ad un misuratore di dimensioni in grado di rilevare particelle nell'intervallo dimensionale 30 nm fino a 10 μ m. Il misuratore è un Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) in dotazione all'ENEA. Sui supporti dell'ELPI è stata raccolta una aliquota di polveri sottoposte ad analisi per microscopia SEM con EDX.

Un'altra aliquota dei gas diluiti è stata analizzata utilizzando un Differential Mobility Analyzes (DMA), disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università di Napoli. Il sistema è stato sviluppato per misurare particelle con dimensioni tra 2 nm e 100 nm e quindi estendere il campo di misurabilità della funzione di distribuzione delle dimensioni delle polveri. A valle del DMA sono stati effettuati prelievi termoforetici su griglie per microscopia a forza atomica (AFM).

I campionamenti sono stati effettuati a valle del reattore di alta temperatura dell'impianto ITEA di Gioia del Colle. L'impianto è stato esercito in condizioni di oxy-combustione ad alta pressione.

Le misure con l'ELPI sono state effettuate nelle condizioni di impianto a regime con alimentazione di polverino di carbone. Le misure con DMA, AFM e condensa di acqua sono state realizzate quando l'impianto ha avuto un funzionamento stabile per un periodo sufficientemente lungo.

In Figura 49 sono riportate le funzioni di distribuzione delle dimensioni delle polveri determinate con l'ELPI mentre in Figura 50 quelle determinate con il DMA.

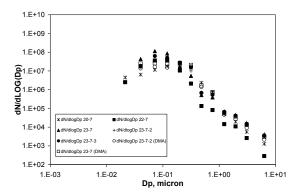


Figura 49. Distribuzione in numero delle dimensioni delle polveri misurate con l'ELPI

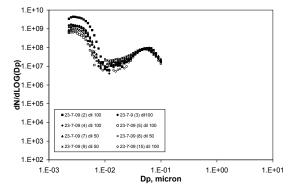


Figura 50. Distribuzione in numero delle dimensioni delle polveri misurate con il DMA

Le misure con l'ELPI mostrano una funzione di distribuzione in numero delle dimensioni delle particelle che si estende da 35 nm fino a 10 μ m con un picco a circa 70 nm. Il sistema non rileva particelle con diametro inferiore a 35 nm a causa di limitazioni dello strumento stesso. Il DMA invece estende l'intervallo di misura fino a circa 2 nm e mostra un primo picco a 3 nm ed un secondo a 65 nm. Le due funzioni di distribuzione in numero ben si raccordano e coprono l'intervallo dimensionale da 2 nm fino a 10 μ m come mostrato in Figura 51. La linea in figura indica il valore medio della funzione di distribuzione delle particelle ottenuto interpolando le due misure.

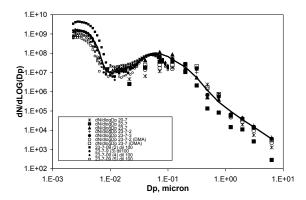


Figura 51. Distribuzione in numero delle dimensioni delle polveri misurate a valle del reattore di alta temperatura nell'intervallo 2 nm - 10 μ m

Le condense prelevate a valle del reattore sono state analizzate mediante misure di assorbimento spettrale nell'intervallo 200 - 800 nm. Lo spettro riportato in Figura 52 mostra un segnale continuo che decade da 200 nm fino a circa 300 nm ed un segnale di fondo con andamento lamda⁻¹. Il segnale di fondo può essere attribuito alla luce diffusa da particelle sospese o disciolte nelle condense mentre l'assorbimento decrescente dall'ultravioletto fino a 300 nm può essere attribuito a particolato carbonioso nanometrico sulla base di confronti con analoghe misure effettuate su polveri carboniose nanometriche effettuate in laboratorio.

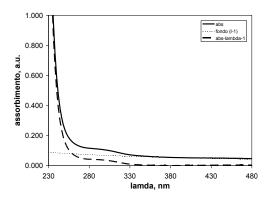


Figura 52. Spettro di assorbimento UV-visibile del campione raccolto in acqua

Per lunghezze d'onda nell'intervallo 300 - 800 nm si osservano bande di assorbimento tipiche di composti del Ba e del Si come evidenziato in Figura 53 dove è riportato lo spettro di assorbimento da 380 nm a 780 nm.

L'analisi al DLS delle polveri sospese in acqua di condensa ha mostrato una funzione di distribuzione con dimensioni superiori a 100 nm e un picco a 300 nm (figura 54). Tale materiale potrebbe essere responsabile delle bande di assorbimento di Figura 52 e provenire dall'additivo fluidificante delle scorie o dal materiale di cui è costituito il reattore più che dai processi di combustione del polverino di carbone.

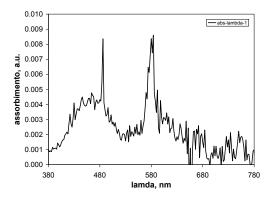


Figura 53. Spettro di assorbimento attribuibile a composti del Si e del Ba

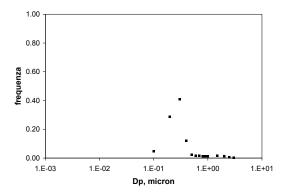


Figura 54. Funzione di distribuzione delle particelle misurata con il DLS

Una seconda campagna di misure è stata effettuata, sempre sull'impianto di Gioa del Colle in condizioni di oxycombustione ad alta pressione.

La funzione di distribuzione delle particelle misurata con il DMA ha mostrato un andamento bimodale simile a quello misurato nella precedente campagna di misura: un gran numero di particelle con diametro di circa 3 nm ed una seconda moda di particelle con diametro di circa 20 nm. Il diametro della seconda moda risulta notevolmente più piccolo di quello misurato nella precedente campagna di misura ed il numero di particelle notevolmente più basso (un ordine di grandezza più basso). In Figura 55 è riportato una funzione di distribuzione tipica misurata durante le prove.

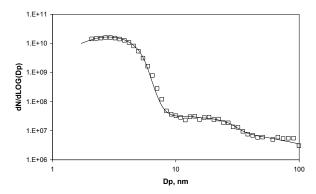


Figura 55. Distribuzione in numero delle dimensioni delle polveri misurate a valle del reattore di alta temperatura nell'intervallo 1-100 nm

Il materiale raccolto per impatto su supporti di alluminio dell'impattore ELPI è stato sottoposto ad analisi mediante un microscopio elettronico a scansione equipaggiato con un sensore per l'analisi elementare (EDX). In tal modo si è proceduto all'ispezione visiva del materiale raccolto e al rilevamento della sua composizione elementare.

I risultati sulla composizione sono raccolti in Tabella 6 in termini delle percentuali in peso di ognuno degli elementi rilevati.

Stadio 13 11 10 6 4 3 2 1 2.5 0.65 0.4 0.26 0.108 0.06 μm 10 4.4 1.6 1 0.17 0.03 C 64,7 47,72 9,61 8,96 42,07 6,33 6,77 6,73 9,16 7,51 13,84 22,73 0 7,26 28,34 42,88 32,13 42,61 40,73 44,22 44,27 40,35 10,86 46,16 41,36 6,02 21,94 8,82 0,94 7,41 7,91 7,29 7,54 7,06 Na 8,68 6,45 17,83 27,86 15,62 12,83 8,9 10,83 3,74 4,86 0,22 0,59 6,44 Mg 11,12 3,07 Si 0,37 0,24 1,47 1,88 0,33 2,77 3,02 2,9 3,7 2,81 1,34 Ρ 0,74 0,13 1,33 1,42 1,55 1,48 1,78 1,33 0,67 S 4,16 6,01 0,5 8,17 7,57 9,38 9,51 13,57 9,33 4,33 CI 0,5 2,04 2,35 0,92 0,36 0,67 0,19 0,19 0,38 Κ 0,89 0,28 2,98 3,35 5,65 6,58 9,88 4,79 2,35 0,98 0,86 1,58 1,8 1,52 2,05 0,93 0,77 Ca 0.47 1,64 0,18 1.61 Cr 2,16 2,06 0,71 5,01 4,45 5,19 4,61 6,32 4,82 1,95 Mn 1,19 2,52 3,06 0,8 1,22 0,41 0,67 0,32 0,45 0,2 0,61 1,68 4,59 7,39 5,72 8,58 7,74 4,97 5,05 7,56 Fe 12,01 8,43 7,13 5,45 Ni 1,77 0,61 1,82 1,47 1,51 1,28 1,35 1,44 1,16

1,61

1,3

0,92

0,83

0,62

0,56

0,22

Tabella 6. Composizione del materiale raccolto in termini di percentuale in peso

Tali percentuali sono normalizzate a cento sebbene non sia stato possibile rilevare la concentrazione di alcuni elementi sicuramente presenti. In particolare, tra gli elementi di interesse nelle ceneri di carbone, non è possibile distinguere con questa procedura l'alluminio contenuto nel materiale raccolto da quello che compone il supporto. Altri elementi non sono rilevabili a causa delle loro basse concentrazioni. Tali dati insieme alle immagini dei campioni ci permettono di ottenere informazioni sull'origine delle particelle di differenti dimensioni.

2,76

Zn

I supporti posizionati negli stadi dal 13 all'11 dell'impattore a bassa pressione, contengono piccole quantità di materiale come evidente in Figura 56. Tali particelle, con dimensioni comprese tra 2 e 10 μm , sono probabilmente attribuibili a incombusti parziali a causa del prevalente contenuto in carbonio.

La particelle raccolte negli stadi dal decimo all'ottavo, dimensioni comprese tra 0,8 e 2 μm , hanno la struttura di aggregati frattali come mostrato in Figura 57 e pertanto sembrano scaturire dalla crescita di oggetti di dimensioni inferiori. L'elemento prevalente in questo intervallo dimensionale è l'ossigeno indicando la prevalente presenza di ossidi. I più abbondanti sembrano essere quelli di sodio, magnesio, zolfo e ferro. Il contributo del materiale carbonio non è trascurabile anche per queste dimensioni sebbene sia molto inferiore al caso precedente.

Il materiale raccolto negli stadi dal settimo al terzo, dimensioni comprese tra 800 e 80 nm, sembra formare uno slurry denso come mostrato in Figura 58. In questa immagine le particelle non sono distinguibili le una delle altre in quanto compattate in strutture piramidali. L'ossigeno è l'elemento prevalente anche in questo intervallo dimensionale a causa della presenza di ossidi anche se non è possibile escludere la presenza di umidità. Oltre a sodio, magnesio, zolfo e ferro, un contributo significativo è dato anche dal silicio, dal fosforo e dal potassio. Il contributo di quest'ultimo è più rilevante nelle particelle di dimensioni inferiori. Il carbonio continua a

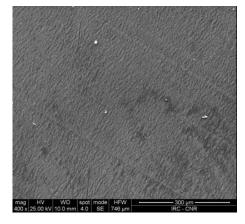


Figura 56. Immagine del materiale raccolto sul supporto posizionato all'undicesimo stadio (2,5 μ m) dell'impattore a bassa pressione

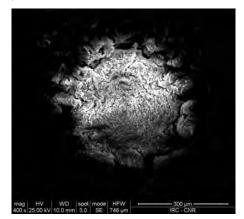


Figura 57. Immagine del materiale raccolto sul supporto posizionato al decimo stadio (1,6 µm) dell'impattore a bassa pressione

rappresentare una percentuale non trascurabile anche in questo intervallo dimensionale.

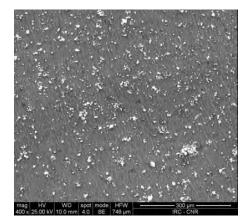


Figura 58. Immagine del materiale raccolto sulla lamina posizionata al quinto stadio (300 nm) dell'impattore a bassa pressione

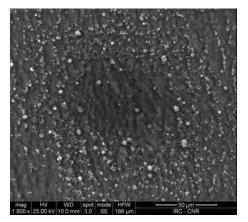


Figura 59. Immagine del materiale raccolto sulla lamina posizionata al primo stadio (30 nm) dell'impattore a bassa pressione

La Figura 59 mostra l'aspetto caratteristico del materiale raccolto nel primo e secondo stadio dell'impattore. Le particelle con dimensioni inferiori agli 80 nm, non sono ben distinguibili e formano un layer abbastanza omogeneo sul supporto. Alcune di esse sembrano avere struttura cristallina. In questo intervallo dimensionale la percentuale di carbonio cresce al diminuire delle dimensioni stesse, probabilmente a causa della presenza di fuliggine. L'ossigeno è ancora l'elemento dominante mentre tra gli inorganici prevalgono ancora zolfo, sodio, ferro e potassio. Non è possibile distinguere delle dimensioni caratteristiche preferenziali per i vari elementi. Questo è dovuto alla bassa risoluzione dimensionale della tecnica. Inoltre la nucleazione avviene a dimensioni inferiori ai 30nm cosicché le particelle osservate risultano dalla crescita di oggetti di dimensioni inferiori.

Una terza campagna di misure è stata effettuata a Livorno presso il centro ricerche ENEL sull'impianto denominato FORSPER. Sono state effettuate prove preliminari sul particolato presente nei fumi a valle del sistema di combustione alimentato a di polverino di carbone in diverse condizioni di miscela comburente: ossigeno, aria arricchita con ossigeno e aria.

Alcune misure sono state anche effettuate all'interno della camera di combustione mediante condensazione dell'acqua di combustione su cui saranno effettuate analisi chimiche e spettroscopiche.

Le misure con tecnica DMA sono state ripetute più volte per ogni modalità di campionamento date le considerevoli oscillazioni del sistema. I dati forniscono un quadro generale delle emissioni di particolato dell'impianto.

Dalle misure con DMA nei casi in cui non è stata effettuata la condensa dell'acqua presente nei fumi sono emerse funzioni di distribuzione in numero dei diametri bimodali con una moda a diametri dell'ordine di 2-4 nm e una moda in corrispondenza di

80-100 nm. Nel caso in cui è stata effettuata la condensa dei fumi si è rilevata la presenza di una funzione di distribuzione unimodale con un massimo intorno a 80-100 nm. Ciò mostra chiaramente la capacità dell'acqua di catturare le particelle nanometriche.

Le indagini effettuate con tecnica AFM hanno rivelato l'assenza di particelle isolate con diametri di pochi nanometri nei fumi campionati quando è stata effettuata la condensazione dell'acqua dei fumi. Sono stati individuati agglomerati di particelle di dimensione di pochi nanometri e cristalli di non ben specificata natura chimica. In Figura 60 e 61 si riportano delle immagine AFM ottenute sui campioni prelevati a Livorno.

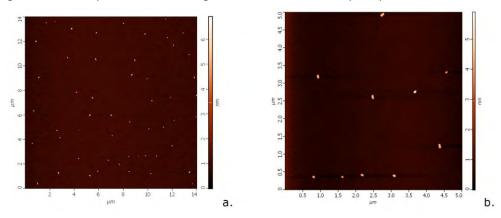


Figura 60. Particolato campionato in presenza del diluitore (diluizione 1-100) (a. campione 15 μm; b. campione 5 μm)

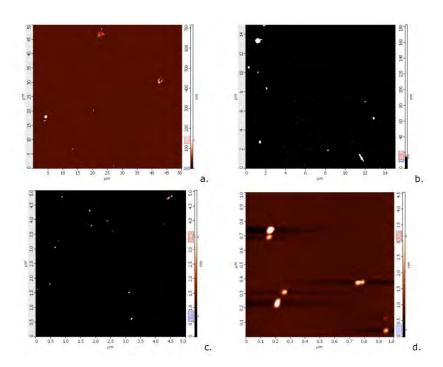


Figura 61. Particolato campionato in assenza del diluitore (a. campione di 50 μ m; b. campione di 15 μ m; c. campione di 5 μ m; d. campione di 1 μ m)

Data l'assenza di flussi termoforetici, l'adesione delle particelle sui substrati di mica è da attribuire al solo flusso convettivo il che non ha permesso un efficace campionamento del particolato disperso all'interno dei fumi. Le analisi tramite tecnica AFM sono quindi da correggere con l'efficienza di adesione in tali condizioni.

Le misure di funzione di distribuzione effettuate in diverse condizioni di alimentazione hanno confermato la bimodalità della funzione di distribuzione già rilevata con le misure di Gioia del Colle e hanno mostrato che la combustione in ossigeno riduce la moda di particelle con diametro di 50-100 nm ed aumenta quella con dimensioni 2-5nm. In Figura 62 è riportato il confronto delle funzioni di distribuzione in aria e ossigeno. Tale risultato è in accordo con i risultati ottenuti in laboratorio e fornisce importanti indicazioni sulla progettazione di sistemi di filtrazione per la rimozione di particelle ultrafini al variare delle condizioni di esercizio dell'impianto.

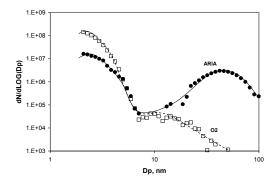


Figura 62. Distribuzione in numero delle dimensioni delle polveri misurate a valle del reattore di alta temperatura nell'intervallo 1 – 100 nm

Dalle misure effettuate sul campo è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- la combustione del polverino di carbone in impianti in scala pilota produce particolato con dimensioni che vanno da pochi nanometri a qualche μm;
- la funzione di distribuzione in numero delle dimensioni delle polveri è multimodale con mode evidenti a 3nm, 20 nm e 70 nm;
- l'abbondanza relativa delle mode della funzione di distribuzione dipende dalle condizioni di esercizio dell'impianto: la combustione in ossigeno riduce la formazione di particelle con diametro di 70 nm ed aumenta quella di particelle con diametro di 3 nm;

- le polveri con dimensioni microbiche hanno un elevato contenuto di incombusti e derivano da polverino parzialmente bruciato;
- le polveri con dimensioni nanometriche hanno uno spettro di assorbimento simile a quello del carbonio organico nanometrico prodotto nella combustione ricca degli idrocarburi;
- particelle di ossidi metallici sono presenti in tutto l'intervallo dimensionale;
- le polveri nanometriche hanno una grossa affinità in acqua e sono parzialmente rimosse dalla condensazione dell'acqua di combustione.

C. Sviluppo di componenti e analisi di sistema

Pompa Volumetrica (TRIPLEX) per alimentazione di slurry di carbone

Al fine di assicurare la stabilità di alimentazione dello slurry è stata sviluppata e testata un'innovativa tecnologia di pompaggio basata su un dispositivo volumetrico a pistoni, nel quale attraverso un adeguato profilo delle camme viene assicurata la costanza della portata entro una oscillazione massima del 3%, mentre il meccanismo desmodromico a camme assicura la costanza della pressione di alimentazione.

Il nuovo sistema è caratterizzato da un rendimento energetico di circa il 30% superiore a quello dei normali sistemi in uso, ed un rendimento volumetrico del 98%.

L'attività si è articola in più step:

- messa a punto della tecnologia con prove di laboratorio condotte su facility ENEA in piccola scala. Sono state provate soluzioni tecniche alternative in relazione al tipo ed azionamento delle valvole, al tipo di diaframmi di separazione tra il fluido di processo (slurry) e quello ausiliario (olio), in grado di risolvere i problemi di continuità e stabilità riscontrati sui sistema di alimentazione dello slurry convenzionali;
- verificata la tecnologia, è stata implementata la dotazione diagnostica (trasduttori di pressione, accelerometri, ecc.) al fine di fornire un ulteriore valore aggiunto rappresentato dalla capacità di "autodiagnostica" del componente stesso e il suo controllo anche in modalità remota;
- progettazione di una unità modulare per l'alimentazione del reattore ISOTHERM.

Nel dettaglio il processo di valutazione della pompa TRIPLEX a zero pulsatilità come sistema di alimentazione slurry di carbone si è articolato in due fasi:

- a) test funzionale-qualitativo, mirato alla verifica delle possibilità funzionali: possibilità di pompaggio di slurry di carbone, criticità funzionali di tipo on/off e indicazioni di modifiche strutturali consistenti, continuità di esercizio, deperibilità del componente. La concentrazione carbone/acqua usata per la composizione dello slurry è quella in uso sull'impianto ISOTHERM di ITEA;
- b) **test funzionale-analitico**, mirato alla validazione analitica della funzionalità: entità della pulsatilità, curve di rendimento e di lavoro. Questo test implica anche lo studio della fluidodinamica dello slurry di carbone e della sua interazione con la funzionalità della pompa.

Per il test qualitativo, mirato alla verifica della continuità di esercizio e della deperibilità del componente è stato approntato un loop chiuso di prova, riportato in figura 66, costituito da: serbatoio in pressione contenente slurry di carbone, pompa triplex, misuratore di pressione, carico fluidodinamico e valvola di spillamento per la stima di portata in pressione. Il loop è anche dotato di una adduzione acqua in pressione per il pre e post lavaggio.

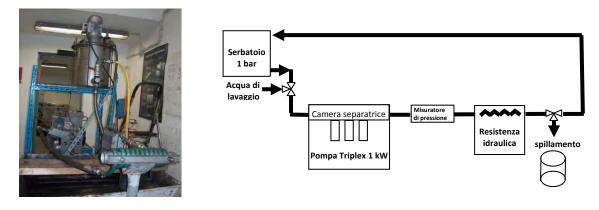


Figura 63. Prova pompa triplex, loop-slurry e relativo diagramma funzionale

Il sistema, come da diagramma funzionale riportato in Figura 66, è costituito da:

- a. serbatoio in acciaio, a chiusura ermetica, per una pressione di esercizio di 1 bar, dotato di valvola di sicurezza. Contiene un agitatore necessario a mantenere lo slurry, fluido non newtoniano, in uno stato di viscosità e fluidità accettabile (lo slurry in condizione statica si separa nelle due fasi che lo costituiscono, solida e liquida, e si altera pesantemente la sua caratteristica fluidodinamica);
- b. pompa triplex a zero pulsatilità da 1 kW (componente sotto test);
- c. misuratore di pressione con pressostato, tarato a 20 bar. Il pressostato esegue un intervento veloce di protezione togliendo l'alimentazione elettrica al motore della pompa quando si verifica il superamento del limite di pressione impostato;
- d. carico idraulico variabile, ottenuto con un tubo flessibile (pressione max 30 bar) avvolto a spirale attorno ad un tubo di acciaio, e comprimibile, per diminuirne la sezione utile ed aumentare il carico idraulico, tramite due barre in metallo laterali e serrabili, a modo di morsa, con bulloni di serraggio;
- e. valvola a tre vie per lo spillamento, in pressione dello slurry. La valvola garantisce il mantenimento in pressione del serbatoio, durante lo spillamento;
- f. slurry di carbone ed acqua.

Il fluido utilizzato nel loop è uno slurry costituito da polverino di carbone a grana omogenea, di diametro 0,1 mm, ed acqua. E' stato preparato secondo le indicazioni fornite da ITEA: volumi uguali dell'acqua e del carbone, in questo caso il rapporto delle masse carbone acqua è 1,13 a 1. La densità dello slurry ottenuto è: 1,217 g/cc. Lo slurry stabilizzato e decantato presenta 1/3 di volume di acqua in eccesso al carbone saturo di acqua, che occupa i restanti 2/3.

La velocità di separazione della parte solida da quella liquida è alta, pertanto il fluido trattato è molto instabile dal punto di vista fluidodinamico.

o Procedura per il test funzionale-qualitativo

La procedura seguita per attuare il test consiste in quattro azioni.

a. Innesco pompa

Il processo di innesco pompa, è una fase particolarmente delicata in quanto implica due attenzioni distinte:

- la prima che lo slurry non si sia separato ed abbia ostruito il condotto;
- la seconda è che la somma (pressione aria [nel nostro caso 1 Bar] nel serbatoio slurry) + (pressione dovuta al dislivello serbatoio pompa) + (valore assoluto depressione nel cilindro pompa in riempimento [nel nostro caso non superiore a 0.5 Bar]) sia maggiore o uguale alla massima perdita di carico nel condotto tra serbatoio slurry e pompa alla massima portata di lavoro: ciò garantisce che la portata in entrata alla pompa sia uguale a quella che la pompa volumetrica richiede ed invia all'uscita. Se questa condizione non viene realizzata la pompa si blocca con i relativi inconvenienti della ostruzione della tubazione di ingresso.

b. Messa in pressione del loop

La messa in pressione del loop viene ottenuta aumentando il carico, ovvero la resistenza idraulica. Durante il raggiungimento della pressione voluta (non superiore ai 10 bar per questioni di sicurezza) è possibile che lo slurry abbia un comportamento fluidodinamico instabile. Infatti, per raggiungere il carico idraulico adeguato all'ottenimento della pressione desiderata è possibile che la sezione di strozzamento del tubo sia troppo piccola rispetto a quella necessaria affinché le dimensioni dei grani di carbone non costituiscano un problema di scorrimento: raggruppandosi in prossimità della strozzatura e ostruendo completamente il condotto. L'anomalia si ha quindi per questione geometrica e non di viscosità. Si è notato che con resistenze elevate, in prossimità della strozzatura si possono provocare fenomeni di turbolenza che giocano a favore della stabilità del flusso, e quindi anche della pressione di esercizio, in quanto non favoriscono l'aggregamento dei granuli di carbone. Questo ci permette di ipotizzare che l'utilizzo di un sistema che vibri il fluido, e che quindi lo mantenga uno stato dinamico anche se fermo (soprattutto nelle zone critiche), sia una soluzione da non trascurare per garantire una buona funzionalità del loop.

c. Spillamento

Lo spillamento è l'operazione che viene effettuata per misurare la portata e per verificare (anche se non in modo ortodosso) che il sistema mantenga le sue caratteristiche di generatore di portata, ossia di indipendenza della portata dalla pressione del carico. Il metodo usato consiste nella registrazione, tramite telecamera della sequenza relativa al riempimento di un volume noto (contenitore da 2 litri). Per ogni misura viene registrata, la pressione di esercizio e la frequenza dell'inverter in modo da risalire, conoscendo la

cilindrata complessiva dei tre pistoni (53 cc), ed il rapporto motore/asse-pompa (72/14) anche alla portata volumetrica corrispondente. La possibilità di rivedere rallentati i fotogrammi (acquisiti a 25 Hz) permette di misurare, con una certa correttezza, il tempo di riempimento del contenitore. Il contenitore, una volta pieno, viene pesato con una bilancia elettronica in modo da stimare la portata massica con una discreta precisione, da cui derivare la portata in volume essendo nota la densità dello slurry.

d. Valutazione dei risultati

Sono state fatte due serie di misure di portata massica a frequenza diversa (50 e 40 Hz) fissa e pressione di carico variabile con 4, 6, 8, 10 bar. Questo per avere due curve di confronto e poter così verificare il possibile diverso comportamento della pompa.

Dati statistici:

50 Hz portata media misurata = 171,03 g/s dev. standard = 8,16 40 Hz portata media misurata = 113,38 g/s dev. standard = 10,05.

Poiché la portata volumetrica a 50 Hz è pari a 163 cm³/s (portata in massa = 198,4 g/s) ed a 40 Hz è pari a 128,8 cm3/s (portata in massa = 156,8 g/s), si ottiene uno scostamento tra valori calcolati e valori misurati pari al 14 % a 50 Hz e pari al 28 % a 40 Hz. Questo risultato è da attribuire ai riflusso dinamico (durante la fase di chiusura) e statico (a valvola chiusa, per imperfetta chiusura) delle valvole di entrata e di uscita

Tabella 7. Dettaglio delle misure effettuate con frequenza di inverter 50 e 40 Hz e a diverse pressione di esercizio

filename	Frequenza inverter (Hz)	Pressione in uscita (bar)	t ₀ (s)	t ₁ (s)	t _{riempimento}	Pesata (g)
910	50	4	20	35	15	2530
912	50	6	28	42	14	2521
918	50	10	26	41	15	2642
920	50	10	26	41	15	2558
923	50	10	26	41	15	2599
925	50	8	27	42	15	2642
927	50	8	26	42	16	2705
929	50	8	29	46	17	2551
931	50	6	25	40	15	2539
933	50	6	22	38	16	2621
935	50	4	25	40	15	2674
937	50	4	25	40	15	2657
939, 940, 941	40	10	2	27	25	2701
944, 945	40	8	2	27	25	2598
950	40	8	6	30	24	2553
952, 953	40	6	1	23	22	2734
955, 956	40	6	0	22	22	2734

I risultati riportati nella Tabella 7 sono stati graficati in modo da verificarne l'andamento.

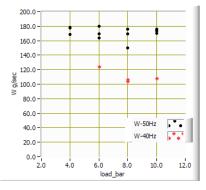


Figura 64. Rappresentazione grafica delle due curve nero (50Hz) e rossa

o Deperibilità delle valvole

La pompa, dopo le misure è stata smontata per verificare lo stato delle valvole (Figura 65). Queste mostrano un logorio evidente dove l'otturatore batte sulla tazza di contenimento. Il materiale delle valvole è acciaio inox

normale. Un primo miglioramento dovrebbe essere ottenuto quindi trattando con un processo di indurimento il materiale.

Il fenomeno essenzialmente è dovuto all'effetto della pressione di carico che completa la chiusura della valvola (sia per la valvola di entrata, sia per quella di uscita) quando c'è ritardo di chiusura dell'otturatore rispetto all'inizio della fase in cui tale valvola deve essere chiusa. L'utilizzo di valvole attive annulla questo effetto in quanto è garantita la corretta tempistica nella chiusura delle valvole.

Riprogettazione del corpo pompa: Impianto di test

E' stato riconfigurato il loop di prova della pompa, a sviluppo orizzontale, opportunamente strumentato con trasduttori di pressione, in modo da poter valutare funzionalità e difetti congeniti di questa



Figura 65. Vista dello stato delle valvole dopo un esercizio 5 giorni (6 ore gg)



Figura 66. Nuovo loop di prova strumentato

Gli obiettivi del nuovo corpo pompa sono:

- evitare percorsi non lineari del flusso pompato;
- evitare zone di ristagno;
- realizzare un sistema di valvole più efficiente a controllo attivo.

I criteri progettuali applicati nel disegno del nuovo prototipo consistono nelle minimizzazione simultanea di tre variabili giudicate critiche in virtù delle evidenze sperimentali acquisite nella campagna prove del precedente modello. Nella fattispecie: la minimizzazione dei volumi di lavoro è direttamente correlata alla riduzione della pulsatilità, la minimizzazione delle linee di flusso è correlata alla riduzione di malfunzionamenti e avarie dovute a zone di ristagno e di occlusione del fluido, la minimizzazione della deformazione del diaframma attiene all'affidabilità del dispositivo stesso. In virtù delle considerazioni di cui sopra e data la natura prototipale del dispositivo, si è proceduto al disegno del nuovo sistema privilegiando al massimo la modularità dei componenti, onde poterli facilmente sostituire con altri di diversa geometria nel caso nuove evidenze sperimentali lo rendessero necessario.

Nell'ottica di voler mantenere il medesimo azionamento meccanico, ampiamente testato, si è provveduto al disegno di una piastra rigida in acciaio inox, con la duplice funzione di interfaccia verso l'azionamento già esistente e di supporto per i successivi elementi. Solidale alla piastra di ancoraggio appena citata, è la camera olio, la cui funzione è quella di contenere il fluido di spinta che diffonde il moto generato dai pistoni. Anche questa è stata completamente ridisegnata onde eliminare tutti quei fattori giudicati critici. La camera olio oltre alle sue peculiarità funzionali, svolge anche la funzione rispettivamente di supporto e centraggio per i moduli seguenti, ovvero il telaio diaframmi e la camera slurry. Il primo è stato concepito per garantire il corretto serraggio e centraggio di un elemento altrimenti intrinsecamente labile, ovvero il diaframma, costituito da un materiale assimilabile alla gomma. Il telaio diaframmi costituito da due semi elementi rigidi, ospita i diaframmi veri e propri, in modo da poter agevolare l'assemblaggio e il corretto posizionamento degli stessi. I diaframmi fungono da interfaccia a tenuta ermetica tra il fluido di lavoro (olio) e il fluido di processo (slurry). Quest'ultimo viene elaborato in un ulteriore modulo, la camera slurry, accoppiata meccanicamente con la camera olio, ma separata

fluidodinamicamente da essa per mezzo dei diaframmi. I moduli sopra esposti sono assemblati l'uno all'altro secondo lo schema in Figure 67.

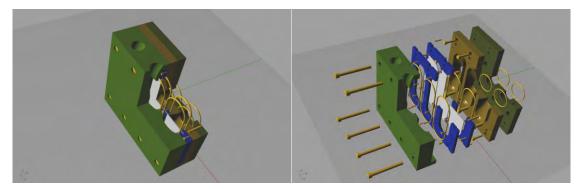


Figura 67. Componenti assemblati ed esploso del corpo pompa

Particolare attenzione è stata inoltre rivolta al disegno delle valvole, altro elemento particolarmente critico nella configurazione precedente. Dopo aver esplorato diverse soluzioni, ci si è orientati verso valvole a stelo, con asta a tenuta e molla esterna a contrasto. Tale configurazione è stata ritenuta la più versatile dal punto di vista dell'adattamento di diversi otturatori e di eventuali soluzioni di tipo attivo. Nelle Figure 68 e 69 sono illustrati il corpo pompa assemblato ed un particolare esploso delle valvole ed otturatori rotativi.

Per tutto quanto esposto, è stato utilizzato come ambiente di progettazione meccanica un ambiente 3D (tipo RHINOCEROS) in modo da produrre i progetti esecutivi sotto forma di file parametrici pronti per la realizzazione.

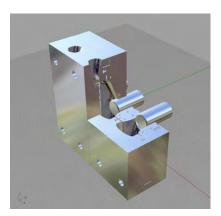


Figura 68. Rendering del corpo pompa assemblato con pistoni posizionati

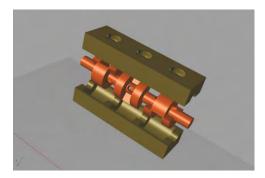


Figura 69. Esploso valvola ad otturatori rotativi

Analisi di sistema per l'efficientamento del ciclo

Nell'ambito del progetto OXYC, con obiettivo la realizzazione di un impianto pilota da 48 MWt presso la centrale termoelettrica ENEL di Brindisi, è stata effettuata una campagna di simulazioni al fine di valutare la performance di una sezione dell'impianto, con limiti di batteria relativi all'"Anello ISOTHERM" come da specifica tecnica ENEL.

Le simulazioni sono state effettuate con il codice commerciale ChemCAD (Figura 70), utilizzando come dati in ingresso i valori di progetto, di esercizio e le informazioni sul combustibile di alimentazione contenute nella specifica tecnica ENEL già citata. Il protocollo seguito nell'effettuare la campagna può essere sintetizzato in quattro punti fondamentali:

- 1. definizione del layout del sistema;
- 2. definizione delle condizioni ambientali di riferimento;
- 3. definizione della composizione del combustibile;
- 4. definizione delle condizioni operative.

I punti 1 e 2 costituiscono la parte vincolata, ovvero una volta istruiti sono rimasti invariati per tutte le simulazioni, mentre i punti 3 e 4 costituiscono la parte variabile, rispetto ai quali è stata valutata la sensibilità dei bilanci massa-energia. Nella fattispecie, le simulazioni sono state effettuate impostando scenari in cui la composizione del combustibile rimane costante e le condizioni operative variano tra il 10% e il 100% del carico massimo continuo (CMC), a passi del 10%. In ogni scenario è stata imposta una composizione diversa del combustibile di alimentazione, al fine di riprodurre la variabilità delle specie carbonifere normalmente disponibili nell'impianto di Brindisi. Per ciascuna specie carbonifera sono stati utilizzati i valori di riferimento indicati nella specifica ENEL, mantenendo costante la percentuale di acqua aggiunta per la formazione dello slurry.

I risultati delle simulazioni sono stati raggruppati per scenario e riprodotti in forma sia grafica che numerica. I risultati di questa attività sono descritti in dettaglio nel documento completo disponibile sul sito ENEA.

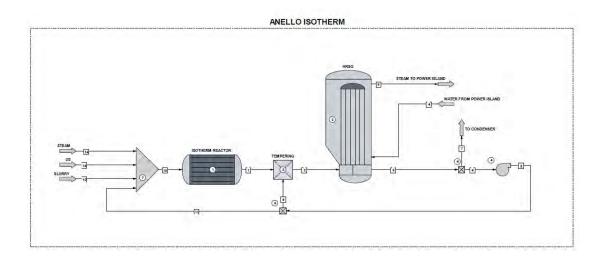


Figura 70. Esempio di layout impiantistico di massima utilizzato per le simulazioni con codice "ChemCAD"

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università i Napoli "Federico II" - Dipartimento di Ingegneria Chimica

Nell'ambito dell'Obiettivo A, presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica sono state studiate ed identificate le condizioni di stabilità locali che caratterizzano la combustione in condizioni di forte ricircolo di gas esausti.

Nell'ambito dell'Obiettivo B, in collaborazione con ENEA, sono state condotte attività volte alla caratterizzazione dimensionale e morfologica del particolato anche sub-micronico allo scarico dei sistemi sperimentali in oggetto, oltre a mettere a punto un protocollo di misura affidabile.

Politecnico di Milano - Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica

Nell'ambito dell'Obiettivo A, il Dipartimento di Chimica Materiali e Ingegneria Chimica ha sviluppato modellistica avanzata relativa alla cinetica di volatilizzazione e ossidazione del carbone, che tenga conto della particolare natura del carbone Sulcis, ricco di zolfo.

Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali (accordo di collaborazione)

Nell'ambito dell'Obiettivo B l'Università di Pisa collabora con ENEA alla sperimentazione sugli impianti FOSPER e IPFR, mettendo a disposizione strumentazione di tipo convenzionale per la misura di temperatura, velocità, irraggiamento e specie chimiche, oltreché gli impianti suddetti.

Università di Roma "la Sapienza" - Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica

Nell'ambito dell'Obiettivo A, Il Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica si occupa della modellistica multifase, in ambiente parallelo per la simulazione di processi di combustione di sistemi acqua- gas-solido (carbone).

Università di Roma "La Sapienza - Dipartimento di Chimica, Materiali e Ambiente

Nell'ambito dell'Obiettivo A, il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ambiente collabora con ENEA allo studio del fenomeno di devolatilizzazione in condizioni flameless, volto all'interfacciamento diretto con codici CFD RANS (tipo FLUENT).

ITEA-SOFINTER (partner senza contributo)

ITEA-SOFINTER ha messo a disposizione della sperimentazione l'impianto pilota ISOTHERM-PWR ed il personale per la conduzione delle prove.

Ansaldo Caldaie (partner senza contributo)

Ansaldo Caldaie ha messo a disposizione della sperimentazione l'area sperimentale che ospita l'impianto pilota ISOTHERM-PWR, i servizi ausiliari ed il personale Ansaldo normalmente coinvolto nella conduzione delle prove.

International Flame Research Foundation (IFRF partner senza contributo)

International Flame Research Foundation ha messo a disposizione della sperimentazione gli impianti FOSPER e IPFR per la conduzione delle prove.

Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂

Le tecnologie per l'utilizzo del carbone in sistemi di generazione elettrica che prevedono la cattura ed lo stoccaggio della CO₂, sono attualmente entrate in una prima fase dimostrativa, con un rilevante numero di iniziative per la realizzazione di impianti dimostrativi a livello europeo ed internazionale. Su queste tematiche i programmi di ricerca e sviluppo hanno già dato buoni risultati e molte delle tecnologie necessarie per la cattura ed il sequestro sono già disponibili. Queste ultime possono quindi già oggi essere integrate con le moderne tecnologie applicate per ridurre drasticamente le emissioni di inquinanti ed incrementare l'efficienza energetica, al fine di iniziare la fase di dimostrazione industriale per produrre elettricità da carbone con ridotti costi ed emissioni di CO₂ prossime allo zero.

In questo contesto la Commissione Europea ritiene che definendo condizioni di mercato che rispecchino vincoli chiari e ambiziosi in termini di emissioni di carbonio, si potranno, con un impegno continuo, rendere praticabili sotto il profilo commerciale le tecnologie del carbone sostenibile nell'arco di 10-15 anni. Ciò richiederà però coraggiosi investimenti industriali per finanziare sia una serie di impianti dimostrativi (all'interno e all'esterno dell'Uniome Europea), che le iniziative politiche connesse per un periodo relativamente prolungato (fino almeno al 2020), nonché le necessarie attività di ricerca e sviluppo che dovranno seguire in parallelo tutta la fase di dimostrazione.

Le tecnologie di cattura pre-combustione operano una "decarbonizzazione" del combustibile fossile a monte della combustione rilasciando un gas ad alto contenuto di idrogeno che può essere utilizzato come combustibile in impianti di produzione elettrica in sistemi turbogas o in usi alternativi (trazione, chimica di base, ecc.). In generale, dal punto di vista energetico, la penalizzazione dovuta al loro utilizzo è ridotta sia perché si opera su flussi in quantità limitate (rispetto ai fumi esausti) sia perché si può operare in pressione, condizione che facilita la cattura e rende meno dispendiosa la rigenerazione dei medium che operano la cattura di CO₂.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

All'interno del progetto sono previste una serie di azioni atte a sostenere le attività di ricerca volte alla riduzione dei costi di investimento relativi a centrali di produzione di energia elettrica basate sull'impiego di tecnologie che utilizzano carbone e si avvalgono di sistemi di cattura e sequestro della CO₂, condizione considerata essenziale per lo sviluppo dei moderni impianti a carbone. Il presente progetto affronta le problematiche dell'intero ciclo di produzione energetica, studiando metodologie per il contenimento dei costi che vanno dall'impiego di tecnologie di generazione elettrica in impianti integrati di gassificazione del carbone (IGCC - Integrated Gasification Combined Cycles) con cattura della CO₂, fino al sequestro in depositi perenni con tecniche di confinamento ECBM (Enhanced Coal Bed Methane).

Obiettivo delle attività è quello, da un lato di sviluppare un processo "intrinsecamente pulito" in grado di abbattere il costo dei sistemi di trattamento dei gas esausti e dall'altro di aumentare l'efficienza di conversione energetica che passa attraverso l'ottimizzazione della componentistica relativa alla generazione ed al trattamento del syngas. Un ulteriore apporto è poi fornito dallo sviluppo di specifiche tecnologie che rendono meno costosi i processi di cattura della CO_2 e dalla verifica sperimentale della fattibilità tecnico-economica di tecnologie di confinamento della CO_2 in bacini carboniferi profondi non coltivabili. Il fine ultimo è quello di configurare un sistema unico che assomma in sé la funzione di generatore di energia elettrica "pulita" con quella di serbatoio di stoccaggio definitivo della CO_2 in linea con le tendenze attuali e gli impegni internazionali assunti dal nostro Paese sulle tematiche energetico-ambientali.

In particolare le attività riguardano lo sviluppo e l'ottimizzazione di tecnologie CCS di tipo pre-combustione più promettenti in una prospettiva di medio periodo. Nell'ottica di prosecuzione del ruolo di Advisor che ENEA sta conducendo per il Ministero dello Sviluppo Economico, esse vengono svolte in coordinamento con RSE e CNR in una comune azione di formazione/informazione rivolta agli stakeholders ed a tutti gli utenti. Le attività sugli impianti di gassificazione equipaggiati con cattura della CO₂ vengono svolte in stretta sinergia con Sotacarbo, concentrando le attività di ricerca presso ENEA e quelle di applicazione ed ottimizzazione su scala industriale presso la Piattaforma Pilota SOTACARBO. Inoltre le attività sullo stoccaggio, che riguardano uno studio di approfondimento locale dell'area del Sulcis, vengono svolte in coordinamento con quelle di survey geologico di

RSE che avvalendosi dei risultati dell'attività potrà poi meglio dettagliare la zona del Sulcis nel progetto di "mappatura" dei siti idonei allo stoccaggio della CO₂ sull'intero territorio nazionale.

Il progetto, di durata triennale, comprende la sperimentazione ed ottimizzazione di impianti di gassificazione e di sistemi di pulizia a freddo del syngas, lo studio e la sperimentazione di processi chimico-fisici di trattamento e conversione del syngas, di processi e sistemi di cattura della CO₂ e di tecnologie di confinamento della CO₂ in bacini carboniferi profondi e acquiferi salini nonché l'analisi prestazionale di un sistema unico di generazione elettrica con tecnologie CCS.

L'attività nel corso del primo anno si è realizzata nei seguenti ambiti:

- studio e sperimentazione della gassificazione operata con CO₂ come agente gasificante;
- studio e sperimentazione di diversi sorbenti per la desolforazione del syngas a caldo;
- studi preliminari per l'applicazione delle tecnologie ECBM al bacino del Sulcis.

L'approfondimento di tali aspetti ha consentito di sviluppare i processi di produzione e di desolforazione a caldo di syngas da carbone con l'obiettivo di incrementare notevolmente le prestazioni di impianti commerciali di piccolamedia taglia, con una riduzione dei costi di investimento e di gestione degli stessi. Parte delle attività sono state effettuate sulla Piattaforma Pilota Sotacarbo, opportunamente adeguata dal punto di vista impiantistico. Per questo scopo sono stati effettuati diversi investimenti nel progetto e nella modifica degli impianti suddetti. Sono stati altresì messi a punto alcuni degli strumenti necessari per la realizzazione dei modelli delle sezioni di gassificazione e desolforazione dell'impianto, che ne rappresentano il funzionamento nelle diverse condizioni.

Relativamente al tema ECBM sono stati condotti diversi studi, a partire dall'analisi dello stato dell'arte, fino alla valutazione della capacità di CO₂ potenzialmente immagazzinabile e allo studio di fattibilità per l'applicazione di queste tecnologie all'area del bacino minerario del Sulcis. Per quanto riguarda le attività sperimentali, sono state condotte diverse prove di desolforazione a caldo e di gassificazione con CO₂ presso Sotacarbo

Le attività del secondo anno si articolano in sei obiettivi:

A. Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

Proseguono presso ENEA e presso la piattaforma pilota Sotacarbo le attività sperimentali sugli impianti di gassificazione con aria, ossigeno e CO₂, con prove e test relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature.

In questo ambito vengono apportate alcune modifiche alla componentistica di impianto degli impianti preesistenti presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo, migliorando il sistema di scarico ceneri, la strumentazione e l'analitica di corredo in modo da poter effettuare sperimentazioni più accurate e con funzionamento in continuo. Vengono effettuati a partire dal syngas prodotto test di produzione di energia elettrica tramite l'utilizzo del preesistente motore a combustione interna alimentato a syngas e test di conversione e purificazione fino ad ottenere un gas ad elevato tenore di idrogeno con l'ausilio di sistemi a pressione variabile (PSA). In questo stesso frangente vengono valutati i costi di conduzione degli impianti e dei processi.

B. Sperimentazione e ottimizzazione di sistemi di pulizia a freddo del syngas

Vengono svolte attività sperimentali di trattamento a freddo del syngas prodotto sugli impianti di gassificazione presso la piattaforma pilota Sotacarbo con prove e test volti ad acquisire dati e competenze sul processo di desolforazione e su quello di separazione di polveri, tar. Vengono eseguiti test di clean up del syngas in torri di lavaggio e colonne a riempimento con diversi solventi liquidi (soluzioni acide e alcaline, ammine). Vengono altresì effettuati test con sistemi di depolverazione elettrostatica ad umido (WESP). In questo stesso frangente vengono valutati i costi di conduzione degli impianti e dei processi sia in termini energetici che economici.

C. Studio e sperimentazione di processi chimico-fisici di trattamento e conversione del syngas

Vengono svolte presso i laboratori ENEA attività sperimentali di trattamento del syngas e dei gas acidi residui della rigenerazione dei medium utilizzati nella cattura dei gas acidi sugli impianti di gassificazione con prove e test volti ad acquisire dati e competenze su processi e sistemi.

Avvalendosi della disponibilità di impianti, sezioni di prova e laboratori dotati di strumentazione e diagnostica avanzata e dell'esperienza pluriennale del personale vengono condotte sperimentazioni su reattoristica in piccola e media scala, eseguendo prove in sezioni a media e alta temperatura che prevedono lo screening di diverse

metodologie di trattamento con la valutazione di attività catalitica, fenomeni di invecchiamento e avvelenamento in presenza di polveri, tar e composti dello zolfo.

D. Studio e sperimentazione di processi e sistemi di cattura della CO2 con rigenerazione dei solventi

Vengono svolte attività sperimentali sulla cattura della CO₂ dal syngas prodotto sugli impianti di gassificazione della Piattaforma Pilota con prove e test volti ad acquisire dati e competenze sul processo in parola. Vengono in quest'ambito eseguiti test in colonne a riempimento dove il syngas viene trattato con l'utilizzo di soluzioni amminiche (MEA e MDEA). Viene altresì effettuata, con l'ausilio di modelli e codici si simulazione, la progettazione, la realizzazione e la sperimentazione di un'unità completa di rigenerazione termica del solvente che andando a completare la dotazione dell'impianto in scala laboratorio consente di operare in continuo con la cattura della CO₂ dal syngas che proviene dal gassificatore. In questo stesso frangente vengono valutati i costi di conduzione degli impianti e dei processi sia in termini energetici che economici. Queste attività sono complementari a quanto svolge RSE sullo sviluppo di ammine su supporto solido per sistemi di cattura CO₂ sui fumi di combustione.

E. Studio e sperimentazione di tecnologie di confinamento della CO₂ in bacini carboniferi profondi e acquiferi salini

L'obiettivo prevede lo sviluppo di studi geosismologici, l'avvio di attività analitiche di laboratorio, l'effettuazione di indagini geologiche mirate all'applicazione nel bacino carbonifero del Sulcis di tecniche di confinamento della CO₂ all'interno degli strati carboniferi non coltivabili (ECBM) e negli acquiferi salini sottostanti. Partendo dalla collaborazione con operatori già coinvolti per competenze geologiche e know how tecnologico nell'ambito del confinamento della CO₂, si dà inizio in questo frangente alla valutazione, progettazione e realizzazione di un primo set up sperimentale che fornirà utili dati sui processi di iniezione e monitoraggio di un impianto prova Test Site a cui farà seguito una prima campagna sperimentale di iniezione e monitoraggio. I dati ricavati saranno elaborati e resi di pubblico dominio per ulteriori azioni di ricerca e sviluppo, in particolare verso RSE che potrà meglio dettagliare la zona del bacino del Sulcis nel progetto globale di mappatura dei siti idonei al confinamento della CO₂ nell'intero territorio nazionale.

F. Analisi prestazionale di un sistema unico di generazione elettrica con tecnologie CCS

L'obiettivo prevede di effettuare, con l'ausilio di software commerciali, lo sviluppo di modelli teorici e simulazioni numeriche di un unico sistema di generazione elettrica equipaggiato con cattura e stoccaggio della CO₂. In questo ambito vengono analizzati sistemi per il controllo di funzionamento degli impianti con applicazione e sviluppo di diagnostica avanzata ed effettuate delle valutazioni preliminari per l'individuazione della miglior taglia e tecnologia per una realizzazione di impianto considerando anche l'integrazione di sistemi di produzione di combustibili di opportunità sia liquidi che gassosi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Le attività svolte hanno consentito l'approfondimento di aspetti scientifici e tecnologici relativi ai processi di produzione e di trattamento del syngas da carbone con l'obiettivo di incrementare notevolmente le prestazioni di impianti di media taglia con una riduzione dei costi di investimento e di gestione degli stessi.

A. Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

Grande enfasi è stata data nella seconda annualità alla sperimentazione sul campo e all'ottimizzazione degli impianti e sistemi di gassificazione del carbone. Per questo scopo sono stati effettuati diversi investimenti, in particolare nella modifica della Piattaforma Pilota Enea/Sotacarbo che è stata ulteriormente adeguata dal punto di vista impiantistico e della sicurezza. Un ulteriore passo avanti è stato poi fatto nell'acquisizione di strumentazione di corredo per gli impianti ed i laboratori ENEA, Sotacarbo e delle Università.

Sono proseguite sia presso ENEA che presso la piattaforma pilota Sotacarbo le attività sperimentali sugli impianti di gassificazione con aria, vapore, ossigeno e CO₂, con prove relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature. In questo ambito sono state effettuate diverse modifiche alla componentistica degli impianti preesistenti presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo, migliorando il sistema di scarico ceneri, la strumentazione e l'analitica di corredo in modo da poter effettuare sperimentazioni più accurate e con funzionamento in continuo. Sono stati effettuati a partire dal syngas prodotto test di produzione di energia elettrica tramite l'utilizzo del preesistente motore a combustione interna alimentato a syngas e test di conversione e purificazione del syngas fino ad ottenere un gas ad elevato tenore di idrogeno con

l'ausilio di sistemi a pressione variabile. Non da ultimo si è operata una valutazione dei costi di conduzione degli impianti e dei processi.

In particolare le attività sperimentali in taglia più significativa sono state svolte, in coordinamento tra personale ENEA e Sotacarbo, presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo, dove sono state approntate tutta una serie di modifiche e migliorie degli impianti. Il campo di sperimentazione si è concentrato sul processo di gassificazione e sull'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature per il funzionamento in continuo del gassificatore. Sono state condotte venticinque prove di avviamento a caldo per un ammontare circa 450 ore di sperimentazione a caldo. I principali obiettivi della campagna sperimentale relativi all'ottimizzazione del processo di gassificazione risiedono nella acquisizione di conoscenze e competenze relative alla conduzione degli impianti in condizioni ottimali di funzionamento. A seguito delle modifiche e migliorie operate si è passati da una politica di esercizio dall'impianto in batch (senza scarico delle ceneri) all'esercizio in continuo, con i caricamenti di combustibile e lo scarico delle ceneri distribuiti nel tempo a seconda delle esigenze di sperimentazione.

Nel corso delle prove sperimentali si è cercato di ottimizzare le procedure di avviamento e spegnimento dell'impianto. In particolare, relativamente alla procedura di avviamento, si è cercato di determinare il riempimento iniziale ottimale del reattore al fine di ridurre le perturbazioni relative al primo caricamento senza aumentare eccessivamente le perdite di carico. A tale scopo è stato testato l'avviamento con differenti riempimenti del reattore fino a individuare il giusto compromesso tra stabilità dei profili termici e perdite di carico con un riempimento. Relativamente allo spegnimento, la procedura utilizzata nelle campagne sperimentali precedenti prevedeva l'invio di solo vapore fino al raggiungimento di una temperatura massima del letto pari a 250-300 °C. Tale procedura comportava numerosi problemi legati sia all'impaccamento del letto dovuto alla condensazione del vapore nella parte inferiore dello stesso, sia al rischio di un non completo spegnimento, e di una conseguente risalita delle temperature nelle ore successive. A tale scopo è stata modificata la procedura di spegnimento operando lo svuotamento del reattore mediante successivi scarichi attraverso la griglia tenendo la temperatura della parte più bassa del letto fino all' interruzione dell'invio dell'aria.

Relativamente alla fase operativa dell'impianto, i principali obiettivi della campagna sperimentale hanno riguardato i seguenti aspetti:

- determinazione della potenzialità del reattore;
- ottimizzazione della qualità del syngas prodotto;
- individuazione delle condizioni operative "standard";
- miglioramento delle procedure di start-up e shut-down dell'impianto;
- miglioramento della stabilità del processo e dei profili termici;
- individuazione dei criteri di caricamento del carbone e di scarico delle ceneri;
- riduzione della quantità di materiale incombusto scaricato con le ceneri.

In particolare, soprattutto nella fase iniziale della campagna sperimentale si è cercato di incrementare quanto più possibile la potenzialità del reattore, in termini di consumo orario di carbone, agendo sulle condizioni operative e sulla granulometria del carbone (operandone la vagliatura). Successivamente si è tentato (anche a costo di una leggera riduzione della potenzialità) di ottimizzare il processo in termini di composizione del syngas, di efficienza globale e di riduzione del materiale incombusto residuo negli scarichi. Nel corso delle prove è inoltre stato possibile raggiungere gli altri obiettivi prefissati, tra cui il controllo e la stabilità del processo, la definizione delle procedure di start-up e shut-down e l'individuazione dei criteri di caricamento del carbone e di scarico delle ceneri.

Nell'ambito delle attività di ricerca per lo sviluppo del processo di gassificazione del carbone trattamento del syngas per la produzione di idrogeno ed energia elettrica a emissioni estremamente ridotte di agenti inquinanti e di anidride carbonica, ENEA e Sotacarbo hanno sviluppato una piattaforma pilota comprendente due impianti di gassificazione a letto fisso up-draft e una linea per la depurazione e lo sfruttamento energetico del syngas (Figura 71).



Figura 71. Vista d'insieme della piattaforma pilota ENEA/Sotacarbo

Tale impianto, oltre alla sezione di gassificazione, comprende due differenti linee di trattamento del syngas, dedicate una alla produzione di energia elettrica e una al trattamento a caldo del syngas per la produzione di idrogeno.- In particolare, con riferimento alla Figura 72, il syngas proveniente dal gassificatore viene inviato a una unità compatta che è composta da tre differenti colonne: una torre di lavaggio per il raffreddamento del syngas e la prima rimozione di polveri e tar; un primo stadio di desolforazione a freddo, necessario per il funzionamento con carboni ad alto tenore di zolfo, utilizzante una soluzione acquosa di soda; un precipitatore elettrostatico a umido (WESP) per la rimozione delle polveri e del tar residui.

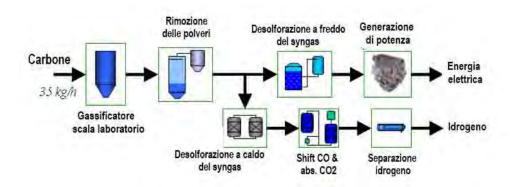


Figura 72. Schema semplificato dell'impianto

A valle del precipitatore elettrostatico, nelle condizioni nominali di funzionamento, il syngas può essere inviato al secondo stadio di desolforazione a freddo, utilizzante una miscela di soda e ipoclorito di sodio in soluzione acquosa e, successivamente, a gruppo motore a combustione interna che provvede alla produzione di energia elettrica.

Una porzione del syngas prodotto, pari a circa 20-25 Nm³/h, può essere inviata, in alternativa, alla linea di trattamento a caldo del syngas per la produzione di idrogeno. In tale linea il gas viene riscaldato, fino a circa 350-400 °C, e inviato a un sistema di desolforazione a caldo, seguito da un sistema integrato di CO-shift e assorbimento della CO₂, seguito dall'unità di purificazione dell'idrogeno. In particolare, l'unità di desolforazione a caldo comprende due reattori, in configurazione lead-leg, riempiti con un sorbente a base di ossido di zinco, che consente una rimozione accurata dei composti dello zolfo presenti nel syngas. L'unità di CO-shift e assorbimento della CO₂ (quest'ultimo effettuato mediante una soluzione acquosa di monoetanolammina in un reattore a bolle) consente l'arricchimento in idrogeno del syngas, idrogeno che viene successivamente purificato in una unità PSA (pressure swing adsorption) fino a una purezza dell'ordine del 97%, come è risultato dalla prima campagna sperimentale sull'impianto. La taglia della linea di trattamento a caldo del syngas per la produzione di idrogeno, sebbene sia molto inferiore rispetto alle taglie degli impianti commerciali, garantisce un buon compromesso tra i ridotti costi di sperimentazione e l'accuratezza dei risultati, utilizzabili per un futuro scale-up dell'impianto.

Il gassificatore pilota della piattaforma Sotacarbo è della tipologia a letto fisso up-draft, progettato per operare con alimentazione ad aria e a pressione pressoché atmosferica. Il reattore è equipaggiato con una serie di apparecchiature ausiliarie per lo svolgimento delle varie funzioni a supporto della gassificazione, quali la



Figura 73. Parte inferiore del gassificatore pilota

produzione e l'immissione degli agenti gassificanti, il caricamento del combustibile e lo scarico delle ceneri. La scelta di tale tecnologia deriva da un particolare interesse alla applicazione della tecnologia a impianti commerciali di piccola e media taglia.

Il reattore ha un diametro interno di circa 30 cm e un'altezza complessiva di circa 200 cm. A differenza delle configurazioni convenzionali Wellman-Galusha le pareti interne sono rivestite in materiale refrattario, infatti il gassificatore non è dotato di camicia di raffreddamento ed agitatore interno, difficilmente realizzabili in un reattore di piccole dimensioni. Il comportamento termico dell'apparecchiatura ne risulta influenzato rispetto agli analoghi gassificatori di taglia commerciale.

Il combustibile viene introdotto all'interno del gassificatore attraverso un unico condotto coassiale allo stesso reattore; il profilo termico è determinato mediante una termocoppia multipla dotata di 11 sensori distribuiti in prossimità dell'asse lungo tutta l'altezza del reattore. Tutta una serie di

apparecchiature ausiliarie completano l'impianto adempiendo allo svolgimento delle varie funzioni necessarie all'esercizio. Si riporta in sintesi una breve descrizione delle apparecchiature principali.

Il combustibile, fornito a bordo impianto in big bags da circa 1 m³, viene sollevato mediante un paranco fino al livello della tramoggia di caricamento e immesso nella stessa. Mediante una rotocella e una valvola a ghigliottina il combustibile viene dosato e immesso all'interno del reattore. La tramoggia di carico è collegata a un sistema di aspirazione, al fine di ridurre le emissioni di polveri di carbone nel corso delle operazioni di caricamento.

Gli agenti gassificanti (aria e vapore) vengono prodotti rispettivamente mediante un compressore d'aria e un generatore di vapore (della potenzialità nominale di 100 kg/h) e miscelati, per mezzo di due valvole di regolazione, poco prima dell'immissione nella parte bassa del reattore. Per i test di gassificazione con ossigeno e anidride carbonica è stato dotato il sistema di un apposito miscelatore, che consente di regolare la composizione della miscela fino a una concentrazione massima di ossigeno del 25%. Lo scrubber e una torcia consentono infine la depurazione e la combustione del syngas prodotto.

A supporto delle sperimentazioni, il sistema è dotato di una serie di strumenti che consentono di monitorare, in modo continuo, i principali parametri in gioco, e principalmente le pressioni, le portate e le temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto e i profili di termici all'interno del reattore.

La composizione del syngas è misurata mediante due misuratori di ossigeno (che assolvono al doppio ruolo di controllo di sicurezza, al fine di evitare il crearsi di atmosfere esplosive, e di indicatore delle prestazioni del processo) e mediante un gas cromatografo portatile, collegato ai vari punti di campionamento posti nelle sezioni principali dell'impianto. In particolare, il gas cromatografo fornisce una misura, ogni tre minuti circa, della composizione del syngas nelle specie CO₂, H₂, O₂, CO, CH₄, N₂, H₂S, COS, C₂H₆ e C₃H₈.

Infine, per le campagne sperimentali relative al progetto è stato acquistato un sistema di campionamento ed analisi tar, descritto più nel dettaglio nel documento relativo al sistema di campionamento tar disponibile sul sito ENEA.

Le principali modifiche dell'impianto piattaforma pilota ENEA/Sotacarbo hanno riguardato:

- la modifica della griglia di supporto del letto e di scarico delle ceneri;
- la sostituzione del sistema per la misura del livello di carbone nel gassificatore;
- la sostituzione della termocoppia multipla del gassificatore;
- l'inserimento del misuratore di portata syngas a valle del gassificatore;
- la sostituzione del misuratore di portata vapore in ingresso al gassificatore;
- la realizzazione della linea per l'alimentazione della miscela CO₂/O₂ al gassificatore;
- la sostituzione della pompa dosatrice per ipoclorito di sodio;
- la modifica del montaggio della pompa dosatrice della MEA e del relativo misuratore di portata;
- il ripristino dei sensori gas del MCI;
- la progettazione e realizzazione della recinzione perimetrale degli impianti;
- la verifica e potenziamento dell'impianto di illuminazione;
- la modifica della sezione di separazione CO₂.

Per verificare il funzionamento a caldo dell'unità di gassificazione, si è proceduto ad effettuare una prova sperimentale in cui è stato impiegato il gassificatore e non la linea di trattamento del syngas. Tale prova è stata realizzata allo scopo di verificare il corretto funzionamento delle parti di impianto. Altre modifiche o sostituzioni (linea per l'alimentazione della miscela CO₂/O₂ al gassificatore; pompa dosatrice della MEA e del relativo misuratore di portata; ripristino dei sensori gas del MCI) sono state verificate a parte.

La griglia di supporto del letto di cui era inizialmente dotato il gassificatore non consentiva lo scarico delle ceneri a causa di una insufficiente spaziatura tra gli elementi fissi e mobili. Per ovviare al problema in seguito alle valutazioni effettuate durante le prove di gassificazione sono state eseguite alcune modifiche alla griglia necessarie per migliorare il sistema di scarico delle ceneri. Tali modifiche sono state eseguite tenendo conto di una dimensione massima di passaggio pari a 30 mm, scelta in base alla granulometria del materiale scaricato nelle precedenti gassificazioni. Per poter avere la dimensione di passaggio sopra indicata è stato necessario diminuire il numero dei quadrotti sia della parte mobile che della parte fissa. Per poter garantire la chiusura e apertura della griglia è necessario saldare dei piattini ai quadrotti della parte mobile della stessa. Tali piattini verranno realizzati in acciaio AISI 304. Scelta obbligata poiché è il medesimo materiale con cui sono state realizzate tutte le altre parti della griglia. Inoltre per l'automazione dell'apertura e della chiusura del sistema di scarico ceneri si è dato corso all'installazione di un pistone pneumatico con possibilità di remotizzare il comando da sala controllo.

Per modificare la parte mobile della griglia si è ridotto il numero dei quadrotti mobili. Si è così ottenuto un opportuno spazio libero tra gli elementi rimanenti. Sono stati poi predisposti dei piattini sui quadrotti mobili rimanenti per poter effettuare la chiusura della griglia ed attuare una regolazione per l'apertura. Sono stati

collocati sulla faccia superiore e inferiore in configurazione a S, tali da formare delle "alette" sfalsate rispetto all'asse del quadrotto. Questa modifica permette la completa apertura o chiusura della griglia. Effettuando una rotazione della parte mobile che posizioni parallelamente le alette adiacenti si ottiene una completa chiusura della griglia.

Viceversa con una rotazione che posiziona le alette adiacenti in modo speculare come riportato. si ha la completa apertura. La disposizione a S delle alette permette, durante la fase di apertura, all'aletta che si muove verso il basso di creare uno spazio vuoto, dove agisce l'aletta che si muove verso l'alto agevolando notevolmente lo scarico del materiale. È stato modificato anche il pantografo che trasmette il movimento ai quadrotti mobili che dimensionato fuori misura non permetteva la completa rotazione del cono sottostante del gassificatore. La posizione della griglia fissa è stata ridefinita per evitare eventuali interferenze tra le parti fissa e mobile. Tutti i quadrotti fissi sono stati posizionati su una corona al di sopra delle alette della parte mobile in condizioni di



Figura 74. Vista esterna del sensore di livello a barra e radar

massima apertura. Questa soluzione facilita lo scarico ed evita che il peso del carico superiore gravi sugli spigoli delle alette.

Per quanto riguarda la misura del livello interno di carbone il gassificatore era dotato di un sistema laser per la misura del livello del letto che, a causa di una serie di problematiche relative al montaggio dell'apparecchiatura tra l'altro in zona classificata come area a rischio esplosione secondo il D.Lgs. 81/8, titolo 11, non ha mai funzionato in modo corretto. A seguito di un'attenta analisi, effettuata col supporto dei possibili fornitori individuati e contattati, sono state adottate due soluzioni: sistema ad ultrasuoni in barra guidata e sistema radar (Figura 74).

Il sensore di livello a microonde guidate è un sensore che permette la misura in continuo del livello sia per i liquidi che per i solidi. Il principio attraverso cui viene effettuata la misura si basa su l'emanazione di impulsi a microonde ad alta frequenza, guidati in una fune o in una barra inserita nel materiale di cui si vuole rilevare il livello. Gli impulsi nel loro percorso saranno riflessi dalla superficie del prodotto e rilevati dall'elettronica di elaborazione, che interpreta il segnale d'eco e lo converte in una informazione di livello, previa opportuna taratura, visualizzabile da un monitor posizionato sulla testa dello strumento.

Il vantaggio di tale strumentazione è che i tipici problemi riscontrabili nel misurare il livello di letti solidi, quali per esempio intense formazioni di polvere, forti rumori o presenza di condensa non compromettono la sicurezza di funzionamento e la precisione di misura. Inoltre formazioni coniche di materiale o le caratteristiche del prodotto, per esempio alternanza di materiale asciutto o umido, non compromettono il risultato di misura. Un ulteriore vantaggio è la possibilità di utilizzare tale strumentazione in letti di solidi ad alte temperature, che ne permette il suo utilizzo nei reattori di gassificazione. La Figura 75 mostra l'andamento del livello del carbone all'interno del reattore di gassificazione durante una prova svolta presso la piattaforma pilota con il fine di avviare l'impianto in modo da testarne la sua funzionalità, ed in particolare verificare il funzionamento del sensore di livello, descritto in precedenza, nelle condizioni di un normale esercizio del gassificatore.

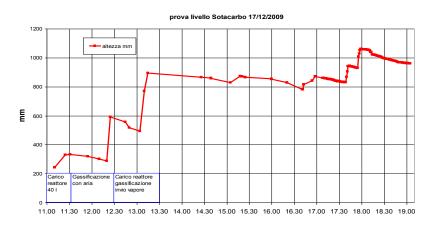


Figura 75. Altezza del letto durante una prova di avviamento con sensore a ultrasuoni

I dati relativi alla misura dell'altezza del letto durante l'esercizio dei vari avviamenti effettuati, sono stati elaborati insieme ai dati forniti dalle termocoppie alloggiate lungo l'altezza del reattore, al fine di ottenere una funzione di correlazione tra tutte le informazioni disponibili; funzione utile alla conduzione del gassificatore stesso e quindi al controllo del processo di gassificazione durante l'esercizio. Il sistema

Il sistema radar considerato è invece costituito da un'antenna che irraggia la superficie del prodotto da misurare con brevissimi impulsi a microonde che sono riflessi e nuovamente captati dal sistema ad antenna: Il sistema è insensibile alla formazione di polveri e consente un utilizzo a temperature fino a 450°C. In seguito al montaggio del sistema radar per la misura di livello sono state effettuate diverse prove sperimentali sull'Impianto Pilota Sotacarbo, durante le quali la strumentazione ha funzionato correttamente.

La Figura 76 riporta l'andamento dell'altezza del letto di carbone presente all'interno del gassificatore durante una delle suddette prove. Per poter effettuare un riscontro immediato tra le operazioni di caricamento del carbone, scarico delle ceneri e risposta del sistema di misura, nel grafico sono stati indicati, con una linea verticale verde, i momenti in cui è avvenuto un caricamento e, con una linea verticale rossa quelli in cui è stato effettuato uno scarico. Si osserva facilmente la variazione del livello rilevata dal sistema in corrispondenza delle diverse operazioni effettuate. L'effetto risulta particolarmente evidente in corrispondenza del caricamento iniziale del letto, avvenuto in due momenti distinti (alle 8.53 ed alle 11.32), dello scarico consistente avvenuto alle 12.24 ed, infine, dello scarico finale, durante il quale il gassificatore e stato svuotato completamente.

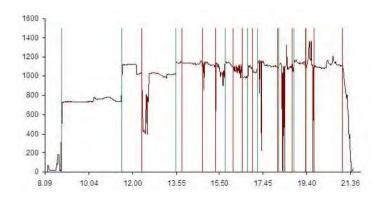


Figura 76. Andamento del livello di carbone nel gassificatore con il sensore radar

Per quanto riguarda la misura delle temperature interne al letto è stata montata nel gassificatore e testata con esito positivo una nuova termocoppia multipla. La soluzione individuata ha contemplato l'acquisto e l'installazione di una nuova termocoppia, uguale alla precedente, ed il tentativo di ripristino della termocoppia danneggiata attraverso trattamento termico, meccanico ed eventuali ritaratura dei sensori.

Per quanto riguarda la misura di portata del syngas si è provveduto all'installazione di un misuratore termico di



Figura 77. Misuratore di portata syngas e centralina di controllo

massa a valle del reattore stesso. Lo strumento acquistato è del tipo GF90 prodotto dalla FCI. Il posizionamento dello strumento, mostrato negli schemi riportati ha tenuto conto delle problematiche legate alla temperatura del syngas e delle specifiche di montaggio dello strumento stesso. Le immagini che rappresentano lo strumento e la relativa centralina di comando e controllo somo mostrati in Figura 77.

Per quanto riguarda la misura della portata erogabile dal sistema di produzione ed

alimentazione del vapore si è proceduto con l'acquisto di un rotametro caratterizzato da un campo di misura più ampio.

Per quanto riguarda l'alimentazione della miscela CO_2/O_2 al gassificatore si è proceduto con una soluzione di natura provvisoria. La realizzazione di una linea completa, con relativa strumentazione avrebbe infatti richiesto la modifica e l'ampliamento del sistema di regolazione e controllo con conseguente eccessivo protrarsi dei tempi di realizzazione. La soluzione scelta utilizza la preesistente linea per l'arricchimento in ossigeno dell'aria di processo e prevede la sostituzione del misuratore di portata e del corpo della valvola di regolazione, con elementi adatti alle



Figura 78. Gruppo di regolazione miscela CO₂/O₂

caratteristiche della miscela CO_2/O_2 come riportato in Figura 78, che mostra il gruppo di regolazione della linea di alimentazione. La modifica definitiva potrà essere realizzata durante le successive fasi del progetto, in seguito al previsto ampliamento del sistema di regolazione e controllo. La linea è stata realizzata e le prove di funzionalità, hanno avuto esito positivo per entrambi gli strumenti.

Per quanto riguarda il motore a combustione interna, dalle analisi effettuate sull'apparecchiatura è stato possibile verificare che alcuni problemi di malfunzionamento derivavano dai sensori di rilevamento presenza gas posti all'interno del vano motore. Tali sensori sono stati revisionati dal fornitore. I sensori sono stati rimontati all'interno del vano motore e testati con esito positivo.

Per poter effettuare le attività di sperimentazione previste si è reso necessario inoltre completare le opere civili prescritte dai Vigili del Fuoco per la messa in sicurezza degli impianti.

Altre attività più legate alla sperimentazione hanno riguardato il monitoraggio delle temperature della griglia durante il funzionamento del gassificatore. Sono state inserite delle termocoppie sulla parte fissa della griglia di scarico ceneri al fine di avere una mappatura delle temperature. L'obiettivo è quello di accertarsi che durante il funzionamento non si realizzino sovratemperature che potrebbero portare a danneggiamenti della griglia stessa. Un secondo obiettivo è stato quello di avere una mappatura spaziale delle temperature dei materiali solidi in fase



Figura 79. Mini impianto di gassificazione GESSICA

di scarico. Una caratterizzazione in questo senso può essere infatti utile per un'ulteriore ottimizzazione delle geometrie della griglia. Un terzo obiettivo è stato quello di avere una mappatura spaziale delle temperature dei materiali solidi sopra griglia utile per determinare lo stato di avanzamento delle zone di combustione.

Altre attività sperimentali sono state svolte presso il mini impianto GESSIC (GEneratore Sperimentale di SIngas da Carbone) allestito presso il C.R. ENEA Casaccia durante la prima annualità (Figura 79). L'impianto di taglia pari a 5 kg/h di carbone di gassificazione è completo di sensoristica industriale ed acquisizione automatica dei segnali. L'impianto è stato equipaggiato con un sistema di misura in continuo della composizione dei gas prodotti e si è allestita e

progettata una linea di campionamento che si interfaccia con un strumentazione analitica online costituita da un microgascromatografo e da un analizzatore di tipo modulare. In particolare le attività si sono sviluppate focalizzando l'attenzione sulla qualità del syngas prodotto e sul definire le modalità di conduzione dell'impianto; la finalità ultima è stata quella di fornire dati utili all'ottimizzazione di componenti e sistemi nell'ottica di un successivo upgrade dell'impianto. In questo contesto sono stati effettuati una serie di avviamenti dell'impianto con differenti carboni e differenti miscele di agenti gassificanti, ottenendo il funzionamento in condizioni stazionarie e in continuo. Attraverso l'attività di sperimentazione si è caratterizzato il processo e si sono definite le modalità e i principali parametri con cui operare per il raggiungimento delle condizioni di esercizio ottimali e stazionarie; si sono inoltre valutati i tempi e le modalità di risposta del sistema al variare dei parametri di ingresso quali la tipologia di agenti gassificanti e la tipologia di carbone utilizzato. Si è inoltre arrivati ad ottenere un syngas di buona qualità con un tenore medio di idrogeno al 30% e punte con concertazioni di idrogeno del 50%.

Per quanto riguarda le attività di modellistica della gassificazione, presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari è stato sviluppato e provato un approccio CFD per la simulazione dei processi di gassificazione del polverino di carbone a letto trascinato, utilizzando modelli avanzati per tenere conto delle principali interazioni tra fase solida e gassosa e delle reazioni chimiche nel flusso turbolento gassoso.

Le simulazioni sono state svolte utilizzando il codice CFD commerciale Fluent versione 6.3. L'approccio sviluppato per la gassificazione a letto trascinato del carbone, si basa su quello definito precedentemente per la combustione del polverino di carbone nel corso dell'attività del primo anno, ed è stato ulteriormente perfezionato per tenere conto delle condizioni di lavoro tipiche della gassificazione.

Il flusso gassoso è modellato attraverso la soluzione delle equazioni RANS (Reynolds Average Navier Stokes), la cui chiusura è effettuata attraverso il modello k-epsilon RNG. Lo scambio termico per effetto della radiazione è invece calcolato attraverso il modello P1. La fase solida, date le caratteristiche del polverino di carbone, è definita attraverso un approccio di tipo Lagrangiano. Le principali interazioni gas-solido che hanno luogo durante la

gassificazione sono quindi l'essiccamento, la volatilizzazione e le reazioni eterogenee del char. La velocità della devolatilizzazione e la composizione delle specie volatili è calcolata attraverso il modello Chemical Percolation Devolatilization (CPD) in grado di dare informazioni dettagliate sul fenomeno in base alla struttura molecolare del carbone in esame. Le reazioni eterogenee del char sono quindi definite attraverso il modello cinetico-diffusivo di Smith. In particolare sono state considerate le reazioni di ossidazione e gassificazione del char e di Boudouard.

Infine le reazioni omogenee nella fase gassosa in regime turbolento sono calcolate attraverso il modello Eddy Dissipation Concept (EDC). Esso definisce delle scale spaziali (fine structures), coincidenti con le celle della griglia di calcolo, che si comportano come dei reattori perfettamente miscelati, dove le reazioni chimiche avanzano per un certo tempo definito in base alle caratteristiche del flusso turbolento. Il modello EDC permette quindi di tenere conto di meccanismi cinetici complessi, necessari per definire in maniera precisa il processo di gassificazione, e quindi la composizione del syngas. Nel presente lavoro sono stati considerati due meccanismi cinetici: il meccanismo semplificato di Jones e Lindestedt, composto da 4 reazioni e 7 specie chimiche e il meccanismo DRM (Direct Reduced Mechanism), derivato dal meccanismo Gri-Mech, composto da 106 reazioni e 22 specie chimiche. Infine gli idrocarburi pesanti (tar) rilasciati durante la de-volatilizzazione reagiscono nella fase gassosa con l'ossigeno e l'acqua e in parte si dissociano durante il cracking, producendo CO, H₂ e soot.

L'approccio sviluppato è stato quindi testato considerando la geometria e le condizioni di funzionamento del gassificatore sperimentale realizzato presso il Korea Institute of Energy Research (KIER). La miscela carbone-slurry è introdotta dal foro centrale del bruciatore, mentre l'ossigeno è introdotto attraverso otto fori disposti intorno a quello centrale con un angolo di 15° in modo che il flusso di ossidante ad elevata velocità vada ad impattare il getto di slurry in modo da ridurre le dimensioni delle particelle. La geometria del gassificatore è schematizzata attraverso una simmetria assiale, e in particolare gli 8 fori di ingresso dell'ossigeno sono rappresentati da una corona circolare avente la stessa sezione, in modo da conservare la stessa velocità di ingresso. Le prestazioni del gassificatore sono quindi simulate attraverso l'approccio CFD sviluppato, considerando sia il meccanismo cinetico di Jones e Lindestedt sia quello DRM.

Entrambi i modelli sono in grado di fornire una dettagliata caratterizzazione del processo di gassificazione a letto trascinato in termini di velocità, temperatura e composizione sia della fase gassosa sia della fase solida. Tuttavia il meccanismo DRM è in grado di caratterizzare in maniera più precisa la cinetica del processo, in particolare per quanto riguarda la formazione di specie intermedie, come radicali, che non vengono considerati nel meccanismo di Jones e Lindestedt.

Le principali differenze tra i due modelli cinetici considerati sono evidenziate analizzando la distribuzione del campo di temperatura e di concentrazione del CO. Le differenze riscontrate sono imputabili alla differente velocità delle reazioni chimiche. Infatti il meccanismo di Jones e Lindestedt, data la sua semplicità, non permette di tenere conto delle reazioni chimiche intermedie che riducono la velocità complessiva delle reazioni, specialmente nelle condizioni operative riscontrate durante i processi di gassificazione a letto trascinato.

Una più dettagliata descrizione del lavoro svolto e dei risultati ottenuti è riportata nel rapporto "Approccio CFD avanzato per la simulazione dei processi di gassificazione del polverino di carbone a letto trascinato" disponibile sul sito ENEA.

Per quanto riguarda invece lo studio dell'alternativa all'alimentazione del carbone in forma dry costituita dalle miscele acqua polverino di carbone, presso il Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari, sono state svolte attività di ricerca sulle proprietà delle miscele acqua-carbone dal punto di vista chimico, fluidodinamico ed applicativo con particolare riferimento al carbone Sulcis prodotto dalla Carbosulcis S.p.A. nella miniera sarda di Nuraxi Figus. Le miscele acqua carbone (CWF Coal Water Fuel) costituiscono un'importante applicazione nel campo delle Clean Coal Technologies, cioè le tecnologie per l'uso pulito del carbone. Esse sono composte da carbone (circa il 70%), acqua e additivi chimici e possono essere usate sia come combustibile liquido alternativo ai prodotti petroliferi (uso preferibile), sia come un modo per trasportare, movimentare e stoccare il carbone. Per soddisfare queste possibilità d'uso i CWF devono essere ottimizzati al fine di agire in maniera bilanciata tra la necessità di avere un prodotto ad alta concentrazione di carbone per esigenze di combustione e quelle di avere a disposizione un prodotto fluido e stabile per le esigenze di stoccaggio e trasporto. Una prima fase della ricerca ha indagato in particolare sull'influenza del tipo di carbone sulla reologia e la stabilità dei CWF, sull'influenza della granulometria, del tipo e del dosaggio di reagente fluidificante e sull'influenza del tipo e del dosaggio di reagente fluidificante e sull'influenza del tipo e del dosaggio di reagente

Tali ricerche hanno mostrato come si possano confezionare CWF di qualità anche con il carbone Sulcis ritenuto finora inadatto a questo scopo. I risultati ottenuti hanno costituito la base per la successiva fase della ricerca orientata all'investigazione sull'influenza del chimismo della fase acquosa sulle caratteristiche reologiche delle miscele, alla predisposizione di uno studio preliminare circa la fattibilità economica di trasporto del carbone Sulcis

come CWF dalla miniera alla centrale elettrica via pipeline e allo studio di metodi di concentrazione del carbone alternativi e più efficienti di quelli tradizionali e complementari con la fase di confezionamento del CWF.

Per quanto riguarda l'influenza del chimismo della fase acquosa è stato valutato il comportamento delle miscele al variare della concentrazione ionica nella fase acquosa. Finora, infatti, tutte le prove sono state effettuate con utilizzo dell'acqua distillata quale fase liquida del CWF. Un primo passo relativo allo studio del chimismo della fase acquosa è stato quello di capire se il carbone rilasciasse ioni durante l'agitazione della miscela. È stato perciò preparato un campione di CWF con carbone Sulcis di granulometria definita "fine" (70% - 0,075 mm; 30% - 0,212 mm), con aggiunta di Proxanol e Rhodopol come agenti fluidificanti e stabilizzanti e con rapporto acqua carbone 40/60. Il campione così preparato è stato miscelato per circa due ore, in linea con i tempi di durata delle prove eseguite nella prima fase della ricerca. I risultati dell'analisi dell'acqua prelevata dopo la sedimentazione dal campione sono stati confrontabili con l'analisi chimica elementare del carbone Sulcis. La letteratura e alcune considerazioni emerse dalle prove lasciano intendere che il chimismo della fase acquosa di un CWF possa influenzare le sue caratteristiche reologiche e fluidodinamiche pertanto si è ritenuto necessario indagare sulla variazione del comportamento del CWF al variare della concentrazione ionica nella fase acquosa. Infatti si sono subito riscontrate sostanziali differenze tra le prove effettuate con acqua distillata ed analoghe prove effettuate con acqua di rete. Poiché il sodio, il calcio e il magnesio sono tra gli elementi più comuni dell'acqua di rete si è ritenuto interessante verificare la relazione tra la concentrazione di questi ioni nella fase acquosa le sue caratteristiche reologiche.

Per quanto riguarda la predisposizione di uno studio preliminare circa la fattibilità economica di effettuare il trasporto del carbone Sulcis come CWF è stato predisposto un modello basato sull'analisi costi benefici che mette in relazione l'attuale metodo di trasporto del carbone dalla miniera di Nuraxi Figus (CI – Sardegna) alla centrale elettrica con il trasporto del carbone come CWF via pipeline. Oltre ai costi economici è necessario prestare attenzione ai costi sociali non immediatamente visibili ma estremamente importanti.

Infine è stata svolta una ricerca preliminare volta a valutare una nuova tecnica di flottazione selettiva del carbone, basata sull'utilizzo della cosiddetta cella Hydrojet, che sfrutta la tecnologia dei getti d'acqua ad alta pressione, già diffusa per altri scopi in campo minerario. Studi preliminari in impianto pilota da laboratorio hanno dato interessanti risultati pertanto si è deciso di estendere la scala di intervento, costruendo una cella Hydrojet di dimensioni maggiori ed attualmente è in fase di allestimento l'impianto di alimentazione della torbida di flottazione mentre sono stati già predisposti la lancia water jet e la cella. Tale processo di arricchimento viene studiato tenendo presente che esso costituisce la penultima fase di un sistema che partendo dall'estrazione deve arrivare alla produzione di CWF di qualità competitivi con i prodotti petroliferi.

B. Sperimentazione e ottimizzazione di sistemi di pulizia a freddo del syngas

Sono poi state svolte attività sperimentali di trattamento a freddo del syngas prodotto sugli impianti di gassificazione con prove e test volti ad acquisire dati e competenze sul processo di desolforazione e su quello di separazione di polveri e tar. In quest'ambito sono stati eseguiti test di cleanup del syngas in torri di lavaggio e colonne a riempimento con diversi solventi liquidi quali soluzioni acide, alcaline e ammine di vario tipo. Sono stati altresì effettuati test con sistemi di depolverazione elettrostatica ad umido tipo WESP.

Presso il Dipartimento Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza", sono state svolte una serie di attività sperimentali sul trattamento del syngas prodotto negli impianti di gassificazione al fine di acquisire dati e competenze sul processo di pulizia, lavaggio e separazione delle polveri e tar presenti nel syngas. L'attività condotta si è focalizzata sulle inee di ricerca relative a:

- messa a punto e definizione di metodologie inerenti i campionamenti di syngas e di impurità in esso presenti quali ad esempio particolato e tar e loro stima quantitativa;
- attività sperimentale che ha previsto l'individuazione di una tecnologia di depurazione del syngas, ottenuto da gassificazione di un carbone di basso rango, da tar e particolato a valle di uno screening di letteratura e dello stato dell'arte della tecnologia disponibile;
- descrizione delle potenzialità del processo di abbattimento del particolato tramite sistemi basati su depolveratori elettrostatici ad umido (WESP).

L'obiettivo dell'attività sperimentale, prevista nella prima linea di ricerca sviluppata, si è orientato verso una corretta valutazione dei quantitativi di tar e particolato presenti nel syngas al fine di definirne le più appropriate tecniche di rimozione. Il "tar" secondo la definizione fornita dal Comitato Europeo per la standardizzazione (CEN) è costituito da "tutti i composti organici presenti nei gas prodotti durante la gassificazione esclusi gli idrocarburi gassosi da C1 a C6". In generale il tar è un contaminante che deve essere rimosso prima che il syngas venga

utilizzato sia nei processi dell'industria chimica che nella conversione in energia in turbine o in motori a combustione interna.

L'altro contaminante compreso tra le impurezze organiche e che può causare grossi problemi durante l'utilizzo del syngas è il particolato: è infatti ormai accettato che la quantità di particolato ammessa nel syngas per un suo utilizzo in motori a combustione interna è pari a 50 mg/m³. Allo scopo si sono definite e testate più metodologie di predisposizione della linea di campionamento sia per il tar che per il particolato seguendo quanto definito dalla normativa europea CEN e dal protocollo IEA.

Il protocollo IEA prevede una linea di campionamento riscaldata, un sistema di rimozione e determinazione del articolato basato su ciclone e/o filtri ceramici o in quarzo o in fibra di vetro e in serie un sistema di raccolta del tar basato su un treno di sei gorgogliatori con differenti solventi e temperature, al fine di raccogliere i tar con differenti pesi molecolari e quindi con differenti temperature di condensazione. Traendo spunto dal sistema definito dall'IEA l'attività sperimentale è stata condotta predisponendo una linea di campionamento similare a quella sopra descritta ma basata sul campionamento a secco. In questo caso infatti è previsto, dopo il filtro per il particolato, un sistema di recupero del tar basato su due condensatori privi di solvente: uno riscaldato a

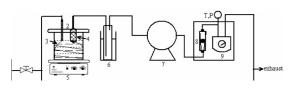


Figura 80. Sistema per il campionamento a secco del tar

temperatura di 105 °C in cui vengono raccolti i cosiddetti "heavy tar" e un secondo posto a bassa temperatura in cui viene condensata l'acqua e la restante parte dei prodotti volatili.

La quantità di tar pesanti può in questo modo essere facilmente determinata per via gravimetrica. La Figura 80 riporta schematicamente il sistema di raccolta descritto.

Il sistema è stato predisposto e sono state eseguite prove sperimentale a differenti temperature di gassificazione, utilizzando un carbone del tipo Sulcis, carbone di basso rango con un buon contenuto di volatili e quindi di tar. Per individuare un'idonea tecnologia di depurazione del syngas, ottenuto da gassificazione di un carbone di basso rango, da tar e particolato, è stata condotta un'analisi delle diverse tecnologie attualmente disponibili mettendone in evidenza vantaggi e svantaggi. Successivamente, sono state selezionate le tecnologie allo stato attuale più promettenti e su alcune di esse è stata svolta una sperimentazione per determinarne le prestazioni con il carbone. In questa fase sono state provate anche soluzioni originali ed innovative.

L'attività sperimentale è stata condotta utilizzando un impianto di gassificazione di laboratorio, del tipo updraft, della capacità di c.a. 500 g/h appositamente costruito dotato di sensoristica tipo PLC. L'impianto è caratterizzato da un primo stadio di gassificazione a temperature relativamente basse (600°C) e da un secondo stadio operante a temperatura decisamente più elevata (850-900°C). Nel secondo stadio viene completata la gassificazione del particolato trascinato e si realizza il reforming delle frazioni condensabili ottenendo un syngas pressoché privo di frazioni condensabili.

Sono state quindi provate due diverse soluzioni operative per il secondo stadio. In un primo caso il secondo stadio aveva al suo interno un letto costituito da uno strato di schiuma di carburo di silicio, quindi uno strato di allumina e infine un ultimo ancora di schiuma di carburo di silicio. La scelta di questa configurazione è stata dettata dalla necessità di mantenere limitate le perdite di carico all'interno del sistema, ma comunque di fornire un substrato in grado di effettuare una sorta di filtrazione e sul quale potessero avvenire le reazioni di reforming del tar. In una seconda configurazione il secondo stadio conteneva al suo interno un filtro metallico di lamiera ad S che agisce come "catalizzatore turbolento" (in cui le lamiere microcorrugate generano movimenti vorticosi con turbolenze del flusso dei gas, moltiplicando di conseguenza l'efficacia di rimozione).

La sperimentazione è stata condotta utilizzando due differenti tipologie di carbone il Sulcis di basso rango e un carbone di tipo russo di alto rango. Obiettivo della sperimentazione eseguita è stato quello di valutare la capacità di rimozione del particolato e del tar delle due diverse soluzioni proposte e testate. Dai dati sperimentali ottenuti, la soluzione che mostra i migliori risultati è quella nel quale il secondo stadio svolge la contemporanea funzione di reformer e filtro antiparticolato.

Infine si è svolta una ricerca bibliografica sulle potenzialità del processo di abbattimento tramite sistemi basati su depolveratori elettrostatici ad umido (WESP). La precipitazione elettrostatica è un metodo che utilizza forze elettrostatiche per rimuovere da un flusso gassoso le particelle solide e le goccioline di liquido che sono in esso sospese. Questa tecnica è una parte importante dei metodi di lavaggio dei gas; presenta infatti numerosi vantaggi, come la possibilità di trattare elevate portate di gas con basse perdite di carico (inferiori a 1 mbar), elevata efficienza di rimozione sia di particelle solide che di goccioline, possibilità di separare particelle di dimensioni submicroniche, possibilità di utilizzo a temperature elevate e bassi costi operativi. I principali svantaggi sono gli alti

costi di capitale iniziale, le grandi dimensioni delle apparecchiature e la bassa flessibilità del sistema una volta che le specifiche sono fissate. L'adozione di questa tecnologia è molto efficiente nella rimozione di tar e particolato da gas provenienti da gassificazione del carbone.

Sempre nell'ambito dello studio e sperimentazione di processi chimico-fisici di trattamento e conversione del syngas, presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata è stata svolta un'attività sperimentale di monitoraggio qualitativo e quantitativo dei principali composti indesiderati contenuti nel syngas. L'obiettivo perseguito è stato quello di eseguire una prima speciazione dei composti idrocarburici contenuti nel tar prodotto dalla gassificazione del carbone, in modo da definire in maniera più opportuna e selettiva la tecnologia di abbattimento. I tar difatti sono idrocarburi a catena lunga che possono condensare quando il gas viene raffreddato, causando notevoli danni all'esercizio degli impianti, la sua composizione dipende dal tipo di carbone impiegato; in generale il tar è una complessa combinazione di idrocarburi aromatici, composti eterociclici dell'ossigeno, composti solforati e composti dell'azoto.

Nell'attività sperimentale, volta a definire la speciazione del tar, sono state impiegate la tecnica gascromatografica, la gas massa e la spettroscopia di risonanza magnetica Nucleare (NMR) che permette di ottenere dettagliate informazioni sulla struttura molecolare dei composti in esame. In particolare quest'ultima è considerata a livello di normativa UE il metodo più attendibile per l'identificazione dei composti idrocarburici poliaromatici, dato che si è affermata in questi ultimi anni come la tecnica più potente e veloce per l'identificazione di prodotti di reazione o di composti organici.

I campioni. provenienti dall'attività sperimentale condotta presso la piattaforma pilota Sotacarbo, sono stati raccolti durante le differenti fasi del processo di gassificazione al fine di analizzare la composizione del tar nel tempo.

L'analisi dei campioni sopradetti ha evidenziato vari aspetti di seguito sottolineati:

- sono presenti molti più composti (a volte più di 30) di quanto ci si aspetterebbe da una normale analisi di residui di combustione di combustibili fossili quali il carbone;
- molti composti leggeri sono presenti in quantità relativamente alte;
- si sono individuati composti policiclici di struttura non definita di cui non è stato possibile effettuare una stima quantitativa.

Le principali classi di sostanze individuate e i principali composti individuati, con l'utilizzo della gas-massa, sono i seguenti: fenoli (fenolo, orto e para metilfenolo e guaiacolo), metilfenantrene, fenantrene, pirene, benzoperilene, acenaftene, acenaftilene, benzoantracene, crisene, fluorantene, fluorene, benzofluorantene. In conclusione su campioni analizzati con spettrometria di massa e spettroscopia NMR si può dedurre che sono presenti grosse quantità di fenoli sicuramente corrosivi. Questa classe di sostanze vengono prodotte durante il processo di gassificazione data la presenza dell'acqua e la contemporanea presenza di radicali del carbonio che determina la produzione di composti ossidrilati quali i fenoli. Molti campioni contengono quantità variabili di policiclici a basso peso molecolare ma ben evidenti nei cromatogrammi mentre i più pericolosi per la salute i composti a più alto peso molecolare quali gli aromatici (benzoantraceni e i benzofenantreni) sembrano essere prodotti in quantità minimali e solo per alcuni campioni. Non si deve comunque dimenticare che tali composti sono estremamente tossici e cancerogeni anche a livello di picogrammi. I campioni contenente zolfo organico (CH-S) sono stati identificati via NMR, tra di essi la classe che presenta una maggiore concentrazione è quella dei composti con dieci atomi di carbonio (C10). Infine le aldeidi sono presenti in campioni e particolarmente nelle prime fasi della gassificazione.

Sul tema specifico della desolforazione il Dipartimento Scienze Chimiche dell'Università di Cagliari, ha svolto una serie di attività sperimentali sullo sviluppo di materiali a base di ZnO/SBA-15 e test preliminari per la rimozione di H_2S da correnti di idrogeno e syngas. Sono stati studiati sistemi a base di ossido di zinco confinato all'interno di silice mesostrutturata SBA-15. La scelta dell'ossido di zinco è legata alla sua alta costante di equilibrio per la rimozione dell' H_2S . L'elevata area superficiale (fino a $1000 \text{ m}^2/\text{g}$), la struttura mesoporosa bidimensionale con pori di circa 6-7 nm e pareti spesse 3-4 nm, il volume poroso di 1,0-1,3 cm $^3/\text{g}$, rendono il materiale SBA-15 particolarmente adatto come supporto nel quale confinare la fase attiva ZnO in forma nanocristallina, quindi potenzialmente molto reattiva.

La silice mesoporosa SBA-15 è stata preparata aggiungendo ad una soluzione acida l'agente templante Pluronic P123 (PEO20-PPO70-PEO20) e tetraetossisilano (TEOS) come precursore di silice. I reagenti sono stati combinati nei seguenti rapporti molari 1 TEOS : 5,5 HCl : 193 H_2O : 0,017 Pluronic. Il precipitato formatosi è stato recuperato dopo 48 ore per filtrazione, e calcinato a 500°C per 6 ore per rimuovere il templante. Il composito ZnO/SBA-15 è stato ottenuto con procedura post-sintesi (two-step) che consiste nell'impregnare il supporto precedentemente

sintetizzato con soluzioni (di opportuna concentrazione) di nitrato di zinco come precursore della fase ZnO. A tal fine si sono selezionati due metodi di impregnazione classica "one-solvent", ovvero la Incipient-Wetness Impregnation (IWI) e la Wet Impregnation (WI), e un metodo innovativo denominato "Two-solvents" (TS). I metodi di impregnazione "one-solvent" consentono di disperdere anche carichi elevati di fase attiva sul supporto mettendo a contatto per un certo tempo la soluzione del precursore con il supporto sotto forma di polvere. Il metodo "two-solvents" deriva dal metodo classico "incipient-wetness" e consiste nel sospendere la polvere di SBA-15 in un primo solvente idrofobico e poi metterla in contatto con la quantità di soluzione acquosa contenente il precursore. Nei metodi IWI e TS la quantità di soluzione acquosa contenente la fase attiva deve eguagliare il volume poroso del supporto, mentre nella tecnica WI il supporto viene messo a contatto con un'elevata quantità di soluzione contenente il precursore. Il prodotto finale è stato ottenuto calcinando la polvere essiccata ad una temperatura di 500° C per 2 ore. Le percentuali di ZnO sono comprese tra il 10 e il 60% in peso. La caratterizzazione di tutti i compositi è stata effettuata mediante diffrattometria a raggi X (XRD), microscopia elettronica in trasmissione (TEM) ed adsorbimento fisico di N_2 a -196° C.

L'analisi diffrattometrica (a basso angolo "SA") è stata utilizzata per confermare la formazione della tipica struttura esagonale dell'SBA-15, e verificare se essa fosse preservata dopo l'addizione della fase attiva (Figura 81). Si osserva che l'impregnazione non distrugge la struttura, anche se nei campioni a più elevato caricamento (30 e 60 wt%) si osserva uno spostamento del picco [100] a valori angolari più elevati, se confrontati con la SBA-15 tal quale, che suggerisce un lieve restringimento della struttura mesoporosa dovuto ad un alto grado di condensazione silicatica dopo il caricamento dell'ossido di zinco.

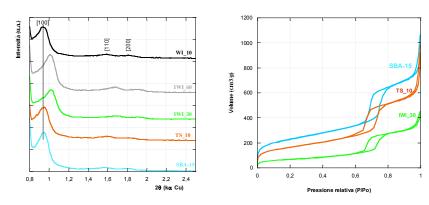


Figura 81. Diffrattogrammi XRD dei nanocompositi confrontati con SBA-15 pura nell'intervallo 2θ = 0.8°- 2.5° (a sinistra) e isoterme di adsorbimento-desorbimento di N₂ a -196°C (a destra).

Le misure di fisisorbimento di azoto permettono di determinare la variazione delle aree superficiali in seguito all'impregnazione. Ad esempio, per l'SBA-15 tal quale e per il campione preparato con il metodo two-solvents e un carico di ZnO del 10 %wt (TS 10) sono risultate essere rispettivamente 816 m²/g e 590 m²/g. Questa diminuzione

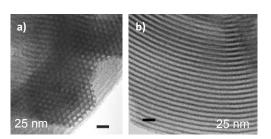


Figura 82. Micrografia TEM del campione di SBA-15 pura in direzione perpendicolare (a) e parallela (b) ai canali

di area, in seguito alla formazione di clusters di ZnO nei mesopori, potrebbe essere dovuta alla parziale ostruzione dei canali. Questo effetto è inoltre maggiormente riscontrato nei campioni a maggiore contenuto in ZnO.

L'indagine TEM è stata utilizzata per verificare la presenza della fase attiva all'interno dei canali mesoporosi (si è riscontrata la presenza di nanoparticelle di dimensione molto piccola, compresa tra 2-5 nm sia fuori che all'interno della matrice) e controllare che la mesostruttura fosse preservata anche dopo l'addizione della fase attiva. A titolo di esempio, in figura 82 viene riportata una micrografia TEM della SBA-15 tal quale.

Per valutare la capacità dei nanocompositi di rimuovere il solfuro di idrogeno è stato realizzato un apparato in scala da laboratorio che simula le condizioni del gas proveniente dalla gassificazione del carbone. Attraverso una modifica della strumentazione per lo studio di fenomeni di desorbimento/riduzione/ossidazione a temperatura programmata (TPD/R/O) si è realizzato un sistema per alimentare un flusso regolabile e controllabile di H₂S in miscela con elio. L'attività desolforante è stata determinata attraverso lo studio delle curve di breakthrough. La capacità di breakthrough è stata calcolata con la seguente espressione:

mg di zolfo / g di sorbente = (Fs*Bt)/W

dove: Fs rappresenta la portata in massa riferita allo zolfo (mg/s), Bt rappresenta il "tempo di breakthrough", e W indica il peso di sorbente fresco all'interno del reattore.

Il campione sintetizzato con il metodo "Two-solvents" sembra essere quello che riesce a trattenere per un tempo maggiore il livello di H₂S prima del punto di breakthrough, suggerendo che questo metodo consenta di disperdere in modo più efficace le particelle all'interno del supporto. Per i sorbenti sintetizzati con i metodi WI e IWI e contenenti diverse quantità di ZnO si osserva che la capacità di breakthrough aumenta inizialmente passando dal campione al 10% wt di ZnO a quello con il 30%, per rimanere poi indifferente ad ulteriore aumento di fase attiva fino al 60% (Figura 83). Questo potrebbe essere dovuto ad un aumento delle dimensioni delle particelle di fase attiva all'aumentare del carico con conseguente (a) esposizione di un minor numero di siti attivi e (b) parziale blocco dei pori sia da parte dell'ossido di zinco che del prodotto di solforazione, che limiterebbe o impedirebbe l'accesso ai siti attivi presenti sulle particelle depositate dentro i canali dell'SBA-15.

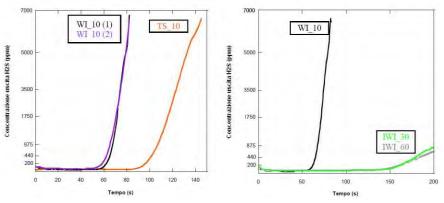


Figura 83. Curve di breakthrough per i campioni con differente metodo di sintesi e stesso caricamento del 10% (a sinistra) e dei campioni a diverso carico di ZnO, 10, 30 e 60 %wt (a destra)

È stata effettuata inoltre una prova preliminare di rigenerabilità in aria; i risultati TPO hanno indicato la completa conversione del solfuro di zinco in ossido di zinco ad una temperatura di 550°C. Sebbene siano necessarie ulteriori verifiche, i risultati TPO e l'aspetto finale del campione sembrano indicare che un trattamento di questo tipo permette di rimuovere completamente lo zolfo presente attraverso la sua trasformazione in SO₂.

C. Studio e sperimentazione di processi chimico-fisici di trattamento e conversione del syngas

Presso ENEA sono state svolte attività sperimentali volte al trattamento del syngas con prove e test su processi e sistemi. Avvalendosi della disponibilità di impianti, sezioni di prova e laboratori dotati di strumentazione e diagnostica avanzata si sono svolte sperimentazioni su reattoristica in piccola e media scala, eseguendo prove in sezioni a media e alta temperatura con diverse metodologie di trattamento e la valutazione di attività catalitica, fenomeni di invecchiamento e avvelenamento in presenza di polveri, tar e composti dello zolfo. Ulteriori acquisizioni di attrezzature sono andati ad incrementare il know how tecnologico e la capacità di supportare le attività sugli impianti di taglia industriale.

In particolare si è svolta un'attività sperimentale inerente lo studio della reazione di idrogenazione della CO₂ e della sua conversione in metano, definita anche come reazione di Sabatier:

$$CO_2 + 4 H_2 \leftrightarrow 2 H_2O + CH_4$$

Fra tutti i possibili prodotti, la trasformazione in metano, risulta particolarmente conveniente per la possibilità che questo offre di essere utilizzato localmente o facilmente immagazzinato o trasportato. L'applicazione di questa reazione al syngas prodotto dalla gassificazione del carbone, ha il duplice effetto di arricchire il syngas in metano, e di abbattere il contenuto di CO₂ evitando o limitando notevolmente l'impiego sia di sorbenti solidi che di solventi liquidi.

L'attività sperimentale inerente lo studio di tale reazione si è sviluppata impiegando miscele di solo H_2 e CO_2 , sia puri che diluiti con un gas inerte, come l'azoto. A tale scopo presso i laboratori è stato allestito un apparato sperimentale costituito da tre linee di adduzione dei gas reagenti regolate attraverso mass flow controller, da un reattore e da un sistema di analisi online dei prodotti della reazione costituito un micro gascromatografo (Figura 84).

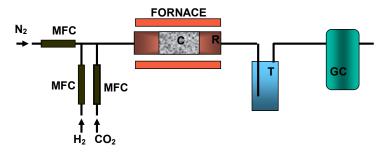


Figura 84. Apparato sperimentale per lo studio della reazione di Sabatier

Il principale parametro sperimentale indagato è stata la temperatura. Si è quindi misurata la resa di conversione della CO_2 in CH_4 in funzione della temperatura per miscele di alimentazione a composizione variabile. A causa della notevole barriera cinetica presente nella reazione, è stato necessario introdurre un catalizzatore, a base di nichel finemente suddiviso, al fine di aumentare la velocità della reazione. In Figura 85 è riportata la resa di metanazione per temperature variabili da 25 °C a 500 °C quando il gas di alimentazione è costituito solo da anidride carbonica ed idrogeno nei rapporti 1:3, 1:4 e 1:5.

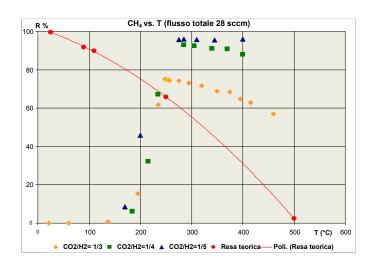


Figura 85. Resa sperimentale di metanazione per temperature variabili e differenti rapporti CO₂/H₂

Analizzando i dati sperimentali ottenuti si è dedotto che il comportamento osservato è congruo con quanto atteso, difatti all'aumentare della temperatura la metanazione regredisce a favore del reforming, ossia della reazione inversa alla metanazione. Rispetto all'andamento che si otterrebbe, secondo quanto definito dalla termodinamica, si nota la presenza della barriera cinetica che sposta di circa 250 °C la temperatura del massimo di conversione.

I primi risultati sperimentali, hanno dimostrato la possibilità di applicare la reazione di metanazione al trattamento del syngas. Gli ulteriori sviluppi dell'attività prevedono uno studio più approfondito, con la determinazione dei principali parametri cinetici della reazione; lo studio in condizioni di diluizione dei gas e lo studio dell'effetto dei composti solforati presenti nella miscela gassosa sul catalizzatore.

Presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari si sono svolte attività finalizzate alla modellazione e alla sperimentazione del processo di produzione di idrogeno e di water gas shift operato sul syngas proveniente da gassificazione del carbone che utilizza CO₂ come agente gasificante. L'attività concerne i risultati dello studio numerico e sperimentale del processo di WGSR con syngas ad elevato tenore di CO₂. Lo studio è stato condotto considerando inizialmente una miscela simulante il syngas prodotto dalla gassificazione del carbone in un gassificatore di piccola taglia di tipo "updraft" (a letto fisso in controcorrente con alimentazione del carbone dall'alto). Nel corso delle prove la composizione della miscela è stata opportunamente modificata realizzando la graduale sostituzione della frazione di N₂ con appropriate frazioni di CO₂ al fine di simulare la composizione del syngas prodotto dalla gassificazione del carbone con ossigeno (o aria arricchita in ossigeno) e ricircolo dei prodotti.

L'attività ha riguardato essenzialmente la WGSR di alta temperatura (HTWGSR) essendo questo il processo che realizza la conversione di oltre il 95% del CO contenuto nella miscela iniziale. La HTWGSR è stata studiata considerando differenti catalizzatori commerciali (Fe/Cr e Pt/Al). Le prove sono state eseguite assumendo

costante la portata volumetrica di miscela secca, mentre si è scelto di far variare gli altri principali parametri operativi quali: la composizione della miscela di reagenti, la temperatura di reazione e il rapporto H₂O/CO.

Lo studio sperimentale è stato integrato da una sistematica simulazione numerica. Le simulazioni sono state realizzate utilizzando un modello zero-dimensionale (Z-D) (all'equilibrio) e due modelli cinetici mono-dimensionale (1-D) e bi-dimensionale (2-D). Il modello bi-dimensionale, in particolare, è stato realizzato utilizzando il codice CFD open-source MFiX al fine di predire gli andamenti delle grandezze di influenza nei domini spazio-temporali.

I principali risultati ottenuti sono sintetizzati nel seguito.

- 1. la concentrazione iniziale di CO₂ nella miscela operativa influenza in modo significativo le prestazioni dei catalizzatori. Entrambi i catalizzatori utilizzati mostrano, come atteso, una riduzione di prestazioni all'aumentare della frazione di CO₂, che risulta più marcata nel caso dei catalizzatori Fe/Cr;
- 2. il tempo di residenza dei reagenti nel letto di catalizzatore influenza sensibilmente le prestazioni della WGSR di alta temperatura e ne determina i costi operativi. In termini di tempo di residenza, il presente studio mostra come i catalizzatori Pt/Al possano determinare elevati gradi di conversione del CO, anche in presenza di miscele ad elevato tenore di CO₂ ed elevate velocità spaziali. Al contrario i catalizzatori convenzionali (Fe/Cr) risultano particolarmente sensibili all'aumento della velocità spaziale soprattutto nelle condizioni di prova estreme (elevate concentrazioni iniziali di CO₂ ed elevati rapporti H₂O/CO);
- 3. le prestazioni della WGSR realizzata con catalizzatori Fe/Cr, nel reattore di alta temperatura sono condizionate in modo significativo dalla temperatura operativa. Nelle condizioni considerate i catalizzatori Pt/Al risultano poco sensibili alla temperature di reazione;
- 4. il rapporto H₂O/CO, influenza in modo determinante la WGSR a prescindere dal tipo di catalizzatore impiegato. Quando si utilizzano catalizzatori convenzionali come quelli Fe/Cr è raccomandabile l'utilizzo di rapporti H₂O/CO compresi tra 2 e 4 (tipici valori comunemente adottati in ambito industriale). I catalizzatori Pt/Al, invece permettono di ottenere notevoli gradi di conversione anche con più elevati rapporti H₂O/CO;
- 5. lo studio numerico della WGSR ha mostrato, in generale, una buona attendibilità dei modelli numerici ed ha messo in luce i limiti del modello cinetico utilizzato per la previsione delle prestazioni dei catalizzatori Pt/Al. Nella prospettiva di uno sviluppo futuro dell'attività, sarà necessario ricercare un nuovo modello cinetico capace di offrire maggiori corrispondenze con i risultati sperimentali.

Una più dettagliata descrizione del lavoro svolto e dei risultati conseguiti è riportata nel rapporto "Modellazione e sperimentazione del processo di WGS operato sul syngas proveniente da gassificazione del carbone che utilizza CO₂ come agente gasificante" disponibile sul sito ENEA.

D. Studio e sperimentazione di processi e sistemi di cattura della CO2 con rigenerazione dei solventi

Sono state svolte attività sperimentali sulla cattura della CO₂ dal syngas prodotto sugli impianti di gassificazione della Piattaforma pilota con diverse prove finalizzate all'acquisizione di dati e competenze sul processo. Sono state utilizzate sia colonne a riempimento che reattori a bolle per trattare il syngas con l'utilizzo di soluzioni amminiche (MEA e MDEA). E' stata altresì effettuata, con l'ausilio di modelli e codici di simulazione, la progettazione di un'unità completa di rigenerazione termica del solvente che andando a completare in futuro la dotazione dell'impianto in scala laboratorio consente di operare in continuo con la cattura della CO₂ dal syngas che proviene dal gassificatore. Sono stati valutati i costi di investimento e di conduzione degli impianti e dei processi sia in termini energetici che economici. Si sottolinea che queste attività sono complementari a quanto svolge RSE S.p.A. sullo sviluppo di ammine su supporto solido per sistemi di cattura CO₂ sui fumi di combustione.

Per quanto riguarda le modifiche attuate nell'impianto ENEA Sotacarbo nello specifico della sezione di separazione della CO₂ dal syngas nella linea a caldo si è operato per risolvere la problematica legata all'errata diffusione del gas nella soluzione modificando il montaggio dei diffusori. Le modifiche apportate hanno consentito sia di migliorare la diffusione del syngas, costretto a passare attraverso le porosità del diffusore ceramico, sia lo smontaggio e l'eventuale sostituzione dei diffusori stessi. Relativamente al dosaggio della soluzione reagente al primo reattore, sono state considerate diverse soluzioni:

- inserimento di un misuratore di portata e di una valvola manuale per effettuare manualmente la regolazione della portata di soluzione sulla linea di alimentazione MEA al reattore a bolle;
- inserimento di un blocco di regolazione composto da un misuratore di portata e da una valvola regolatrice sulla linea di alimentazione MEA al reattore a bolle;

• modifica del piping con la realizzazione di una linea indipendente di alimentazione MEA al reattore a bolle e l'inserimento di una pompa dosatrice dotata di regolazione manuale.

È stata adottata l'ultima delle soluzioni. Pur non permettendo di avere una misura continua della portata, tale soluzione, consente una regolazione sufficientemente affidabile e precisa tramite regolazione manuale della portata elaborata dalla pompa. Sono state realizzate alcune modifiche del piping volte ad ottimizzare il funzionamento della sezione stessa. Le prove effettuate in seguito alla realizzazione delle modifiche citate, non hanno consentito la verifica funzionale dell'intera sezione, ma hanno interessato solamente uno dei due reattori di separazione a bolle. L'efficienza di rimozione ottenuta è compresa fra 98.5 e 99%. Per un'analisi più dettagliata dei dati sperimentali si rimanda al documento completo relativo alla sperimentazione di sistemi di assorbimento dell'anidride carbonica dal syngas.

Per quanto riguarda le attività di simulazione presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari è stato svolto uno studio di analisi, modellazione e sperimentazione di processi di produzione e trattamento del syngas proveniente da gassificazione del carbone. L'attività ha riguardato la valutazione delle prestazioni di impianti basati su tecnologie a bassa temperatura per l'abbattimento dei composti solforati e per la cattura della CO₂ dai gas di sintesi provenienti dalla gassificazione del carbone. Per la rimozione dei gas acidi (H₂S e CO₂) si è fatto riferimento a processi di assorbimento chimico, basati su soluzioni acquose di composti amminici, in particolare metil-dietanol-ammina (MDEA), per il processo di desolforazione e mono-etanol-ammina (MEA) per il processo di cattura della CO₂. Benché l'assorbimento avvenga con solventi differenti e i parametri operativi dei due sistemi differiscano leggermente tra loro, i processi di desolforazione e cattura della CO₂ si basano sulla medesima configurazione di impianto, con una colonna di assorbimento, in cui il gas acido contenuto nella miscela gassosa da trattare viene assorbito dal solvente, e una colonna di desorbimento, in cui il gas acido assorbito viene rilasciato dal solvente attraverso la fornitura di energia termica dall'esterno. A valle della sezione di desolforazione e prima della sezione di cattura della CO₂ è presente inoltre una sezione di shift conversion per la trasformazione del CO presente nel gas di sintesi in CO₂.

Le analisi sono state effettuate attraverso modelli di calcolo dedicati, sviluppati con l'ausilio del codice industriale Aspen Plus. I modelli di calcolo considerano i processi di desolforazione e cattura della CO₂ all'equilibrio, valutando le prestazioni del sistema al variare dei principali parametri operativi (portata, composizione e purezza del solvente, temperatura della colonna di assorbimento, numero di stadi delle colonne di assorbimento e strippaggio, ecc.).

Mentre le prestazioni del sistema di cattura della CO_2 possono essere valutate correttamente all'equilibrio, nel processo di desolforazione con MDEA a causa dell'elevata selettività del solvente nei confronti dell' H_2S e della CO_2 lo studio del sistema all'equilibrio comporta una valutazione delle prestazioni che si può discostare anche notevolmente da quelle di un impianto reale. In ragione di ciò, poiché lo studio delle condizioni dinamiche del processo richiederebbe un dimensionamento dettagliato delle colonne di assorbimento e desorbimento e delle altre apparecchiature del sistema, esulando perciò dallo scopo di questa ricerca, si è preferito studiare il sistema ancora all'equilibrio, ma introducendo delle efficienze di stadio, che permettono di calcolare il differente assorbimento di H_2S e CO_2 da parte della colonna e di valutare pertanto correttamente le prestazioni del sistema di desolforazione.

Lo studio ha permesso di valutare l'influenza dei principali parametri operativi sulle prestazioni dei sistemi di rimozione, in particolare sulla portata di solvente richiesta per il raggiungimento di una prefissata efficienza di rimozione dei gas acidi e sulla energia termica richiesta per la purificazione del solvente nei processi di desorbimento. L'analisi dei risultati ha mostrato come le prestazioni calcolate dai modelli siano risultate essere in linea con i dati di letteratura per i processi di assorbimento di $H_2S e CO_2$ da parte di MDEA e MEA. Benché lo studio delle prestazioni della sezione di shift conversion del CO esuli dallo scopo di questa ricerca, è stata effettuata un'analisi delle prestazioni della sezione di CO-shift al variare dei principali parametri operativi (quali ad esempio il rapporto molare H_2O/CO), al fine di individuare le condizioni ideali per l'assorbimento nella successiva sezione di cattura della CO_2 .

Infine il confronto delle prestazioni del sistema di condizionamento e purificazione alimentato da gas di sintesi proveniente da carbone Sulcis ad alto tenero di zolfo, con quelle ottenute con alimentazione da gas di sintesi da carbone estero a ridotto contenuto di zolfo, mostra come nella sezione di desolforazione l'utilizzo del carbone Sulcis comporti una spesa energetica 4-5 volte superiore rispetto agli usuali carboni commerciali, mentre nessuna significativa differenza viene riscontrata nelle prestazioni della sezione di cattura della CO₂.

Una più dettagliata descrizione del lavoro svolto e dei risultati ottenuti è riportata nel rapporto relativo alla analisi, modellazione e sperimentazione di processi di produzione e trattamento del syngas proveniente da gassificazione del carbone.

Sempre sul tema della cattura della CO₂ il Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Cagliari, ha poi sviluppato un modello teorico e l'effettuazione di simulazioni numeriche del processo di cattura della CO₂ dal syngas proveniente dalla gassificazione del carbone con l'utilizzo di solventi liquidi a base di ammine di diverso tipo. Un primo obiettivo è stato quello di effettuare un'analisi predittiva delle prestazioni delle sezioni di assorbimento sia in reattori a bolle che in colonne a riempimento. Un secondo obiettivo prevede l'analisi e la modellazione della fase di rigenerazione dei solventi. Le attività si sono principalmente svolte, presso l'Università di Cagliari Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali con l'obiettivo della realizzazione di un attività di ricerca sul processo di cattura della CO₂ dal syngas da carbone con l'utilizzo di diversi tipi di ammine (MEA, DEA, MDEA etc.) sia pure che in miscela, disciolte in acqua a differenti concentrazioni. La finalità è quella di sviluppare modellistica di supporto alle attività sperimentali condotte sia nei laboratori che in scala più significativa negli impianti ENEA/Sotacarbo.

Nel particolare l'attività si è focalizzata sullo sviluppo di un modello matematico a parametri distribuiti dei componenti assorbitore, ossia reattore a bolle e colonna a riempimento e rigeneratore. Tali modelli, costituiti da equazioni di bilancio, capaci di riprodurre le diverse condizioni di funzionamento degli impianti vengono utilizzati per la caratterizzazione del processo e la predizione del comportamento in esercizio dei componenti di impianto in termini di funzionalità, efficienza, e risposta alle modifiche nei parametri di regolazione. Passando attraverso la valutazione e l'implementazione della migliore tecnica di risoluzione numerica del modello con misura della rapidità di convergenza si è poi implementata, all'interno di software di simulazione di tipo commerciale, un interfaccia grafica utente che consente un facile utilizzo del modello di componente sviluppato.

Come è noto l'assorbimento con soluzioni di ammine è il metodo più utilizzato nell'industria per la cattura della CO_2 da correnti gassose. Per la conduzione di questa operazione si impiegano diverse apparecchiature. In alcune il gas viene fatto gorgogliare nel liquido, in altre è il liquido che viene spruzzato nel sotto forma di goccioline, ma l'apparecchiatura di più largo uso è la colonna a riempimento. Le condizioni operative più favorevoli all'assorbimento sono una temperatura relativamente bassa e una pressione relativamente alta.

Poiché queste soluzioni sono molto costose, risulta conveniente riciclarle riducendo preventivamente la concentrazione delle sostanze precedentemente assorbite. Questa operazione, chiamata "stripping" oppure rigenerazione del solvente, è sempre presente contemporaneamente all'assorbimento negli impianti industriali.

Il desorbimento dei gas catturati si effettua usando le condizioni operative sfavorevoli all'assorbimento ossia alta temperatura e bassa pressione. Poiché non è conveniente lavorare a pressioni inferiori a quella atmosferica, di solito lo stripping viene condotto a pressione atmosferica. Per lavorare a temperatura elevata si utilizza come desorbente una corrente preventivamente riscaldata. Una delle sostanze che presenta le migliori caratteristiche chimico-fisiche per questo impiego è il vapor d'acqua.

E' stato predisposto un modello matematico che simula il funzionamento di una colonna di stripping per la rigenerazione di soluzioni di ammine che erano state precedentemente utilizzate per l'assorbimento di CO_2 . SO_2 e H_2S . Sono state eseguite diverse simulazioni utilizzando soluzioni contenenti MEA o DMEA. Per incrementare la versatilità del modello è stata aggiunta, fra i composti da desorbire, anche la SO_2 . In tutti i casi si è utilizzato come base una colonna impaccata che opera in controcorrente con vapore saturo surriscaldato.

Le ipotesi semplificative adottate sono le seguenti:

- il comportamento fluidodinamico del reattore è di tipo plug-flow. I parametri chimico-fisici (temperatura, pressione e concentrazione) variano quindi soltanto nella direzione dell'asse verticale della colonna;
- il trasporto diffusivo in direzione longitudinale (quella del moto) è trascurabile rispetto al trasporto convettivo;
- le reazioni che avvengono in fase liquida fra i gas acidi e il sorbente sono molto veloci;
- la resistenza al trasporto di materia fra le due fasi gas e liquida è concentrata nei due film che si ritiene siano presenti nel lato gas e nel lato liquido;
- l'ammina non si trasferisce apprezzabilmente nella fase vapore;
- viene inviato vapore saturo surriscaldato puro in controcorrente con il liquido da strippare;
- le perdite di calore verso l'esterno sono trascurabili.

Il modello matematico che deriva da queste premesse è un modello monodimensionale. Si potranno quindi scrivere i bilanci di materia e di energia su un elemento infinitesimo nella direzione longitudinale. I bilanci di materia sono stati scritti per tutti i cinque componenti presenti nel sistema: CO_2 , H_2S , SO_2 , ammina e H_2O separatamente per le due fasi, liquida e gas. Questi bilanci sono legati fra loro dalle equazioni di trasporto di materia. Dall'elaborazione di questi bilanci di materia si ottengono infine due equazioni differenziali per ciascuno dei 5 componenti (CO_2 , H_2S , SO_2 , MDEA o MEA e H_2O) presenti nel sistema. E' inoltre presente un'equazione

algebrica per ciascun componente in ciascuna sezione della colonna che esprime l'equilibrio termodinamico esistente all'interfaccia fra le due fasi, liquida e gassosa.

Le equazioni differenziali che costituiscono il modello matematico sono state integrate con un metodo numerico alle differenze finite completamente esplicito di tipo euleriano. Il controllo di convergenza sui bilanci di materia viene effettuato su tutti i componenti. Questa scelta aumenta la precisione dei risultati, ma rallenta il raggiungimento della convergenza. Nella configurazione attuale il programma raggiunge la convergenza con un numero molto alto di iterazioni, talvolta possono essere necessarie diverse centinaia di iterazioni. Sono state testati anche altri metodi di calcolo che, in linea di principio, apparivano più semplici. Ad esempio, si è verificata una procedura di calcolo che prevede un unico ciclo iterativo alla fine del quale si effettua un unico controllo di convergenza sull'intero sistema di equazioni di bilancio di materia e di entalpia. Nonostante la maggiore semplicità, la convergenza risulta più difficile con risultati spesso oscillanti e talvolta divergenti.

Per quanto riguarda in particolare per la colonna di stripping, le dimensioni della colonna sono i seguenti: altezza 13 m, diametro 1,5 m, riempita con anelli Pall da 25 mm aventi quindi un'area superficiale di 205 m²/m³. Le condizioni operative utilizzate per una simulazione sono riportate in Tabella 8.

Pressione totale, atm	1
Portata vapore, kmol/h	250
Portata corrente liquida, m ³ /h	20
Conc. CO ₂ in, kmol/m ³	2,5
Conc. SO ₂ in, kmol/m ³	0,156
Conc. H ₂ S in, kmol/m ³	1,0
Conc. ammina in, kmol/m ³	5,0
T ammina in, °C	105
T vapore in,	120

Tabella 8. Parametri fisici considerati nella simulazione della rigenerazione

K_G per CO₂, kmol/(m² atm h)

K_G per H₂S, kmol/(m² atm h)

Il diagramma in Figura 86 mostra l'andamento della concentrazione di ${\rm CO_2}$ nella corrente di liquido lungo la colonna al variare dell'altezza totale di quest'ultima.

8

22

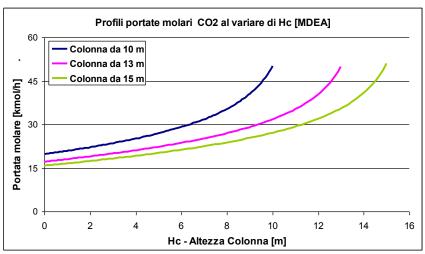


Figura 86. Profili di portata CO₂ nella colonna di desorbimento

Il diagramma mostra come varia l'efficienza di rimozione della CO_2 facendo variare l'altezza della a parità di condizioni di ingresso. Si vede in particolare che l'efficienza di rimozione non varia di molto, in quanto la portata di CO_2 in uscita, che era di circa 18 nel caso base, si riduce a circa 17 per l'altezza di 15 metri e sale a circa 20 riducendo l'altezza a 10 metri.

E. Studio e sperimentazione di tecnologie di confinamento della CO₂ in bacini carboniferi profondi e acquiferi salini

Per lo stoccaggio della CO₂, è stato sviluppato uno studio geosismologico con l'avvio di attività analitiche di laboratorio e l'effettuazione di indagini geologiche mirate all'applicazione nel bacino carbonifero del Sulcis di tecniche di confinamento della CO₂ all'interno degli strati carboniferi non coltivabili (ECBM) e negli acquiferi salini sottostanti. Partendo dalla collaborazione con operatori già coinvolti per competenze geologiche e know how tecnologico nell'ambito del confinamento della CO₂, si è dato inizio in questo frangente alla valutazione, progettazione e realizzazione di un primo set up sperimentale che fornirà dati utili sui processi di iniezione e monitoraggio di un impianto prova Test Site a cui farà seguito una prima campagna sperimentale di iniezione e monitoraggio. I dati ricavati saranno elaborati e resi di pubblico dominio per ulteriori azioni di R&S, in particolare verso RSE, che potrà meglio dettagliare la zona del bacino del Sulcis nel progetto globale di mappatura dei siti idonei allo stoccaggio della CO₂ nell'intero territorio nazionale.

Un aspetto critico legato allo stoccaggio geologico della CO₂ prodotta dall'uomo è la possibilità di controllare con tecnologie adeguate le fasi di iniezione e post-iniezione. In particolare, è importantissimo sviluppare tecniche in grado di garantire la tenuta del serbatoio profondo e di individuare velocemente la presenza di eventuali fughe anche di piccola entità. Nell'ambito di questa attività è stato curato dal Centro di Ricerca per la Previsione Prevenzine e Controllo dei Rischi (CERI) dell'Università di Roma "La Sapienza" sia l'aspetto legato allo studio della baseline, sia quello relativo alla messa a punto e istallazione del sistema di monitoraggio in continuo. Lo studio della baseline è stato condotto mediante campagne di soil gas survey, mentre la parte relativa al monitoraggio è stata sviluppata mettendo a punto un sistema di controllo specifico. Sulla base dei risultati ottenuti dalla prospezione regionale dei gas del suolo condotta nell'area della concessione mineraria della Carbosulcis nell'ambito della convenzione "The Carbosulcis CO₂-ECBM project" sono state selezionate due zone in cui posizionare le stazioni di monitoraggio in continuo (Figura 87)

In particolare, una zona nel settore settentrionale in cui è stato misurato il valore più elevato di concentrazione di elio (5,7 ppm), e una zona nel settore meridionale in cui sono stati rilevati valori di background di $\rm CO_2$ e $\rm CH_4$. Entrambe le zone sono localizzate in corrispondenza dell'elemento tettonico che taglia l'area di indagine da nord a sud. In tali aree è stata condotta una prospezione di dettaglio mirata a migliorare la conoscenza dei valori di fondo tipici presenti ed a permettere quindi una migliore interpretazione dei dati raccolti durante il monitoraggio.

Sono stati raccolti 60 campioni (30 per zona) al fine di valutare le concentrazioni di elio, CO₂, CH₄ e dei flussi di CO₂ e poter ubicare le stazioni di monitoraggio in posizioni ottimali.

Il sistema di monitoraggio in continuo è stato sviluppato sulla base dell' esperienza maturata in progetti di ricerca comunitari quali CO₂ ReMoVe, CO₂ GeoNET e MovECBM, nonché di convenzioni di ricerca stipulate a livello nazionale. Sulla base di queste esperienze, è stato possibile pensare a diverse configurazioni di sistemi di monitoraggio specificatamente dedicati ad operare nell'area del Sulcis sia in acqua che nella zona insatura del terreno. Lo sviluppo del sistema è stato basato non solo sull'accuratezza della misura in un'ottica di riduzione dei costi, ma anche sulla massima flessibilità in termini di numero di punti monitorabili, di possibilità di misurare i parametri di interesse a diverse profondità e di possibilità di accedere facilmente ai dati raccolti anche da parte di più operatori. Il risultato di questo approccio è stato la realizzazione di sonde in grado di operare indifferentemente nella zona insatura del terreno o in acqua e con

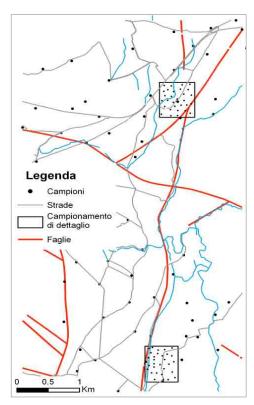


Figura 87. Aree di interesse per il monitoraggio in situ

modalità di accesso ai dati e di controllo del sistema via web molto flessibili e personalizzabili.

Sono state progettate e costruite sonde di piccole dimensioni (82 mm di diametro x 230 mm di altezza), collegate via cavo ad un'unità centrale (Figura 88a). Il protocollo di collegamento utilizzato è di tipo seriale RS-485 in grado di operare anche su grandi distanze (> 1000 m). Potenzialmente una singola unità centrale è in grado di gestire fino a 10 sonde, in questo caso ognuno dei due sistemi di monitoraggio è collegato a 3 sonde (Figura 88b,c). I sensori utilizzati per la determinazione di CO₂ e CH₄ sono di tipo NDIR, tale scelta permette di minimizzare il consumo delle stazioni mantenendo un'elevata qualità del dato sia in termini di stabilità del segnale (assenza di

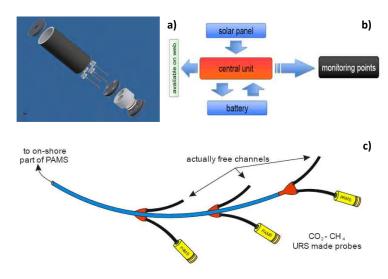


Figura 88. Raffigurazione del case della sonda (a), schema concettuale di funzionamento del sistema di monitoraggio (b) e modalità di collegamento multi-sonda (c)

deriva strumentale tipica dei sensori elettrochimici) che di durata. Oltre a queste determinazioni, ogni sonda è in grado di misurare temperatura e pressione atmosferica (o profondità se istallate in acqua). Tali sonde, costruite per essere collegate all'unità centrale, possono lavorare anche in totale autonomia grazie alla progettazione di un piccolo modulo aggiuntivo che ne permette il collegamento ad un pacco batterie. I dati, sia nel caso del collegamento via cavo, sia in quello di alimentazione a batteria possono essere immagazzinati in una memoria (di tipo eeprom o sd card) alloggiata nella sonda stessa.

I dati raccolti dalle sonde sono memorizzati nell'unità centrale su una SD card e possono essere trasferiti via modem o LAN dopo ogni campionamento ad un database ubicato in

un server centrale. Il sistema sfrutta una connessione gprs/umts e prevede che ogni stazione di monitoraggio, caratterizzata da un ID univoco, trasferisca i dati sul medesimo database. Questa possibilità semplifica enormemente le operazioni di gestione ed elaborazione dei dati raccolti da reti di monitoraggio complesse. Utilizzando l'interfaccia web è anche possibile modificare numerose impostazione tra cui tempo di misura, intervallo di analisi ecc.

I sistemi di monitoraggio sono stati istallati nelle 2 aree in cui sono state effettuate le prospezioni di dettaglio nel mese di giugno 2010. Il sistema istallato nell'area 2 ha subito un inconveniente tecnico che ne ha impedito l'acquisizione dei dati per circa 3 settimane. L'istallazione del sistema ha previsto il posizionamento delle sonde a 2 diverse profondità (1,5 e 0,8 m), in questo modo è stato anche possibile ottenere una stima del flusso di anidride carbonica sulla base del coefficiente di diffusione della CO₂ nelle argille e della differenza di profondità tra le sonde.

Le Figure 89 e 90 mostrano i risultati ottenuti nei 3 mesi di monitoraggio. Tali risultati si riferiscono solo alla CO_2 in quanto il metano ha presentato costantemente concentrazioni inferiori alla sensibilità dei sensori utilizzati (50 ppm). Dalla Figura 89 ai può osservare come i valori di CO_2 ad entrambe le profondità di prelievo siano cresciuti coerentemente con quelli di temperatura confermando una probabile origine biologica dell'anidride carbonica. La Figura 90 mostra che i valori di CO_2 ad entrambe le profondità di prelievo sono molto simili e più bassi rispetto all'area di studio 1 confermando che questa zona è caratterizzata da valori molto prossimi alla media nazionale misurata nei gas del suolo.

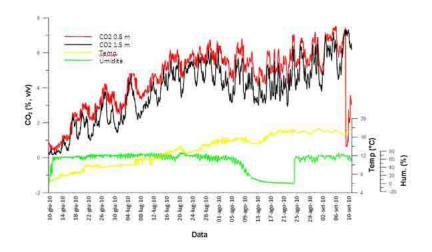


Figura 89. Risultati acquisiti durante 3 mesi di monitoraggio nell'area di studio 1

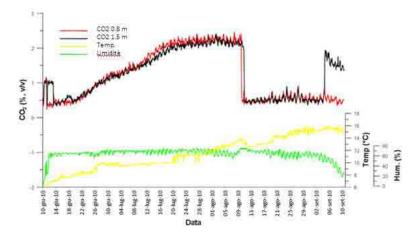


Figura 90. Risultati acquisiti durante 3 mesi di monitoraggio nell'area di studio 2

Un'altra attività collaterale condotta dal CERI ha riguardato l'intervento sul territorio di Carbonia e lo studio del contesto territoriale e sociale legato all'introduzione delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO2. La metodologia applicata e l'organizzazione delle diverse fasi della ricerca è stata supportata dalla teoria dell'analisi della domanda, integrata con i più recenti contributi scientifici in ambito di comunicazione con il pubblico e public engagement. L'analisi della domanda è un modello teorico che permette, a partire da una richiesta da parte di un contesto, di costruire un intervento modulato sulle esigenze di quella persona o di quel gruppo di persone, tenendo in considerazione le loro particolari esigenze, le loro possibilità di sviluppo e le risorse che possono mettere in campo per avviare processi di miglioramento. Inoltre l'attenzione si rivolge alle dimensioni culturali indagabili attraverso le rappresentazioni sociali. Tale modello teorico permette un'integrazione tra domanda, cultura e risorse locali con le ricerche scientifiche portate avanti in campo internazionale sulla comunicazione e sulle esperienze di public engagement degli stakeholder in tema di CCS. Fondandoci su tali premesse teoriche sono stati prima contattati gli stakeholder utili al nostro scopo ed in seguito sono stati intervistati tramite focus-group, interviste individuali, o tramite questionari. A precedere questo step di lavoro è stata avviata un'analisi storica e sociale del contesto e tramite la letteratura prodotta nella zona del Sulcis si è così potuto costruire un quadro delle dinamiche sociali dell'ultimo secolo per quanto riguarda: il mercato del lavoro e i flussi migratori; le culture delle diverse imprese locali; i rapporti con l'autorità politica; i rapporti con le organizzazioni sindacali; i processi di industrializzazione e de-industrializzazione; i flussi demografici. Solo successivamente si è entrati in contatto con diversi tipi di stakeholder distinguibili in base ad un diretto interesse nello sviluppo del progetto (aziende implicate nel progetto, enti di ricerca implicati nel progetto, organi politici, ecc.) ed in base ad un interesse indiretto nei riguardi del CSS (associazioni di cittadini, cittadini, associazioni di lavoratori, istituzioni scolastiche, ecc.). I primi avranno un ruolo primario nello sviluppo della tecnologia, in quanto contribuiranno attivamente a sperimentarla e metterla in atto, mentre i secondi avranno un ruolo indiretto, in quanto parte integrante della comunità in cui tale progetto produrrà i suoi effetti. Le analisi emerse in questa fase della ricerca forniranno informazioni qualitative e quantitative: sul tipo di conoscenza della tecnologia e delle problematiche ambientali tra i vari stakeholder, sulle risorse sociali utilizzabili per far progredire il processo, sulle possibili modalità di coinvolgere i diversi stakeholder, nonché sulle rappresentazioni sociali che tiene insieme la rete di rapporti nella comunità. Le successive fasi di ricerca prevedono analisi statistiche dei testi raccolti durante focus-group e interviste al fine di poter avanzare ulteriori e più articolate ipotesi di lavoro. Dopo un'analisi dei questionari somministrati ai cittadini sono state raccolte le seguenti informazioni.

Come dimostra la Tabella 9 poco meno della metà della persone intervistate (41,9%) affermano di aver sentito parlare di impianti ad emissione zero, mentre il 27,9% ha sentito parlare della tecnologia del CCS.

Tabella 9. Risultati interviste effettuate

	SI	NO	Totale
Soggetti che hanno sentito parlare di impianti ad emissione zero	41,9%	55,9%	100%
Soggetti che hanno sentito parlare di tecnologia CCS	27,9%	72,1%	100%

Ulteriori analisi sulle risposte date dagli intervistati, mostrano la corrispondenza tra queste informazioni e l'effettiva conoscenza delle tecnologie per gli impianti ad emissione zero. Per quanto riguarda il CCS ulteriori analisi permetteranno di capire quali sono i punti meno chiari alla popolazione di tale tecnologia e definire le aree su cui i cittadini cercano maggiori informazioni.

Per quanto riguarda le rappresentazioni e le conoscenze sulle modalità di produzione energetica gli intervistati hanno indicato principalmente fonti rinnovabili come l'energia solare e l'energia eolica (Tabella 10). L'energia nucleare, idroelettrica e l'energia prodotta attraverso la combustione del carbone sono state menzionate da diversi intervistati. Altre fonti come i termovalorizzatori, l'energia geotermica e il petrolio non sono state riportate nella tabella in quanto aventi percentuali al momento non rilevanti.

Tabella 10. Fonti energetiche menzionate dagli intervistati

Eolico	Solare	Carbone	Idroelettrica	Nucleare	Biomasse
76,50%	70,50%	26,50%	26,50%	25,00%	10,50%

In ultima analisi è stato valutato in quale ordine le fonti di produzione energetica sono state menzionate per capire quale è più vicina alle conoscenze e alle rappresentazioni della popolazione (Tabella 11). Dalle analisi è emerso come l'eolico sia la prima alternativa che viene in mente agli intervistati (38,2%) quando si parla di produzione energetica, seguita dal solare (26,5%). Un dato interessante riguarda il nucleare, mai presente come prima scelta, anche se il 25% lo ha menzionato tra le potenziali fonti energetiche (Tabella 10).

Tabella 11. Fonti di energia menzionate come prime

Eolico	Solare	Idroelettrico	Carbone	Petrolio	Biomasse	Non sa	Altro	Totale
38,2%	26,5%	5,9%	4,4%	2,9%	1,5%	4,4%	16,2%	100%

Per quanto concerne l'analisi della stampa locale l'obiettivo che si punta a raggiungere è l'analisi di una raccolta di articoli di giornali attraverso criteri standard al fine di ottenere categorie utilizzabili per esplorare le diverse modalità utilizzate per la diffusione di notizie relative alla tecnologia CCS. La selezione delle fonti ha interessato gli articoli pubblicati dal 2005 al 2009 sulla stampa locale della Sardegna, in particolar modo sui giornali. Le seguenti aree sono state esplorate al fine di analizzare come le tecnologie CCS vengono presentate dalla stampa:

- Contesto. Il tema del CCS è riportato, sulla stampa locale, soprattutto in relazione alla dimensione industriale e alla sua contestualizzazione locale, dimensioni trattate nell'84% circa degli articoli. Seguono, in ordine di importanza, il rapporto con le istituzioni europee e la dimensione economica rispetto all'implementazione della tecnologia, presenti entrambi nel 60% degli articoli analizzati. Tra i temi non ancora marginali, quello della produzione di energia pulita, riportato dal 40% del campione, e quello del cambiamento climatico e dell'inquinamento da gas serra (30%).
- Come viene descritta la tecnologia. Generalmente le informazioni disponibili sul tema della tecnologia CCS non sono approssimative. Seppur nella logica di informare molte persone, riportano i termini attuali del dibattito relativo all'innovazione industriale possibile nell'area del Sulcis e dell'utilità della cattura della CO₂ quale contributo alla vita futura di Carbosulcis e Sotacarbo. L'implementazione del CCS è interpretata, in tale contesto, come un possibile vantaggio strategico, in termini di competitività, che queste potrebbero ricevere, se ci fosse una volontà politica forte a sostegno del progetto.
- Aspetti economici. Quello sul CCS è un investimento che si rivela molto ambito, per lo sviluppo e l'innovazione delle aziende che inquinano: una partita che si gioca tra l'altro nella dimensione comunitaria. Non è rappresentato nei termini di un investimento economico, ma al contrario di una opportunità di alto profilo, con costi iniziali non bassi da sostenere.
- Problematiche. Il 51% degli articoli non presenta la descrizione di problematiche e, quando ciò si verifica, si descrivono gli ostacoli allo sviluppo della tecnologia CCS esistenti non solo in Sardegna, ma in tutto il Paese e, di concerto con questo tema, l'incerta volontà politica che si delineerebbe dalle notizie circolanti in merito. Un'altra criticità evidenziata sarebbe rappresentata dal fatto di trovarsi ancora nella fase iniziale della ricerca. Questi tre aspetti del problema costituiscono l'ampia maggioranza (76%) sul totale di quelli messi all'attenzione del lettore.

- Valutazione della tecnologia. Si ha il prevalente sostegno del CCS (38%), i cui benefici si collocherebbero soprattutto sul versante della possibilità di risollevare un territorio che risente della mancanza di una politica industriale di respiro europeo. Nei pochi casi (6%) in cui si esprimono opinioni avverse al suo sviluppo, si mettono in evidenza dubbi legati alla sua possibile efficacia oppure si pensa ad alternative al carbone.
- Connotazione. Appare maggiormente presente (55%) la volontà di esprimersi rispetto a quella di non farlo e
 predomina nettamente un atteggiamento positivo legato alla sua implementazione. Si tratta, per altro, di
 una connotazione della cattura della CO₂ legata ai benefici da essa apportati di per sé, indipendentemente
 perciò dai problemi economici o da quelli connessi alla sua percezione pubblica.

La raccolta dei dati è stata effettuata coinvolgendo diversi soggetti:

a) 8 Focus group:

- 1 Focus group Consiglio dei ragazzi,
- 1 Focus group con ragazzi che svolgono attività di servizio civile nazionale a Carbonia,
- 5 Focus group con dipendenti della Carbosulcis,
- 1 Focus group con l'associazione "Amici della Miniera",
- 1 Focus group con la Commissione Cultura dell'Assessorato alla Cultura e allo Sport
- 1 Focus group con presidi istituti superiori di Iglesias

b) 13 Interviste individuali non strutturate:

- 9 interviste con dirigenti, ricercatori e addetti "Sotacarbo"
- 1 intervista con dirigente Carbosulcis
- 1 intervista con rappresentante CGIL,
- 2 interviste con collaboratori del "Centro Italiano della Cultura del Carbone" (CICC) Museo del Carbone
- 1 intervista con Direttore Museo del Carbone
- 1 intervista con sindaco di Iglesias
- 1 intervista con professore dell'Università di Cagliari.

c) sondaggio face to face tra i cittadini di Carbonia, con interviste a 150 persone.

Nel condurre le attività di ricerca si è prestata particolare attenzione alla costruzione di rapporti di collaborazione che consentano il proseguimento del lavoro con la comunicazione di informazione atta ad una comprensione da parte di tutti, anche i non addetti ai lavori, della ricerca scientifica che è alla base dei progetti di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica. Di concerto con le istituzioni locali e la realtà industriale e di ricerca sono state pianificate attività nell'ambito delle quali verrà effettuata la comunicazione, quali per esempio la partecipazione al Festival della letteratura per ragazzi e iniziative di convegni pianificati dagli enti di ricerca e industriali impegnati sul territorio. Tali occasioni saranno sfruttate anche per la pubblicizzazione dei materiali informativi prodotti e delle attività di e-learning rese disponibili. In tale ambito verranno inoltre ulteriormente verificate le richieste informative per un eventuale proseguimento del lavoro. In questa fase ci si è limitati a valutare la situazione senza avviare processi di sensibilizzazione nella popolazione, nell'idea che un intervento di questo tipo vada calibrato in base allo specifico contesto in cui si va ad intervenire. E' perciò necessario comprendere bisogni, prospettive di sviluppo, e modalità di funzioni nel contesto di riferimento per poi avviare e stimolare attività di partecipazione sul territorio.

Sempre nell'ambito delle attività relative allo stoccaggio della CO₂ è stato sviluppato presso il Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali (DIGITA) dell'Università di Cagliari uno studio di prefattibilità per il progetto di iniezione di CO₂ con tecniche ECMB. Infatti la corretta identificazione dei potenziali siti per lo stoccaggio geologico dei gas serra (come ad esempio la CO₂) rappresenta uno step operativo di fondamentale importanza perché sia garantito il successo del progetto. È palese che, più che mai nell'ambito delle tecnologie CCS, il buon esito di un progetto di stoccaggio geologico può dirsi raggiunto solo se, accanto alla riuscita tecnico-economica dell'impresa, risulta garantita la sicurezza per le popolazioni residenti e per gli ecosistemi ambientali direttamente esposti.

Il complesso delle valutazioni che debbono essere operate per l'identificazione del serbatoio geologico ottimale deve necessariamente tenere in considerazione un elevato numero di parametri, spesso assai eterogenei tra loro, che riguardano sia le caratteristiche intrinseche del corpo geologico e delle formazioni incassanti, che le condizioni ambientali al contorno e le limitazioni dettate da fattori antropici e/o politici. La molteplicità e la variabilità di tutti questi parametri rende, di fatto, ogni scenario unico e, quindi, diviene impossibile la definizione di linee guida universalmente valide che possano guidare il decision maker nella redazione del progetto finale. Tali

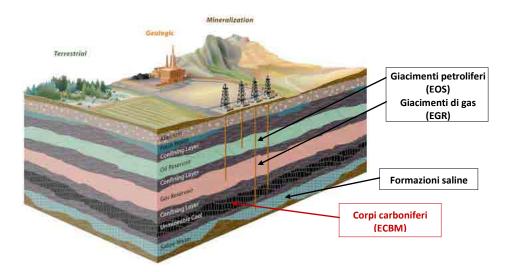


Figura 91. Tipologia dei diversi serbatoi geologici per lo storage della CO₂

problematiche, rendono proibitivo per il decision maker il ricorso alla sua esclusiva esperienza e discrezionalità suggerendo, invece, l'utilizzo delle potenzialità di un Sistema di Supporto Decisionale (DSS - Decision Support System). Nell'ambito delle tecnologie CCS, il connubio tra DSS e tecnologie GIS consente la realizzazione di strumenti particolarmente precisi e potenti per l'identificazione e la risoluzione di problemi tecnici (ad esempio, la localizzazione dei serbatoi geologici idonei a contenere elevati quantitativi di gas in pressione) e per l'identificazione e la valutazione tecnico-economica di alternative progettuali (ad esempio, la progettazione della più razionali soluzioni di monitoraggio ambientale) affinché sia garantito il giusto compromesso tra la riuscita tecnico-economica del progetto e la sicurezza per le popolazioni indigene e gli ecosistemi direttamente coinvolti. Tale lavoro di ricerca, esplorando il campo degli strumenti decisionali, presenta i primi risultati ottenuti nella realizzazione di uno strumento GIS-DSS all'interno del bacino carbonifero del Sulcis (Sardegna, SW). Il GIS-DSS oggetto del presente studio è stato interamente realizzato con ArcGIS Model Builder 9.3. I dati disponibili relativi al DTM del bacino, il modello 3D del corpo carbonifero, le carte geologiche, le foto aeree, l'uso del suolo ed i dati relativi ad i vincoli ambientali e territoriali, sono stati combinati attraverso il Weighted Overlay Process (WOP). La procedura applicata rappresenta un particolare algoritmo di Valutazione Multi-Criteria - MCE. La valutazione MCE è una procedura di comparazione a criteri multipli che ha come scopo quello di contribuire allo sviluppo di un processo di apprendimento che alimenta lo stesso processo decisionale. Si tratta quindi di un metodo non monetario per esaminare la convenienza di progetti di investimento caratterizzati da un rilevante impatto di tipo ambientale, sociale ed economico nel contesto in cui vengono realizzati.

A differenza dell'Analisi Costi Benefici ACB, tecnica di valutazione monocriteriale che esprime il giudizio di convenienza in funzione del solo criterio monetario, l'analisi multicriteri AMC cerca di razionalizzare il processo di scelta del decision maker attraverso l'ottimizzazione di un vettore di più criteri, pesati secondo le priorità da questo fissate. I problemi decisionali con cui ci si scontra nel campo delle tecnologie CSS, tipicamente coinvolgono un insieme di alternative possibili ed un gran numero di criteri di valutazione conflittuali e spesso non facilmente misurabili. Per questo motivo necessitano di metodologie decisionali che siano a criteri multipli e basate su sistemi di informazione geografici (GIS). Queste due distinte aree di ricerca, GIS ed analisi a criteri multipli AMC, possono beneficiare una dell'altra: da un lato infatti le tecniche GIS rivestono un ruolo importante nell'analizzare una grande varietà di dati necessari per il processo di decisione, dall'altro le metodologie di AMC offrono procedure capaci di elaborare e modellare le preferenze dei decisori incorporando il processo decisionale all'interno di un sistema geografico. Nonostante il fatto che la maggior parte dei problemi di decisione spaziale sia multicriteri in natura dal momento che coinvolge varie dimensioni quali quella economica, sociale, ambientale e politica con interessi spesso in conflitto fra loro, le tecniche di Decision Making a criteri multipli sono state solo recentemente inserite ed integrate nel campo dell'analisi spaziale pervenendo al concetto di sistemi decisionali multi criteri spaziali o basati su GIS. Un problema decisionale a criteri multipli e spaziale comporta l'esistenza di un insieme di alternative geograficamente definite fra le quali un ordinamento ed una scelta vengono effettuate nel rispetto di un dato insieme di criteri di valutazione. Le alternative sono geograficamente definite nel senso che il risultato dell'analisi (la decisione) dipende anche dalla loro distribuzione spaziale. In termini GIS le alternative possono essere rappresentate attraverso una primitiva geometrica (punto, linea, arco, raster) a cui sono associati i valori dei criteri di valutazione che sono memorizzati come attributi alfanumerici.

Le convenzionali tecniche di AMC non spaziali tipicamente usano la media o il totale degli impatti di un'alternativa su un sistema ambientale ritenendoli appropriati per l'intera area in considerazione: in altre parole gli approcci convenzionali assumono un'omogeneità spaziale all'interno dell'area di studio. Questa assunzione è chiaramente poco realistica dal momento che i criteri di valutazione, o meglio gli attributi che servono a misurarli, variano nello spazio. L'analisi multicriteri spaziale rappresenta pertanto un significativo passo in avanti rispetto alle tecniche di AMC convenzionali a causa della esplicita componente spaziale che richiede sia la conoscenza e la rappresentazione dei dati relativi ai criteri (criterion maps), sia la localizzazione geografica delle alternative. I dati territoriali vengono processati usando le potenzialità informatiche del GIS ed i metodi di analisi multicriteri per ottenere le informazioni necessarie per supportare le decisioni. L'analisi a criteri multipli spaziale può essere pensata, quindi, come un processo che combina e trasforma i dati geografici di input in un output decisionale. In particolare, la procedura applicata, procede attraverso l'assegnazione diretta sulla base di una scala di punteggio prestabilita (da 1 a 10, 100 o 1000, ecc.) di pesi relativi ai criteri che serve a stabilire un ordine di importanza relativa tra questi ultimi. In pratica i pesi misurano, attraverso valori numerici a-dimensionali, le priorità che si assegnano ai vari aspetti del problema e per tale motivo non hanno mai valore assoluto ma solo relativo. Ciascun indicatore di solito viene moltiplicato per il rispettivo peso prima di essere aggregato agli altri valori, come verrà spiegato oltre. La versione attuale del GIS-DSS, perfettamente funzionante ma ancora in fase di sviluppo, può essere modificata per considerare un maggior numero di parametri di valutazione in ingresso e/o per produrre valutazioni differenti variando l'incidenza di ciascun parametro.

Un'altra attività condotta presso il Dipartimento DIGITA è relativa a una prima caratterizzazione e valutazione della capacità di adsorbimento/desorbimento della CO₂ all'interno di campioni di carbone Sulcis volta all'applicazione di tecniche di confinamento ECBM che consentono di ottenere il recupero del metano imprigionato all'interno di un corpo carbonifero attraverso l'iniezione di CO₂ ad alta pressione. Oggi queste tecniche hanno assunto una particolare importanza per due differenti ordini di motivazioni:

- la possibilità di operare il sequestro di elevati quantitativi di gas serra (i.e. CO₂) per tempi geologici, riducendone quindi la concentrazione in atmosfera;
- l'elevato quantitativo, in funzione della tipologia del carbone (rango, composizione macerale, umidità, struttura microscopica, contenuto di gas, temperatura e pressione del reservoir), di CH₄ che si riesce a liberare.

La corretta determinazione ed interpretazione dei dati di adsorbimento/desorbimento rappresenta uno step operativo di fondamentale importanza per caratterizzare le prestazioni di corpo carbonifero. Infatti, solo attraverso tali dati è possibile valutare il rilascio di gas dal reservoir quando la pressione si riduce per effetto della produzione e del recupero del gas naturale liberato.

L'adsorbimento è un processo chimico-fisico complesso. Il termine implica la condensazione di gas su superfici libere, mentre per designare la penetrazione di molecole di gas nella massa solida si preferisce usare il termine assorbimento (sinonimo di imbibizione).

I carboni sono capaci di adsorbimento seguito da assorbimento e possibile riorganizzazione della intricata struttura macromolecolare. L'adsorbimento è il principale meccanismo di sequestro dei gas negli strati di carbone. Esso è descrivibile per mezzo di diversi modelli matematici a seconda delle modalità di sviluppo del processo.

L'adsorbimento di CO₂ sul carbone è stato studiato da molti anni generalmente in condizioni di bassa pressione e temperatura. Le informazioni messe a disposizione dalla ricerca, pur essendo utili per le valutazioni relative al sequestro geologico, si riferiscono tuttavia a condizioni ben lontane da quelle incontrate negli strati di carbone nelle parti non coltivabili dei giacimenti, caratterizzate da alte pressioni e temperature elevate per le quali le informazioni sono ancora relativamente scarse. Carente à infatti la conoscenza sui fenomeni di assorbimento nella porosità del carbone e mancano dati quantitativi sul fenomeno di rigonfiamento.

La simulazione del processo che avviene nelle operazioni ECBM richiede la costruzione di modelli matematici affidabili capaci di descrivere il comportamento dell'anidride carbonica e del metano nel processo di adsorbimento binario. Pertanto la comprensione dei fenomeni e la conoscenza dettagliata delle isoterme della CO_2 e del CH_4 sono di importanza determinante per l'individuazione e lo sviluppo ottimale delle tecniche di sequestro della CO_2 con contestuale liberazione di CH_4 .

I risultati della simulazione consentiranno di stimare la capacità di immagazzinamento della CO₂ degli strati di carbone e di valutare l'economicità del processo, nonché di definire le condizioni operative più favorevoli.

La capacità di adsorbimento dei due gas da parte del carbone è funzione diretta della temperatura e della pressione: maggiori pressioni comportano un aumento della capacità di sequestro che invece diminuisce all'aumentare della temperatura. Per poter valutare a priori la capacità di adsorbimento/desorbimento di gas di

un corpo carbonifero e poterne, quindi, prevedere il comportamento a lungo termine, diventa di fondamentale importanza conoscere le caratteristiche del carbone: alcune influenzano positivamente la capacità di adsorbimento/desorbimento di gas, altre la influenzano negativamente.

A complicare ulteriormente il discorso contribuisce il fatto che il carbone, essendo composto da una varietà di minerali inorganici e da materiali di origine organica disposti nello spazio tridimensionale secondo modalità diverse a seconda della genesi del giacimento e della storia geologica e tettonica a cui è stato sottoposto, tende a modificare le sue caratteristiche, talvolta anche in maniera radicale, durante lo stesso processo di adsorbimento/ desorbimento.

Il tasso di assunzione della CO₂ da parte del carbone, e quindi le potenzialità di stoccaggio dell'intero serbatoio, è influenzato dalle proprietà del carbone quali: granulometria delle particelle del carbone; composizione macerale; rango; contenuto di umidità; pressione; temperatura.

Inoltre, la mobilità della CO₂ attraverso gli strati di carbone dipende sia dalla permeabilità in grande dello strato stesso (flusso secondo Darcy) sia dalla permeabilità intrinseca della matrice carboniosa (diffusione secondo Fick).

La capacità di ritenzione del gas di uno strato di carbone può essere stimata:

- con metodi diretti che consentono la misura della reale quantità di gas rilasciata da un certo volume di carbone all'interno di un contenitore sigillato;
- in alternativa, o ad integrazione delle informazioni ottenute con esperimenti diretti, con metodi indiretti che, attraverso opportune prove di laboratorio su campioni di carbone, consentono la costruzione delle isoterme di adsorbimento/desorbimento.

Le isoterme di adsorbimento sono delle particolari curve che, esprimendo la quantità di gas adsorbita in funzione della pressione ed a temperatura costante, esprimono la capacità di sequestro di un determinato reservoir. Tali curve possono essere ottenute con diversi metodi, tra i quali:

- metodo gravimetrico: con il metodo gravimetrico si misura l'adsorbimento osservando i cambiamenti di peso con una microbilancia;
- metodo monometrico (volumetrico): si calcola la quantità di CO₂ adsorbito attraverso l'equazione dei gas reali in cui compare il fattore di compressione dei gas (Z) calcolata per ogni pressione di equilibrio, ottenendo una curva o isoterma di adsorbimento:
- metodo e cromatografico: l'isoterma di adsorbimento può essere ottenuta dalla curva di spiazzamento del gas.

La quantità di gas che può essere estratta da un campione solido dipende dalla massa del materiale, dalla temperatura, dalla pressione e dalla natura del solido e del gas.

La procedura operativa seguita per la definizione delle isoterme di adsorbimento (Figura 92) è relativamente semplice e consta delle seguenti fasi:

- 1. inserimento del campione (40 g di Sulcis -0.212) all'interno della sample cell;
- regolazione della temperatura interna allo strumento (per le prove effettuate si è deciso di lavorare fissando la temperatura a 60°C);
- caricamento della reference cell di volta in volta con una pressione maggiore di quella necessaria per il completamento del corrente step di adsorbimento;
- apertura della valvola di comunicazione tra reference cell e sample cell in maniera da consentire l'equilibramento della pressione tra le due celle;

Figura 92. Apparecchiatura utilizzata per la determinazione delle isoterme di adsorbimento della CO₂

- 5. chiusura della valvola di comunicazione tra le due celle e monitoraggio dei valori di pressione fino al raggiungimento di un valore per cui la pressione non decresce per più di 30 minuti (indice convenzionale del terminato adsorbimento);
- 6. ripetizione delle fasi 4. e 5. fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio tra le due celle;
- 7. misura dell'isoterma di desorbimento (se desiderata);
- 8. interpretazione matematica dei dati mediante l'equazione Soave-Redlich-Kwong per i gas reali in condizioni critiche.

F. Analisi prestazionale di un sistema unico di generazione elettrica con tecnologie CCS

con l'ausilio di software di progettazione impiantisca ed analisi termodinamica di tipo commerciale, si è dato corso allo sviluppo di modelli teorici e simulazioni numeriche di un unico sistema di generazione elettrica equipaggiato con cattura e stoccaggio della CO₂. Sono state effettuate delle valutazioni preliminari per l'individuazione della taglia e della tecnologia più opportuna per una realizzazione di impianto considerando anche l'integrazione di sistemi di produzione di combustibili di opportunità sia liquidi che gassosi andando ad investigare in particolare la tecnologia di liquefazione del carbone per via indiretta, che si basa sulla gassificazione e sulla sintesi di Fisher Tropsch (FT).

Con l'obiettivo di effettuare un confronto tra le due tecnologie CCS più promettenti per un utilizzo negli impianti di potenza, sono state analizzate le due tipologie di impianto basate sulla combustione (impianto a vapore con ciclo supercritico basato su caldaia a polverino) e sulla gassificazione del carbone (impianto di gassificazione integrata in ciclo combinato turbogas e vapore) con l'integrazione di sistemi di cattura e stoccaggio della CO₂. Tali tecnologie sono già state sviluppate in impianti pilota e dimostrativi, sia nel caso di impianto a combustione che nel caso di impianti di gassificazione. Nel primo caso la cattura avviene sui fumi uscenti dalla caldaia (post-combustione), nel secondo caso sul syngas, ovvero tra la gassificazione e la camera di combustione (pre-combustione).

Nel confronto tra le due tecnologie viene valutata l'introduzione della cattura CO₂, con le implicazioni che questa comporta sulle prestazioni generali dell'impianto, sulle modifiche a livello impiantistico e infine sulla composizione dei fumi in uscita.

Per quanto riguarda la combustione, è stato studiato un impianto termoelettrico che opera in modalità supercritica ed è alimentato a polverino di carbone. Per simulare la cattura CO₂, di solito non prevista negli impianti reali, è stata aggiunta in retrofitting la sezione di de-carbonizzazione con efficienza 80% realizzata tramite processo chimico (solvente: ammine tipo MEA).

La gassificazione è stata integrata in un impianto combinato a vapore tipo IGCC; l'impianto così ottenuto è stato studiato con assenza di cattura di anidride carbonica, con cattura semplice all'80 e al 90%, con cattura combinata CO₂ - H₂S, al 70, 75, 80 e 85% (la co-cattura è ottenuta eliminando la sezione di recupero dello zolfo solido elementare). Negli impianti in cui è presente, la cattura è ottenuta tramite processo fisico Selexol. Gli impianti IGCC studiati sono dimensionati in modo da avere la stessa portata di carbone in ingresso dell'impianto a combustione; tale dato comune costituisce la base per il confronto.

Tutti gli impianti menzionati sono stati elaborati tramite software di calcolo ChemCAD, il quale, attraverso una banca dati di migliaia di composti chimici e pochi semplici blocchi operativi, consente di simulare qualsiasi tipo di trasformazione chimica o termodinamica. I risultati delle analisi hanno consentito di valutare l'aspetto prestazionale degli impianti (potenze, rendimenti) e l'aspetto ambientale (inquinanti e CO₂). Attraverso il confronto con dati di letteratura è stata verificata la validità teorica dei valori ottenuti. L'ultimo passo del confronto tra le due tecnologie è nell'aspetto economico, valutato attraverso un'analisi preliminare, che aggiunge alle considerazioni tecniche una discriminante decisiva sulle scelte di mercato. Una sintesi dei risultati è riportata in Tabella 12.

Tabella 12. Parametri prestazionali, ambientali e economici degli impianti studiati (*co-cattura)

			SC		IG	СС	
			80%	80%	70%*	80%*	90%
	MW	base	666	659			
Potenza netta	MW	con cattura	452	529	606	591	509
	%	variazione	-32,1	-19,7	-8	-10,3	-22,8
	%	base	44		42	2.1	
Efficienza	%	con cattura	29,9	31,3	40,1	39,1	29,8
	%	variazione	-32,0	-25,7	-4,8	-7,1	-29,2
	kg/MWh	base	883	881			
Emissioni CO ₂	kg/MWh	con cattura	263	223	287	192	131
	%	variazione	-70,2	-74,7	-67,4	-78,2	-85.1
	€/kW	base	1250		14	80	
Sosto investimento	€/kW	con cattura	2300	2000	1570	1600	2075
investimento	%	variazione	84	35,1	6,1	8,1	40,2
	c€/kWh	base	3,791	4,482			
COE	c€/kWh	con cattura	7,4	6,66	5,413	5,65	7,109
	%	variazione	95,2	48,6	20,8	26,1	58,6
Mitigation cost	€/tonCO ₂		58,2	33,1	15,7	16,9	35

Partendo da una base comune di 200 tonnellate/ora dello stesso tipo di carbone si ottengono i diversi valori di potenza netta, rendimento netto, emissioni specifiche di CO₂, costo nominale dell'investimento, costo dell'unità di energia prodotta (COE) e costo della tonnellata di CO₂ evitata (MC). In tabella sono riportate inoltre le variazioni rispetto al caso base (senza cattura).

Analizzando gli impianti base, si nota come l'impianto supercritico riesca a sfruttare in modo più efficiente la stessa quantità di combustibile in ingresso e a produrre l'unità di energia ad un costo inferiore del 18,2% rispetto all'IGCC. Inoltre anche il costo nominale dell'investimento è a favore dell'impianto a combustione. Questi tre dati oggettivi permettono di affermare che, in assenza di cattura CO₂, un impianto di potenza di grandi dimensioni SC è preferibile all'IGCC. Questa scelta è supportata da diverse altre considerazioni, come il livello di consolidamento della tecnologia, i tempi di realizzazione e la complessità dell'impianto, i maggiori costi di gestione e monitoraggio introdotti dalla gassificazione (rappresenta un passaggio in più nella trasformazione del carbone in fumo finale). Dalla parte dell'IGCC si deve considerare un miglioramento nelle emissioni di inquinanti, in particolare polveri e monossido di carbonio, dovuto al trattamento del syngas e dalla sua combustione. In entrambi gli impianti tali emissioni rimangono comunque inferiori ai limiti previsti dalla normativa; per quanto riguarda l'emissione specifica di CO₂ i valori ottenuti sono simili. Il netto vantaggio dell'impianto SC viene livellato qualora si introduce la cattura di CO₂ .

Nell'impianto supercritico la de-carbonizzazione con efficienza 80% riduce il rendimento di 14,1 punti (-32%), mentre la stessa rimozione provoca nell'IGCC un riduzione di 10,8 punti (-25,7%). Il motivo di questa differenza è spiegabile dal fatto che nel primo caso (SC) la sezione aggiuntiva si trova a valle della combustione, quindi dopo l'immissione di una grande quantità di aria comburente che aumenta la portata di fumo da trattare. Nel secondo caso la de-carbonizzazione è applicata al solo syngas, prima che questo arrivi in camera di combustione, quindi la portata risulta limitata. Inoltre nel syngas la CO₂ risulta avere concentrazioni maggiori rispetto al fumo a valle della combustione (contiene azoto per oltre il 70%), favorendo l'efficienza di rimozione. Altro punto a favore dell'IGCC è la possibilità di operare in pressione, condizione che facilita la cattura e rende meno dispendiosa la rigenerazione.

Nell'ambito delle tecnologie CCS, le cosiddette Coal To Liquids technologies o CTL, consentono la poligenerazione, ossia la produzione di combustibili liquidi e di altre tipologie di vettori energetici, oltre alla parallela cattura della CO₂. Il processo globale è abbastanza complesso, con più possibili configurazioni impiantistiche, e richiede quindi un'attenta analisi di sistema sia impiantistica che di fattibilità economica. A tal riguardo è stato condotta presso ENEA un'attività che si è articolata su due filoni relativi a:

- uno studio di valutazione dello stato dell'arte attuale delle tecnologie di liquefazione del carbone con l'obiettivo di fare una prima valutazione sull'effettiva possibilità di pervenire ad un'applicazione reale nel contesto italiano;
- un'analisi di sistema, effettuata con la finalità di delineare l'architettura di una piattaforma pilota da realizzarsi nell'area del Sulcis, con l'obiettivo di sviluppare e dimostrare l'applicabilità di queste tecnologie per l'impiego pulito del carbone e per la produzione di combustibili liquidi, idrogeno ed energia elettrica ad emissioni quasi zero. I tempi di realizzazione si possono stimare in 3 anni dall'inizio delle attività, a cui occorre aggiungere un anno di messa a punto ed un ulteriore anno per una prima fase dei test sperimentali.

I processi CTL si suddividono in più tecnologie che ha partire dal carbone portano alla produzione di combustibili liquidi (Figura 93). Vi sono due principali modalità di conversione del carbone: la liquefazione diretta, (DCL, Direct Coal Liquefaction) e quella indiretta (ICL, Indirect Coal Liquefaction).

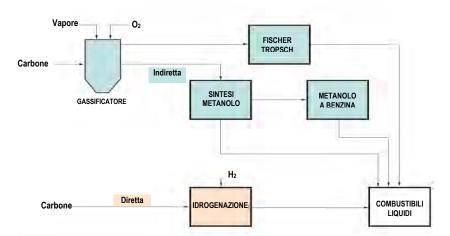


Figura 93. Le principali alternative di produzione di combustibili liquidi a partire dal carbone

Nel processo DCL il carbone polverizzato viene gassificato ad alta pressione e temperatura con un solvente costituito da uno slurry di olio, in presenza di idrogeno, la complessa struttura molecolare del carbone viene così rotta in composti idrocarburici a catena corta che vanno a costituire i prodotti liquidi del processo. Nel processo ICL il carbone viene gassificato per produrre un syngas costituito principalmente da CO e H₂, principali reagenti delle reazioni di produzione dei combustibili liquidi.

I prodotti che si possono ottenere a valle del processo ICL sono i seguenti:

- la sintesi di FT da cui si ottengono i principali combustibili liquidi quali diesel e benzine;
- la sintesi del metanolo per ottenere come principale prodotto benzina e metanolo.

Un ulteriore prodotto di interesse commerciale sul quale recentemente si sta focalizzando l'attenzione è la produzione del dimetiletere DME a partire dal metanolo.

In particolare il processo basato sulla sintesi di Fischer Trospsh si può suddividere nel suo insieme in più blocchi impiantistici:

- sezione di pretrattamento del combustibile, di gassificazione, di clean up (AGR) e di shift;
- la sezione di sintesi Fischer Trospsch;
- la sezione di raffinazione del prodotto grezzo e di recupero degli idrocarburi più leggeri (tail gas) upgrading mediante processi di hydrocracking, isomerizzazione e idrogenazione;
- la sezione di potenza-

Le configurazioni dell'intero processo si suddividono a seconda del tipo di prodotto finale che si vuole ottenere, prevedendo, nel caso si voglia massimizzare la resa in prodotti liquidi un ricircolo nella sezione di sintesi di Fischer Trospch dei gas non reagiti o, nel caso si voglia ottenere sia energia elettrica che prodotti liquidi, il loro utilizzo in un ciclo di potenza.

Nel primo caso, i gas non reagiti vengono ricircolati al reattore dopo essere stati riconvertiti mediante un ATR (Auto Thermal Reformer) in CO e H_2 . Nella configurazione senza ricircolo l'impianto viene anche definito Once-Through FT (Figura 94). La produzione media di un impianto è stimata pari a 3 bbl/d di prodotti liquidi a partire da una tonnellata al giorno di carbone su base secca, ossia si consumano circa $^{\sim}8-9$ GJ di carbone per barile di petrolio (bbl) prodotto.

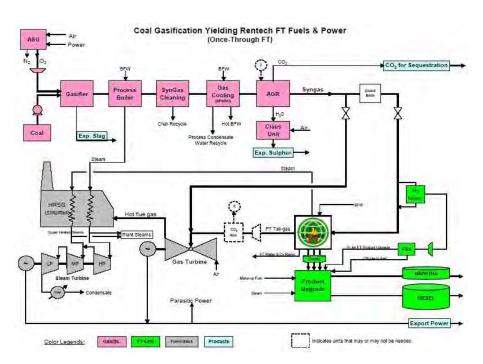


Figura 94. Schema a blocchi del processo Fischer Trospch con configurazione Once-Through

Presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Pisa è stato sviluppato un modello matematico teso a simulare il comportamento dinamico e stazionario di un gassificatore a letto fisso updraft (Figura 95), ovvero a flusso controcorrente, alimentato a carbone.

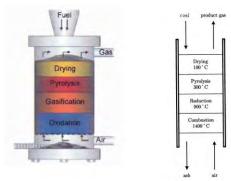


Figura 95. Schema di un gassificatore updraft e relativo profilo termico

In generale si evidenziano le diverse zone di reazione presenti lungo il reattore date dalle zone di essiccamento, di volatilizzazione (pirolisi), gassificazione e combustione. Il carbone viene alimentato in continuo dall'alto del gassificatore e si muove verso il basso per gravità in controcorrente con la corrente gassosa che si muove dal basso verso l'alto.

I gas caldi prodotti nella zona di combustione e gassificazione scambiano calore con il solido più freddo in alto che scende lentamente, ha così inizio l'essiccamento e a seguire (sopra i 200°C), la devolatilizzazione con conseguente rilascio di vapor d'acqua e materia volatile, rispettivamente. Successivamente il char formatosi a seguito della pirolisi passa nella zona di gassificazione (sopra 700°C) dove reagisce con vapor d'acqua, CO₂ e H₂. Le reazioni endotermiche (solo la reazione con H₂ è leggermente esotermica) che avvengono in

tale zona producono monossido di carbonio, CO, e H₂. La differenza tra la zona di gassificazione e quella di combustione è dovuta all'assenza o presenza di O₂ libero. Reazioni di gassificazione/combustione avvengono simultaneamente nella cosiddetta zona di combustione. Anche i gas combustibili quali CO o H₂ possono reagire con l'O₂. Le reazioni fortemente esotermiche di combustione forniscono l'energia sufficiente a sostenere le reazioni endotermiche di gassificazione e di essiccamento.

L'agente gassificante comunemente utilizzato è aria con o senza vapore che, alimentata dal basso, attraversa la griglia e reagisce fino a completo consumo $dell'O_2$ con il solido che, provenendo dall'alto, ha completato l'essiccamento e la pirolisi ed è quindi costituito essenzialmente da char e ceneri. Il letto sopra la griglia raggiunge temperature superiori ai 1000° C. L'utilizzo di vapor d'acqua assieme all'aria serve per controllare la temperatura al fine di prevenire la fusione delle ceneri nella zona di combustione. Infine, le ceneri ed il char non reagito attraversano la griglia e si raccolgono sul fondo. I tempi di residenza del solido nelle diverse zone di reazione possono essere dell'ordine di ore, mentre quelli del gas sono di pochi secondi.

L'inventario delle principali assunzioni vede 9 componenti principali per la fase gas, ossigeno, azoto, vapor acqueo, anidride carbonica, idrogeno, monossido di carbonio, metano, idrogeno solforato, solfuro di carbonile, disolfuro di carbonio, tiofene e tar (CmHn). Le specie in fase gas vengono caratterizzate in termini di densità, velocità e temperatura del gas. Si assume che i composti in fase gas abbiano un comportamento di gas ideale. Per la fase solida vengono considerati 4 componenti: carbone privo di ceneri e umidità, umidità, ceneri e char. Le specie in fase solida sono caratterizzate da densità parziali, velocità e temperatura del solido. Vengono redatte le equazioni di bilancio di massa e di energia utilizzate per descrivere i fenomeni considerati nel modello nonché le ipotesi modellistiche.

Per simulare il comportamento dinamico del gassificatore updraft il modello sviluppato è stato implementato su MATLAB utilizzando Simulink. Ciascuna cella è un sottosistema di Simulink che viene opportunamente accoppiato ad altri sottosistemi. Il modello è costituito da 20 celle ciascuna di 10 cm di altezza. Come risolutore delle equazioni differenziali viene usato il metodo ode23s con una tolleranza relativa di 10-3. A partire da uno stato iniziale (concentrazioni e temperature in entrambe le fasi) per ciascuna cella, il sistema risolve ciclicamente i bilanci materiali poi i bilanci termici.

Sempre nell'ambito della valutazione delle tecnologie CCS volte ad individuare un unico sistema di generazione elettrica con cattura e stoccaggio della CO₂ è stato implementato un portale tematico, disponibile in rete all'indirizzo http://www.zeroemission.enea.it/, che ospita tutta la documentazione fornita da ENEA e dai partner del progetto (Sotacarbo, Carbosulcis, Università di Roma La Sapienza - CERI, CO₂ Club, RSE, OGS, INGV).

E' stata ampliata l'offerta dell'attività di divulgazione anche attraverso la realizzazione e acquisizione di filmati video e attività di diffusione e formazione attraverso una sezione nel portale dedicata alla tematica CCS e CCT (Clean Coal Technologies). Sul portale sono approfondite le tematiche sulla cattura e stoccaggio della CO₂ (CCS), sulle Clean Coal Technologies (CCT), sull'efficienza energetica e sulla poligenerazione e generazione distribuita.

All'interno del portale "Ze (Zeroemission)" è stata creata anche una sezione dedicata alla formazione rivolta al mondo della scuola, agli enti locali, alle associazioni territoriali. In questa sezione, creata con l'obiettivo di rappresentare un trait d'union tra il mondo scientifico e il mondo formativo, sono stati inseriti: filmati, documenti, foto, link utili. E' stato realizzato inoltre un primo corso introduttivo/divulgativo erogabile in modalità e-learning attraverso la piattaforma ENEA-C@MPUS.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

In questa sezione vengono riportate le attività affidate a soggetti esterni a diverso titolo coinvolti, in questo caso rappresentati da Sotacarbo S.p.A. e da diversi Dipartimenti universitari.

SOTACARBO è una società di ricerca e sviluppo nel campo delle tecnologie di utilizzo pulito del carbone per la produzione di energia elettrica. La società dispone di un adeguato supporto logistico, di cui sta completando la realizzazione, per lo sviluppo delle attività sperimentali, consistente nel proprio Centro Ricerche sulle tecnologie di utilizzo carbone ed in una piattaforma pilota per la produzione di idrogeno e gas combustibili puliti da carbone mediante gassificazione. Le attività ad essa affidate riguardano essenzialmente la verifica di fattibilità teorica e sperimentale di operare con CO₂ come agente gasificante, la modellistica e la sperimentazione pratica su sistemi di desolforazione a caldo del syngas prodotto ed infine lo studio dello stoccaggio della CO₂ con tecniche ECBM applicate all'area del bacino minerario del Sulcis verso l'elaborazione di un unico sistema comprendente generazione elettrica e sequestro definitivo della CO₂.

Il coinvolgimento dell'Università di Cagliari è invece stato suggerito oltre che da motivazioni di ordine territoriale anche dalla collaborazione già operante ormai da più di decennio con la società partecipata Sotacarbo e l'ENEA stesso.

In particolare il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari, che in passato ha partecipato alla progettazione di processo della piattaforma pilota, è stato coinvolto su attività che vanno a concentrarsi sulla modellazione e sulla verifica di fattibilità di operare con solventi liquidi nella depurazione e decarbonizzazione del syngas. Ha operato principalmente sulla modellistica con codici commerciali basati sia su modellistica fluido dinamica numerica (CFD) che sull'analisi termodinamica. Su un secondo versante ha eseguito un'attività sperimentale di caratterizzazione e prova di processi di conversione del syngas tramite l'utilizzo della reazione di WGS con differenti catalizzatori.

Il Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Cagliari che nell'ambito di precedenti collaborazioni ha sviluppato modelli di simulazione di reattoristica chimica quale supporto alla definizione e progettazione di alcune sezioni della Piattaforma Pilota Sotacarbo, ha svolto attività relative allo sviluppo di temi riguardanti la cinetica dei sistemi di separazione e cattura della CO₂. Su un secondo versante si sono occupati della modellistica dei processi di rigenerazione dei solventi utilizzati nella cattura.

Data l'esperienza nello studio e nello sviluppo di materiali innovativi, nell'ambito degli impianti oggetto delle attività descritte è stato coinvolto il Dipartimento di Scienze Chimiche - Laboratori di Chimica Industriale e di Scienza dei Materiali dell'Università di Cagliari che oltre che vantare lunga esperienza nel campo dello studio dei materiali, è impegnato in collaborazioni con aziende operanti sul territorio del bacino minerario del Sulcis e partecipa con i suoi docenti e ricercatori all'attività didattica e di ricerca del corso di studi in Scienza dei Materiali con sede a Iglesias. In particolare si sono occupati di realizzare attività di sviluppo e caratterizzazione di sorbenti e catalizzatori da impiegare nei processi di trattamento del syngas proveniente dalla gassificazione del carbone.

Per gli aspetti più legati all'ingegneria mineraria e alle tematiche di confinamento il riferimento è stato invece il **Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari**, il suo contributo è risultato importante per via della lunga esperienza e profonda conoscenza delle caratteristiche geologiche del bacino carbonifero del Sulcis e del carbone Sulcis. Le attività di studio condotte nell'ambito del progetto hanno riguardato da un lato la disamina delle tecnologie di monitoraggio e controllo di bacini di stoccaggio della CO₂ e dall'altro la caratterizzazione e utilizzo di miscele slurry di carbone.

Per quanto riguarda aspetti specifici legati alla pulizia e al condizionamento del syngas è stato coinvolto il **Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Roma "La Sapienza"**. Le attività svolte sono relative al trattamento del syngas prodotto negli impianti di gassificazione con prove e test volti ad acquisire dati e competenze sul processo di pulizia, lavaggio, separazione e campionamento delle polveri e tar presenti nel syngas.

L'attività di ricerca condotta dal Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata si è concentrata sull'analisi e la caratterizzazione micro strutturale di materiali e sostanze quali idrocarburi condensati e polveri. In particolare il suo coinvolgimento ha consentito l'applicazione di tecniche speciali di analitica come la spettroscopia NMR particolarmente utile per lo studio e la determinazione delle composizione nei sottoprodotti solidi e liquidi della gassificazione del carbone.

Per quanto riguarda gli aspetti più legati allo stoccaggio sotterraneo della CO₂ è stato coinvolto il Centro di Ricerca, Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici (CERI) dell'Università di Roma "La Sapienza". Oggetto delle attività di studio presso il CERI sono state la predisposizione di una rete di monitoraggio geochimico, costituita da una batteria di centraline di misura delle concentrazioni di gas migranti dal sottosuolo, e una prima

valutazione degli aspetti socio-ambientali legati all'introduzione delle tecnologie CCS nell'area del bacino minerario del Sulcis.

Infine le attività svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Pisa, hanno riguardato la modellazione e la simulazione del comportamento del reattore di gassificazione del carbone generatore del gas di sintesi elemento cruciale per tutte le attività connesse al funzionamento degli impianti dotati di sistemi di cattura pre combustion.

Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno

Nell'attuale quadro energetico internazionale assumono particolare importanza le politiche e le iniziative volte alla sviluppo di tecnologie pulite del carbone, che consentano da un lato una maggiore differenziazione delle fonti energetiche, favorendo la transizione verso un più ampio ed articolato ricorso alle rinnovabili, dall'altro la messa a punto di tecnologie per la produzione da tale fonte di idrogeno ed energia elettrica ed aprire quindi la strada verso una possibile economia basata su questi due vettori energetici (elettricità e idrogeno).

L'Italia è fra i Paesi industrializzati che non hanno ancora adottato una strategia per lo sviluppo delle tecnologie CCS (Carbon Capture & Storage) per impianti di produzione di energia elettrica, eventualmente combinata con la produzione di idrogeno per usi diversi. Il contesto internazionale ci spinge a colmare questa lacuna con la messa a punto di un documento di "Vision" ed una "Road-Map" e l'avvio di un programma italiano per la dimostrazione di tali tecnologie.

Nel nostro Paese esistono le condizioni tecniche ed il know how necessario per avviare un programma nazionale coordinato con le iniziative europee ed internazionali. Molti progetti sono in corso o in fase di avvio, il tutto in un quadro di scarso coordinamento di cui si sente, peraltro, la forte necessità.

Il presente progetto è focalizzato sulle tecnologie che derivano da quella IGCC (Integrated Gasification Combined Cycles) e si basano su impianti di gassificazione del carbone che producono elettricità ed idrogeno con sequestro della CO₂. L'obiettivo è quello di favorire l'integrazione delle varie iniziative, in corso o in fase di avvio, in Italia al fine di consentire una più ampia ed efficace partecipazione del nostro Sistema-Paese ad importanti iniziative internazionali.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Nell'ambito del progetto sono previste azioni atte a sostenere le attività di ricerca avviate o in fase di definizione, in Italia, finalizzate allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie basate sull'impiego del carbone per la produzione combinata di idrogeno ed elettricità con livelli molto bassi - al limite nulli - di CO₂ e con una parallela sensibile riduzione delle emissioni di inquinanti e di particolato: ciò viene realizzato mediante l'effettuazione di studi e sperimentazioni su alcuni fenomeni e sottoprocessi di particolare interesse per l'industria nazionale e per il sistema industria/organismi di ricerca, in maniera complementare ed a completamento di attività in corso.

Nello specifico sono previste attività finalizzate a:

- definire una "Road-Map" per l'avvio di un programma italiano di dimostrazione delle tecnologie CCS associate ad impianti di produzione di energia elettrica ed idrogeno per usi diversi;
- sviluppare le attività di ricerca volte allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie basate sull'impiego del carbone per la produzione combinata di idrogeno ed elettricità;
- favorire una più ampia, autorevole e qualificata partecipazione del sistema italiano impresa/ricerca ai programmi ed iniziative europee ed internazionali quali CSLF, ZEP, HYPOGEN, FUTURGEN, IEA e Programmi FP7.

Nel corso del primo anno del progetto sono state completate le attività di studio preliminare sulla gassificazione del carbone e sui cicli termodinamici innovativi H_2 - O_2 . Sono state inoltre impostate le attività di studio sia teorico che sperimentali sul cleaning del syngas, in particolare sulla desolforazione, e sull'idrogassificazione del carbone; le attività proseguono nel secondo anno con la sperimentazione in laboratorio sull'idrogassificazione e sulla desolforazione ad alta temperatura ad opera di sorbenti a base di CaO.

Sono state Inoltre condotte attività di studio e sperimentazione in appoggio al ciclo innovativo Zecomix, in particolare sul ciclo $CaO-CaCO_3$ di separazione della CO_2 e sulla combustione dell'idrogeno ed è stato infine effettuato uno studio di fattibilità di un impianto dimostrativo pilota da 5 MWt.

Le attività del secondo anno sono articolate in 4 obiettivi intermedi.

A. Studi e sperimentazioni sulle fenomenologie di cleaning ad elevata temperatura del syngas prodotto da gassificazione innovativa del carbone

- sperimentazione in scala da laboratorio per lo studio di tecnologie di cleaning del syngas, con particolare riferimento alla desolforazione con dolomite e trattamento del tar da pirolisi del carbone Sulcis;
- sperimentazione in scala da laboratorio sulla reazione di idrogassificazione del carbone; vengono effettuate sperimentazioni su un reattore da laboratorio che consente alte pressioni (fino a 100 bar) e temperature (fino a 1000 °C) per approfondire le conoscenze di base sull'idrogassificazione del carbone, ossia la gassificazione con idrogeno con formazione di CH₄.

B. Studio di un impianto pilota associato a tecnologie CCS ad elevata efficienza

- progettazione di un impianto di idrogassificazione del carbone e decarbonatazione del syngas per produzione di idrogeno ed elettricità, della potenza termica di 5 MWt, con ciclo continuo di assorbimento della CO₂ e successiva rigenerazione del sorbente. Vengono dimensionati i componenti dell'impianto ed effettuata una stima dei costi per la sua realizzazione;
- sperimentazione sulla combustione di H₂ su impianto IDEA, prosegue la campagna di sperimentazione avviata nel corso del primo anno, che ha riguardato un bruciatore coassiale non "swirlato", su fiamme "swirlate" di tipo 1 (swirl < 0,5-0,6) e di tipo 2 (swirl >0,6);
- sperimentazione su mini-impianto di gassificazione da 5 kg/h, già realizzato nei laboratori della Casaccia, per studi sulla rimozione dell'H₂S e del tar utilizzando tecnologie innovative ad alta temperatura;
- progettazione e realizzazione di un reattore di gassificazione a letto fluido ad ossigeno con iniezione di sorbenti (CaO), per utilizzo con carboni poco nobili e relativa desolforazione; da allocarsi presso l'area sperimentale già allestita del Centro Ricerche ENEA Casaccia.

C. Studi su sistemi non convenzionali di separazione e stoccaggio della CO2 per la piccola/media taglia

Analisi dell'effettiva potenzialità di cattura e stoccaggio della CO₂ in impianti di produzione di energia di piccola/media taglia nell'intorno dei 20 MW termici, e quindi che possono potenzialmente rientrare o singolarmente o cumularmente nel caso di più impianti nello stesso sito nella direttiva sull'Emission Trading. In dettaglio erano previste:

- analisi ed ottimizzazione di una configurazione impiantistica di produzione di energia elettrica di piccola/media taglia con separazione e stoccaggio della CO₂ mediante utilizzo di cella a carbonati fusi MCFC come "concentratore" di CO₂;
- studio dell'utilizzo della CO₂ per l'inertizzazione di residui industriali;
- studio sulle potenzialità della Mineral Carbonation in impianti di piccola/media taglia.

D. Contributo alla definizione della Road-map tecnologica italiana sulle tecnologie zero emission da carbone. Attività di informazione tecnologica e divulgazione delle tecnologie rivolta sia al pubblico che alle imprese

L'obiettivo prevede:

- o lo studio delle problematiche di "public acceptance" delle tecnologie CCS;
- o la partecipazione all'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center";
- o la definizione ed aggiornamento di una road-map tecnologica italiana nel settore.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Studi e sperimentazioni sulle fenomenologie di cleaning ad elevata temperatura del syngas prodotto da gassificazione innovativa del carbone

L'attività, svolta interamente presso i laboratori ENEA della Casaccia, ha riguardato prove sperimentali volte ad approfondire le conoscenze di base su tre tematiche fondamentali per un utilizzo efficiente ed a basso impatto ambientale del carbone, anche di bassa qualità come quello del Sulcis: la pirolisi, la desolforazione mediante sorbenti a base di dolomite e la gassificazione del carbone con idrogeno (idrogassificazione).

A.1 Sperimentazione in piccola scala per lo studio di tecnologie di cleaning del syngas

Sono state analizzati due processi legati al cleaning del syngas ad elevata temperatura, la desolforazione del syngas mediante sorbenti solidi a base di dolomite calcinata e la devolatilizzazione e pirolisi del carbone del Sulcis.

Per quanto riguarda la desolforazione del syngas con sorbenti solidi a base di dolomite calcinata, essa presenta e vantaggi sostanziali rispetto alle tecnologie di desolforazione normalmente studiate, la prima è quella di poter essere realizzata in concomitanza con la cattura della CO₂, essendo utilizzato lo stesso sorbente solido, la seconda di funzionare ad elevata temperatura (500-600 °C) e quindi di potere essere applicata alle stesse condizioni termiche del syngas in uscita al gassificatore, senza quindi dover ricorrere a bruschi raffreddamenti.

Quest'ultima caratteristica consente di poter prevedere l'utilizzo di tale sorbente anche all'interno del gassificatore stesso, così come effettivamente previsto nel gassificatore a letto fluido realizzato nell'ambito delle attività dell'obiettivo B del presente tema di ricerca.

Obiettivo del lavoro svolto è la determinazione dell'influenza della presenza dell'H₂S sulla capacità di assorbimento (carbonatazione) della dolomite. Tale influenza è stata analizzata in funzione dei diversi parametri che caratterizzano il processo e precisamente: la granulometria del sorbente, il numero di cicli carbonatazione/ calcinazione (che, a causa dell'effetto della sinterizzazione del sorbente, fa diminuire la capacità sorbente del materiale), la temperatura di "sulfidazione"³, ed infine il tempo di calcinazione.

Sono stati quindi determinate le costanti cinetiche della reazione di carbonatazione sia in presenza che in assenza di reazione di sulfidazione.

La Figura 96 mostra gli andamenti, nel tempo, della conversione del CaO in CaCO₃ sia in presenza che in assenza di sulfidazione e per varie granulometrie

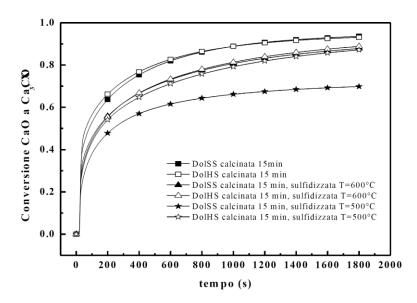


Figura 96. Effetto della presenza di zolfo sulla conversione della dolomite calcinata con due diverse granulometrie (DolSS: 0,4-0,6 mm, DolHS: 0,6-1,6 mm)

E' possibile rilevare un maggiore effetto della sulfidazione a 500 °C e con granulometria minore, piuttosto che a 600 °C e comunque con granulometrie maggiori. Le prime due curve in alto rappresentano la conversione in assenza di sulfidazione.

In Figura 97 vengono riportati gli andamenti della conversione in funzione del numero di cicli. Da rilevare, nel caso della dolomite sulfidizzata a 500 °C con granulometria minore un andamento della conversione crescente con il numero di cicli; ciò può spiegarsi con la presenza del CaS (risultato della sulfidazione) che, alla granulometria inferiore e quindi più sensibile agli effetti della sinterizzazione, agisce da elemento antiagglomerante migliorando la conversione.

 $^{^3}$ La reazione di sulfidazione converte l'ossido di calcio in CaS mediante le reazioni gas-solido: CaO+H $_2$ S \rightarrow CaS +H $_2$ O (reazione di sulfidazione indiretta) CaCO $_3$ +H $_2$ S \rightarrow CaS+H $_2$ O+CO $_2$ (reazione di sulfidazione diretta)

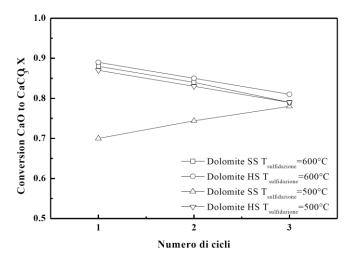


Figura 97. Andamento della conversione di CaO in funzione del numero di cicli

Il risultato principale ottenuto mediante la sperimentazione è di avere acquisito le necessarie informazioni per poter effettuare la progettazione di una sezione di assorbimento dell' H_2S e della CO_2 ad elevata temperatura utilizzando un sorbente solido rigenerabile per un numero sufficientemente elevato di cicli senza perdite rilevanti di rendimento.

Per quanto riguarda lo studio della devolatilizzazione e pirolisi del carbone del Sulcis, sono state effettuate una serie di campagne sperimentali sia di caratterizzazione del carbone sia di pirolisi, in diverse condizioni di velocità di riscaldamento e di temperatura, al fine di studiarne la cinetica e poter quindi controllare efficacemente il processo ai fini energetici.

In Figura 98 sono presentati i valori della derivata prima della perdita di peso nel tempo del campione sottoposto a diverse temperature ed a diverse velocità di riscaldamento. Si osserva come il picco di devolatilizzazione principale si ottiene tra 400 e 500 °C e che la velocità di devolatilizzazione aumenta con l'aumento della rampa di riscaldamento imposta al campione; vi è inoltre un leggero spostamento del massimo su temperature maggiori al crescere della velocità di riscaldamento.

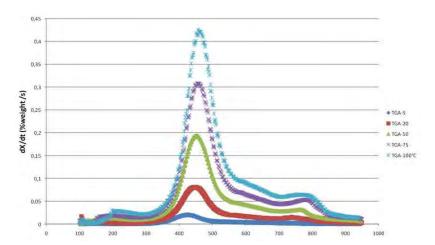


Figura 98. Velocità de devolatilizzazione (% peso/s) in funzione della temperatura (°C) per diversi tassi di riscaldamento

In realtà si notano tre picchi di devolatilizzazione. Il primo di lieve entità (perdite di peso inferiori al 2% per tutte le velocità considerate) si sviluppa subito dopo l'isoterma a 100°C tra i 150 ed i 200°C. Il secondo picco è il picco principale corrispondente ai fenomeni di pirolisi primaria. Il minimo va dai 419°C osservati a 5°C/min ai 452°C osservati a 100°C/min. La perdita di peso durante questa fase è la più consistente e va dal 27% circa a 5°C/min al 35% circa a 100°C/min. Il terzo picco ben evidente soprattutto alle alte velocità di scansione, si attesta su valori che vanno dai 690°C osservati a 5°C/min ai 752°C osservati a 100°C/min. Questo corrisponde verosimilmente ai

fenomeni di pirolisi secondaria o terziaria e vi è associata una perdita di peso di minore entità dal 3.5 % a 5°C/min al 6.49 % a 100°C/min.

La Tabella 13 riporta le perdite di peso relative ai picchi evidenziati ed i valori di Onset della devolatilizzazione principale che corrisponde alla temperatura ottenuta dall'intersezione delle tangenti alla curva della perdita di peso in corrispondenza dell'inizio del fenomeno e del flesso; tale temperatura è considerata per convenzione la temperatura a cui inizia il fenomeno.

Tabella 13. Perdita di peso relativa ai picchi di volatilizzazione e valori do Onset della devolatilizzazione principale
--

Velocita di pirolisi	Perdita di peso % Priino picco (T del flesso)	T°C di Onset devolatilizzazione principale	Perdita di peso % Secondo picco (T del flesso)	Perdita di peso % Terzo picco (T del flesso)
20°C/min	n. d.	390	29.26 (444°C)	5.24 (728°C)
50°C/min	2.03 (174°C)	397	32.43 (450°C)	4.21 (757°C)
750C/min	1.65 (179°C)	398	34.9 (452°C)	5.37 (768°C)
100°C/min	1.71 (181°C)	401	34.51 (452°C)	6.49 (752°C)

La Figura 99 mostra i dati ottenuti mediante un modello in fase di sviluppo sui volatili rilasciati (tar, CH₄, CO₂, CO, H₂O, C₂H₄, olefine e paraffine, H₂, H₂S, SO₂, COS, CS₂, NH₃ e HCN).

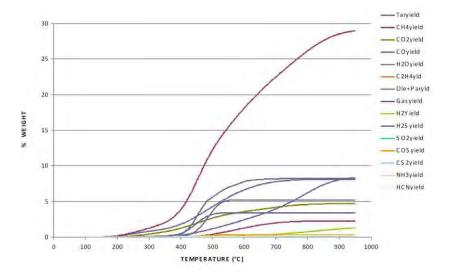


Figura 99. Volatili rilasciati in funzione della temperatura di pirolisi (50 °C/min)

A.2 Sperimentazione in piccola scala sull'idrogassificazione del carbone

Sono state effettuate le prime campagne sperimentali, in scala laboratorio, per caratterizzare la reazione di idrogassificazione del carbone e determinarne quindi le condizioni operative ottimali, considerando in particolare l'utilizzo del carbone del Sulcis.

L'idrogassificazione è un processo di decomposizione del carbone ad elevata pressione in atmosfera di idrogeno ed i prodotti sono costituiti da idrocarburi leggeri, in prevalenza da metano. La reazione principale che la caratterizza è la seguente:

$$C_{(s)} + 2H_2 \rightarrow CH_4$$
 $\Delta H^{\circ} = -74.77 \text{ kJ mol}^{-1}$

Tale reazione viene utilizzata nel ciclo Zecomix, in quanto, opportunamente accoppiata con il processo di decarbonatazione ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi (dolomite calcinata), permette di ottenere syngas a base di idrogeno in maniera molto efficiente sia dal punto di vista energetico che di trattamento per il necessario cleaning.

Nel grafico di Figura 100 vengono riportati i valori della conversione di carbone (char con 27% di cenere) ottenuti in corrente di idrogeno in funzione della pressione di funzionamento. Sono stati analizzati due tipologie di carbone diverse: carbone Sulcis (C=60%; S=6.8%; N=1.0%) e un carbone russo (C=84%; S=0.6%; N=1.0%).

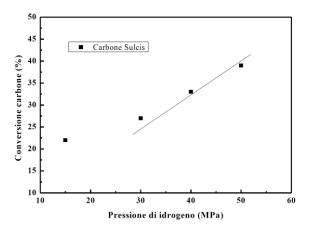


Figura 100. Andamento della conversione del carbone in ambiente di idrogeno, in funzione della pressione

La conferma della produzione di metano a seguito della reazione del carbonio con l'idrogeno si ha dalla lettura del grafico seguente (Figura 101) in cui è possibile rilevare con molta evidenza i picchi caratteristici del metano con una piccola produzione di ammoniaca dovuta alla presenza nel carbone di una percentuale seppur limitata di azoto.

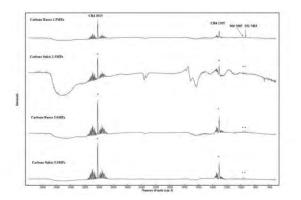


Figura 101. Spettro FTR del gas ottenuto durante la reazione di idrogassificazione a 800 °C e due diverse pressioni (carbone Sulcis e carbone russo)

I risultati ottenuti hanno evidenziato due aspetti fondamentali: si è confermata la buona resa, in termini di cinetica, della reazione a pressioni maggiori di 30 bar ed alla temperatura di 800 °C; l'attività ha permesso di determinare la costante cinetica della reazione a varie pressioni operative. si è evidenziata un'ottima reattività del carbone del Sulcis pirolizzato, ossia privato della componente volatile che ne avrebbe alterato i risultati sperimentali. Tale reattività è stata infatti confrontata con quella presentata da un carbone estero commerciale (russo) ed è risultata più elevata a causa, probabilmente, della presenza nel char di minerali che agiscono da catalizzatori della reazione (carbonati, ossidi ed altri).

In conclusione delle tematiche affrontate all'interno dell'obiettivo A, quelle relative alla desolforazione con sorbenti ed alla idrogassificazione del carbone, erano state impostate durante la prima annualità mentre l'attività di pirolisi è stata impostata ed eseguita nel corso della seconda annualità.

L'attività sulla desolforazione mediante sorbenti solidi ha dimostrato che, mentre da un lato la presenza dei composti solforati (principalmente H_2S) nel syngas penalizza l'efficienza dell'assorbimento della CO_2 da parte del sorbente solido a base di dolomite, in quanto essi stessi reagiscono con il sorbente neutralizzandone quindi l'effetto, dall'altra è possibile progettare una configurazione di processo tale da utilizzare lo stesso sorbente sia per la decarbonatazione che per la desolforazione.

I test hanno inoltre fornito le necessarie indicazioni su come configurare un possibile dispositivo per effettuare entrambi i processi in linea e procedere alla rigenerazione del sorbente separando i composti solforati che, fortunatamente, risultano chimicamente stabili e quindi possono essere eliminati dal ciclo procedendo ad un graduale e previsto rinnovo di sorbente ormai esaurito con sorbente fresco.

Si prevede di proseguire l'indagine nel corso delle prossima annualità, con lo studio sperimentale di una configurazione di processo di decarbonatazione e concomitante desolforazione del syngas.

L'attività sulla devolatilizzazione e la pirolisi del carbone Sulcis ha permesso di acquisire i dati sulla cinetica della reazione e di testare positivamente un modello di calcolo per poter caratterizzare il processo anche in condizioni non riproducibili in laboratorio. L'obiettivo futuro, possibile tematica della prossima annualità, è quello di mettere a punto una configurazione di processo, alternativa alla gassificazione in letto fluido convenzionale, che sfrutti in maniera più efficace l'elevato contenuto di volatili del carbone del Sulcis ed in particolare il contenuto energetico dei tar presenti, e nel contempo utilizzare il char residuo in modo più ottimale.

Sempre in questa ottica, di ricerca di soluzioni avanzate per la gassificazione di carboni difficili come quello del Sulcis, si è intrapresa l'attività sperimentale sull'idrogassificazione, identificandone con esattezza i range operativi ottimali. Le attività anche in questo caso hanno avuto esito molto positivo e possono considerarsi, almeno per la fase in scala laboratorio, concluse.

B. Studio di un impianto pilota associato a tecnologie CCS ad elevata efficienza

L'obiettivo è finalizzato alla determinazione delle caratteristiche progettuali di un impianto pilota (di taglia approssimativa di 5 MWt) che utilizzi il processo Zecomix come tecnologia CCS.

Si tratta di una attività complessa che prevede sia attività di laboratorio ed impiantistiche presso ENEA, sia attività di studio e progettuali da affidare a terzi (Università dell'Aquila) sia infine attività di realizzazione di componenti complessi per la sperimentazione su scala pilota.

Il filo conduttore è rappresentato dall'ottenimento dell'insieme di dati ed elementi necessari per passare da una fase di sperimentazione sulle singole fenomenologie in scala laboratorio ad una fase di fattibilità impiantistica di una configurazione CCS innovativa ad elevata efficienza basata sul ciclo Zecomix.

B.1 Test di laboratorio per lo studio del processo di assorbimento/rigenerazione della dolomite calcinata a regime

L'attività costituisce il proseguimento di quella effettuate nel primo anno, che si era fermata al 4° ciclo di rigenerazione del sorbente, spingendo lo studio fino a condizioni di regime ossia dopo un numero di cicli sufficientemente elevato da ritenere stabilizzate le condizioni di efficienza del processo di rigenerazione.

I test sperimentali sono stati condotti a diverse temperature di assorbimento e con diverse granulometrie del sorbente (dolomite calcinata). In Figura 102 viene riportato, a titolo di esempio, il grafico relativo ai valori di conversione del sorbente in funzione del numero di cicli, per un dato set di granulometria del sorbente.

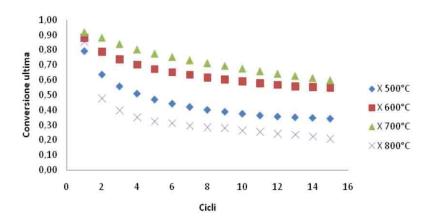


Figura 102. Andamento della conversione del sorbente al variare del numero di cicli

Considerato che la reazione di carbonatazione è la seguente:

$$CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow CaCO_{3(s)}$$

la conversione della dolomite è ottenuta come rapporto tra l'aumento in peso registrato dalla bilancia ed il massimo aumento in peso possibile, attraverso la formula:

$$X = \frac{M_{CaO} \Delta m}{f_{CaO} m_i M_{CO2}}$$

dove, in sostanza, il termine $\Delta m/M_{CO2}$ rappresenta le moli di CO_2 assorbite, mentre il termine $(f_{CaO}*m_i)/M_{CaO}$ rappresenta le moli di CaO ottenute nella prima calcinazione (ipotizzata completa) considerate uguali alle moli di CO_2 massime che il sistema può assorbire.

Il grafico mostra, il raggiungimento della stabilizzazione attorno al 15° ciclo, con valori di conversione attorno a 0,6-0,7 con una temperatura di circa 600 °C che si può considerare quindi come quella ottimale per la reazione.

B.2 Attività sperimentali con bruciatore H₂/O₂ su fiamme "swirlate"

È noto dalla letteratura, come la presenza di idrogeno in una miscela combustibile abbia ad agire pesantemente sulla reattività della stessa, e questa possa essere analiticamente evidenziata attraverso lo studio di due parametri: la velocità laminare di fiamma definita come $S_L = (-2 \ \alpha(\nu+1)V_{fuel}/\rho_u)^{1/2}$ dove il parametro α (diffusività) è indicato come $\alpha=K/\rho_uC_u$, mentre risultano $\nu=\nu$ viscosità cinematica e $\rho_u=\nu$ densità della miscela incombusta. La relazione di cui sopra da conto dell'aumento della velocità laminare di fiamma in relazione all'aumento della percentuale di idrogeno della miscela (diminuzione della densità e contemporaneo aumento della diffusività).

L'aumento della velocità di combustione ha evidenti effetti sulla configurazione e tipologia del combustore, determinando problemi di flashback che rendono ad esempio improponibile o per lo meno problematica la proposizione di bruciatori a fiamma premiscelata.

Esperienze condotte sull'impianto IDEA, che può essere alimentato indifferentemente da gas naturale, idrogeno, o miscele di questi, condotte su di un bruciatore di tipo diffusivo con Fattore di Swirl pari a 0,6, hanno messo in luce quantitativamente l'effetto di un incremento di percentuale di idrogeno sul parametro S_L . Il grafico di Figura 103 mostra come miscele ricche di idrogeno (fino ad idrogeno puro) possano risultare relativamente controllabili solo agendo sul fattore "lambda" cioè sull'eccesso di comburente (nel caso specifico aria) e l'incremento della velocità di combustione sia contenuto solo a patto di utilizzare fattori lambda 2.

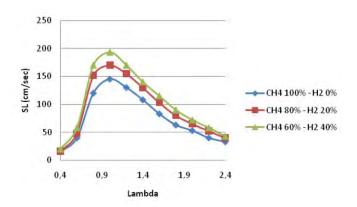


Figura 103. Effetto della percentuale di idrogeno sulla velocità di fiamma in relazione alla diluizione della stessa (T_{air}= 400 °C, P= 1 atm, Swirl=0,6)

Per inciso i valori di S_L mostrati in figura sono stati ottenuti attraverso l'applicazione di una metodologia sperimentale basata su analisi PIV (particle image velocimetry) del fronte di fiamma laminare, messa a punto presso i laboratori ENEA (Figura 104).

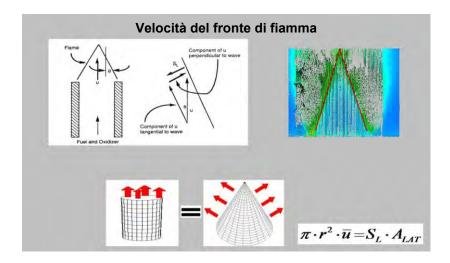


Figura 104. Metodo sperimentale per il calcolo della velocità laminare di fiamma

Altro elemento estremamente rilevante dell'impiego di miscele ricche di idrogeno è l'allargamento del range operativo (limiti di stabilità). Questo risultato, già atteso in considerazione dell'allargamento dei limiti di infiammabilità (Figura 105), risulta quantitativamente caratterizzato da misure, sempre effettuate su impianto IDEA, dalle quali risulta in maniera molto evidente l'allargamento del range di stabilità della fiamma all'aumentare della percentuale di idrogeno. La Figura 106 riporta in ascisse il rapporto di equivalenza ed in ordinate il rapporto tra la velocità del comburente, direttamente relazionata

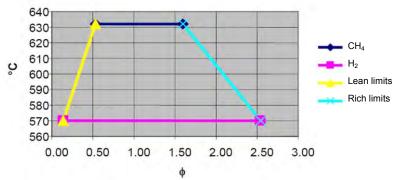


Figura 105. Limiti di infiammabilità (cortesia ENEL)

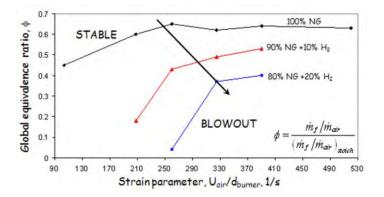


Figura 106. Effetto dell'incremento di percentuale di idrogeno sulla stabilità di fiamma

Dalla figura si evince come il bruciatore possa operare con rapporti di equivalenza molto bassi allorché la percentuale di idrogeno si fa significativa.

In conclusione possiamo affermare con dati quantitativi che la crescente concentrazione di idrogeno:

- ha effetti stabilizzanti sulla combustione; ciò implica una minore esigenza di fiamma pilota, che si traduce in minori emissioni di NOx;
- la fiamma è tecnologicamente controllabile a patto di realizzare condizioni di forte diluizione,
- condizioni di forte diluizione si traducono in minori emissioni di NOx rispetto a fiamme stechiometriche;
- con fiamme premiscelate si riducono significativamente i margini di controllo per il "flashback".

B.3 <u>Studio di fattibilità e progetto di massima di una configurazione di impianto in scala pilota per la produzione</u> di idrogeno e cattura della CO₂ mediante tecnologia Zecomix, funzionante in continuo

L'attività ha come obiettivo la definizione di una configurazione impiantistica che, sulla base anche dei risultati ottenuti a livello di prove di laboratorio, risulti idonea a realizzare la decarbonatazione del syngas mediante sorbenti solidi ad elevata temperatura ed in continuo, ossia con un numero di cicli indefinito di processi di assorbimento/rigenerazione della dolomite calcinata uscente dal reattore di idrogassificazione Il lavoro è stato svolto con la stretta collaborazione del Dipartimento di Chimica dell'Università dell'Aquila. Una soluzione impiantistica atta a realizzare tale scenario è mostrata in Figura 107.

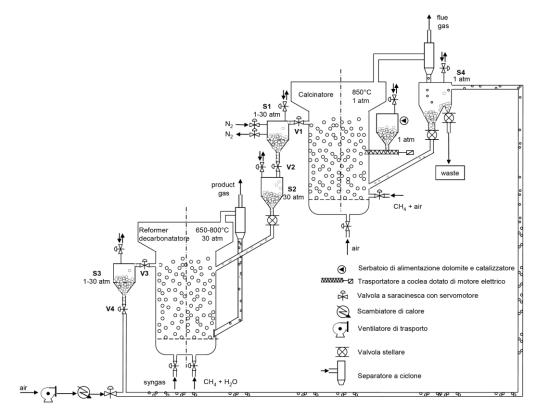


Figura 107. Una possibile configurazione impiantistica per la realizzazione del ciclo Zecomix in continuo

Con riferimento alla figura, l'alimentazione del sorbente (dolomite) e del catalizzatore avviene tramite l'apposito serbatoio posto al calcinatore, poiché questo reattore opera a pressione ambiente. Nel calcinatore viene rigenerato il sorbente, trasformando CaCO₃ in CaO alla temperatura di circa 850 °C; a tal fine viene introdotta nel reattore una corrente di metano ed aria, al di sopra del distributore del gas di fluidizzazione (aria), in modo che la combustione avvenga direttamente nel letto fluidizzato, evitando che il sistema di distribuzione del gas debba sopportare le elevate temperature di fiamma di questa miscela. L'aria utilizzata per la fluidizzazione consente di modulare le condizioni termiche nel reattore in modo da evitare temperature troppo elevate che possono provocare la sinterizzazione delle particelle ed il degrado delle pareti del reattore. Una volta calcinata, la dolomite viene captata a livello della superficie del letto nel reattore, e avviata ad un primo serbatoio di raccolta (S1).

Questo serbatoio, che è situato tra le due valvole a ghigliottina V1 e V2, in questa fase si trova alla stessa pressione del calcinatore (V1 aperta, V2 chiusa). Chiudendo la valvola V1, viene pressurizzato (alla pressione alla quale opera il reformer-decarbonatatore) e contemporaneamente la sua atmosfera viene inertizzata con azoto, in modo da evitare l'invio di aria al decarbonatatore. Una volta effettuate queste operazioni, si apre la valvola V2 e il materiale solido viene trasferito ad un secondo serbatoio (S2) che si trova sempre alla stessa pressione del decarbonatatore

(indicata come 30 atm). Richiusa la valvola V2, il serbatoio S1 viene quindi riportato a pressione atmosferica attraverso uno sfiato, e riaprendo la valvola V1 si torna alle condizioni di partenza. Il serbatoio S2 comunica con il carbonatatore/reformer attraverso una valvola stellare, tramite la quale il materiale viene inviato in continuo dal primo al secondo.

In questo reattore entrano già pressurizzate le correnti di syngas nonché di metano e vapore, e avviene la cattura di CO₂ simultaneamente alle reazioni di steam reforming e water-gas shift. È previsto un ciclone per la separazione del gas prodotto dai fini elutriati che ricircolano nel reattore tramite uno "stand pipe" alla cui estremità è montato un dispositivo che consente lo scarico delle particelle nel reattore, ma non l'ingresso del gas in direzione opposta. In questa sezione la dolomite viene ricarbonata, ed il catalizzatore si attiva riducendosi nell'atmosfera di reazione. Anche in questo caso, le particelle di solido circolante vengono captate alla superficie del letto fluidizzato e avviate al serbatoio S3, il cui funzionamento è concettualmente identico al serbatoio S1. Esso si trova però ad una pressione iniziale pari a quella del carbonatatore/reformer (V3 aperta, V4 chiusa). Chiudendo la valvola V3, si può depressurizzare S3 e quindi aprire la valvola V4, realizzando così la comunicazione con un sistema di ricircolo pneumatico dotato di scambiatore di calore per preriscaldare l'aria di trasporto, onde evitare il raffreddamento delle particelle circolanti. Tali particelle giungono quindi nel serbatoio R4, a pressione atmosferica, che raccoglie anche i fini separati dal ciclone posto in uscita dal calcinatore.

Il sistema descritto, sebbene i serbatoi di accumulo S1 ed S3 siano intermittenti, permette la circolazione del materiale del letto in continuo attraverso l'utilizzo delle rotocelle in uscita di S2 e S4.

Tale configurazione è stata simulata con due metodologie diverse, una basata sull'utilizzo del codice Chemcad all'equilibrio termochimico, e l'altra costituita dal metodo dei tre reattori in serie in cui vengono utilizzati i dati termochimici ottenuti sperimentalmente. La prima consente di simulare l'intero processo ed in particolare l'accoppiamento termodinamico tra i due reattori (calcinatore e carbonatatore/reformer) ma è poco preciso dal punto di vista termochimico, mentre la seconda è da quest'ultimo punto di vista, più rappresentativo della realtà e viene utilizzata per la modellizzazione del carbonatatore/reformer.

La Figura 108 riporta la frazione di CO₂ catturata rispetto al carbonio totale presente nel syngas in ingresso, in funzione di temperatura e pressione.

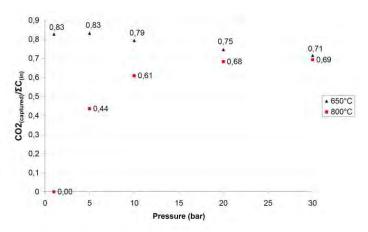


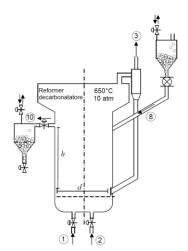
Figura 108. Frazione di CO₂ sul C totale presente in funzione della pressione e per due valori di temperatura

Le conclusioni dello studio effettuato possono essere così sintetizzate:

- la combinazione tra i dati termochimici e quelli termodinamici ci ha permesso di ottenere una forbice di risultati utili per la previsione di dati sperimentali in un impianto da 5 MW come illustrato in Figura 107;
- la scelta di operare a 30 bar, pur favorendo il sequestro della CO₂ da parte della dolomite (si nota un diminuzione della CO₂ che resta in fase gassosa all'aumentare della pressione), sfavorisce la reazione di steam reforming che avviene con aumento del numero di moli: pertanto è necessario alimentare una maggiore quantità di metano + vapore per garantire condizioni autotermiche di funzionamento;
- dai dati ottenuti si evince che pressioni molto elevate non sono consigliate per ottimizzare il processo proposto; tuttavia si possono raggiungere buone prestazioni fino a pressioni di 5-10 atm per entrambe le temperature di esercizio, condizioni compatibili con l'utilizzo di una turbina a gas a valle del decarbonatatore-reformer;

■ la frazione del carbonio alimentato che si trasforma in CO₂ e quindi in carbonato (carbonio separato per cattura da parte del sorbente), risulta maggiore in assoluto quando si opera a basse pressioni (minori di 10 atm) e 650°C.

Lo studio effettuato ha portato ad un primo dimensionamento del reattore di carbonatazione/reforming:



FLUIDI	1 (syngas)	2 (CH ₄ +H ₂ O)	3 (gas prodotto)
m ³ /h standard (0 °C. 1 atm)	216,43	1803,6	2284,5
m³/h effettivi (650 °C. 10 atm)	73,17	609,8	772,4
kmoli/h	9,7	80,5	101,9

SOLIDI	8	3
SOLIDI	dolomite calcinata	catalizzatore
kg/h	2590	
m ³ /h	1,9	1,1

LETTO REATTORE	dolomite	catalizzatore	h reattore	d reattore
kg	700	350		
m ³	0,33	0,3		
V tot letto fluidizzato (m³)	0,9			
m			1,37	1

Figura 109. Schema riassuntivo dei parametri calcolati nel dimensionamento del carbonatatore

B.4 <u>Proqetto e realizzazione di un gassificatore di carbone innovativo a letto fluido ad ossigeno per l'utilizzo pulito</u> del carbone del Sulcis (con pretrattamento interno dei prodotti dello zolfo)

Il gassificatore, ha lo scopo di produrre un syngas a base di CO e H₂ partendo da varie tipologie di carbone, anche ad alto contenuto di zolfo (carbone del Sulcis), e di effettuare una prima desolforazione preliminare prima dell'ingresso al reattore di carbonatazione/reforming dell'impianto Zecomix.

La realizzazione, che è stata effettuata dalla Società SO.IM.I. di Terni, ha interessato, oltre che il componente vero e proprio, anche il sistema di piping dei fluidi di processo in ingresso ed in uscita e la struttura metallica di supporto dell'assieme.

In Figura 110 vengono riportate la vista del gassificatore (lato alimentazione carbone), una vista dell'assieme struttura-gassificatore e la Figura 111 mostra lo schema di flusso del sistema complessivo.

E' attualmente in fase finale di progettazione il sistema di caricamento del carbone + sorbente dell'H₂S la sua realizzazione è prevista nella prossima annualità insieme all'allaccio alla struttura esistente dell'impianto Zecomix, che comprende il reattore di carbonatazione/reforming, nonché il sistema di raffreddamento e la torcia per lo smaltimento del syngas in atmosfera.

L'obiettivo principale del lavoro è stato quello di poter testare un gassificatore in grado di effettuare la produzione di un syngas con un contenuto di componenti solforati (H_2S principalmente) limitato, anche con l'utilizzo di carboni ricchi di zolfo come quello del Sulcis.

Ciò viene ottenuto mediante un accurato controllo delle condizioni termochimiche del letto fluido mantenuto mediante l'iniezione in vari punti del gassificatore di fluido gassificante con diversi rapporti vapore/ossigeno, oltre che con l'iniezione di sorbenti a base di dolomite i cui effetti assorbenti sull'H₂S si sono testati a livello di laboratorio.

Le attività relative alla sperimentazione del mini-impianto di gassificazione da 5 kg/h, concernente la rimozione del tar e dell'H₂S, per problemi di disponibilità dell'impianto stesso sono slittate alla successiva annualità, è stato infatti necessario riprogettare e realizzare il sistema di scarico delle ceneri.

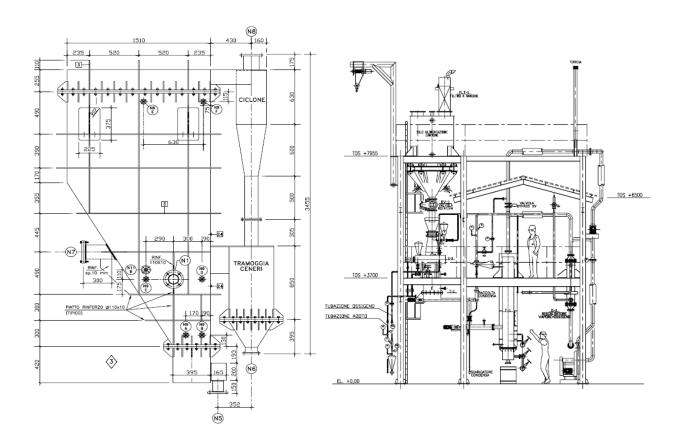


Figura 110. Vista gassificatore lato alimentazione carbone e vista d'assieme sistema struttura

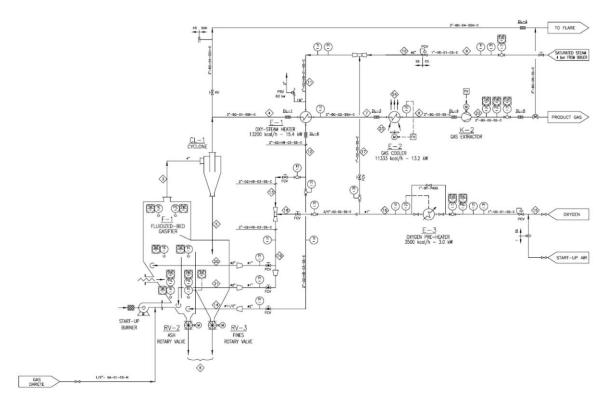


Figura 111. Schema di flusso del sistema di gassificazione

C. Studi su sistemi non convenzionali di separazione e stoccaggio della CO₂ per la piccola/media taglia

Sono stati svolte due attività distinte, una di analisi e dimensionamento di un impianto basato sull'utilizzo della cella a combustibile a carbonati fusi (MCFC) come "concentratore" di CO₂ allo scarico di una turbina a gas, l'altra in stretta collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Tor Vergata, per lo studio delle potenzialità della carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio dell'anidride carbonica.

C.1 <u>Utilizzo della cella MCFC come concentratore della CO</u>₂

E' noto che le tecnologie di cattura della CO₂ denominate post-combustion, ossia applicate sui fumi di combustione degli impianti termoelettrici sia a gas naturale (cicli combinati) sia a carbone (impianti USC), a fronte del vantaggio di essere più facilmente installabili anche negli impianti esistenti e di essere tecnologicamente maturi, hanno il grosso svantaggio di causare un'elevata penalizzazione energetica (dell'ordine dei 10 punti percentuali).

Tale penalizzazione è causata soprattutto dai bassi valori di concentrazione della CO₂ nei fumi che, nel caso delle turbine a gas, sono dell'ordine del 3-5% in moli. Ciò comporta elevati valori di portata di fumi da trattare e quindi, nel caso si utilizzino tecnologie basate su solventi amminici (tipicamente MEA in soluzione acquosa del 25%) maggiori portate di soluzione da rigenerare e conseguenti maggiori valori di potenza termica necessaria al rigeneratore.

La possibilità quindi di diminuire le portate da trattare aumentando nel contempo la concentrazione della CO₂ potrebbe ridimensionare molto gli oneri energetici della cattura oltre che consentire, come si evidenzierà nel seguito, di ampliare la gamma delle metodologie più idonee allo scopo.

In quest'ottica, le celle a combustibile a carbonati fusi (celle MCFC) possono in effetti essere utilizzate come ottimi "concentratori" di CO₂. Infatti il funzionamento delle MCFC richiede la continua formazione al catodo di ioni carbonato (CO₃²⁻), ottenuti facendo entrare nel comparto catodico un congruo quantitativo di anidride carbonica. Le reazioni elettrochimiche che avvengono sono le seguenti:

Reazione anodica $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^{-}$ Reazione catodica $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^{-} \rightarrow CO_3^{2-}$ Reazione globale $H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_{2,cat} \rightarrow H_2O + CO_{2,an}$

Generalmente, l'anidride carbonica si invia al catodo semplicemente incanalando i gas in uscita dal comparto anodico, ricchi di CO₂, verso l'ingresso del comparto catodico, facendo quindi ricircolare l'anidride carbonica prodotta all'anodo oppure effettuando un processo di combustione esterno in modo da generare anidride carbonica, se non si vuole adoperare un ricircolo o se la quantità dovuta al ricircolo stesso non è sufficiente.

In alternativa è possibile utilizzare, come sorgente di CO₂, i gas di combustione di un impianto a combustibili fossili ed in particolare i gas di scarico di una turbina a gas. Quest'ultimi si presentano particolarmente adatti per due motivi: perché hanno un alto grado di pulizia rispetto ai fumi di combustione di altri combustibili, soprattutto per quanto riguarda presenze di contaminanti quali composti dello zolfo, del cloro e particolati, ai quali le celle risultano particolarmente intolleranti; perché, essendo in questo caso la CO₂ molto più diluita, come già anticipato, ne deriva un vantaggio energetico molto più elevato, considerando che si passa da valori di concentrazioni dell'ordine del 4% a valori dell'ordine del 30% ed oltre.

Sulla base di dette considerazioni, è stata effettuata un'analisi di una configurazione impiantistica che realizza, mediante l'inserimento di una cella MCFC a valle di un impianto turbogas, la possibilità di ottenere da una parte una corrente con elevata concentrazione di CO_2 e dall'altra l'emissione al camino di fumi con una concentrazione molto inferiore di CO_2 .

Lo studio è stato effettuato mediante il codice di simulazione di processo IPSE-PRO, che consente di analizzare un dato processo energetico sulla base di una libreria di componenti di base a cui è possibile, mediante una sezione del codice dedicata, aggiungere ulteriori componenti definiti e opportunamente programmati dall'utilizzatore. A questo scopo è stato messo a punto ed aggiunto alla libreria del codice un modello di cella a combustibile a carbonati fusi.

La simulazione è stata effettuata considerando una microturbina da 500 kWe di tipo rigenerativo, opportunamente accoppiata con un modulo di cella MCFC da 500 kWe.

La figura 112 mostra lo schema di impianto simulato: si noti che lo scambiatore rigenerativo SR1 è stato inserito in modo da recuperare non più il calore di scarico della turbina, bensì il calore dello scarico catodico, che è costituito sostanzialmente dai fumi "decarbonizzati". E' importante agire invece sulla temperatura dello scarico della

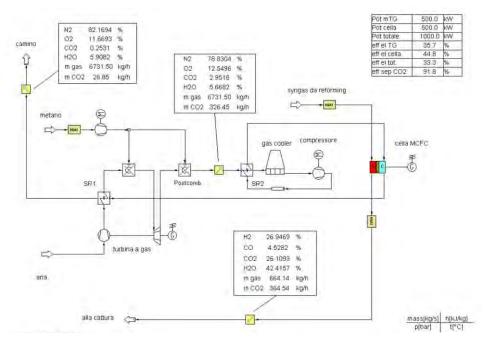


Figura 112. Schema di processo turbina a gas con concentratore a cella MCFC

turbina, tramite un post-combustore, per avere la possibilità di regolare opportunamente la temperatura di ingresso catodico della cella.

Naturalmente, è possibile considerare configurazioni con turbine di potenza più elevata, utilizzando più celle in parallelo. Per esempio, una turbina a gas da 2 MWe può essere accoppiata con 4 moduli da 500 kWe.

Un altro parametro importante per la scelta della configurazione impiantistica più idonea è la pressione di funzionamento della cella, alla luce del fatto che lo scarico della turbina a gas avviene generalmente ad una pressione vicina a quella atmosferica mentre la cella lavora comunemente in pressione. Infatti, la pressione di funzionamento della cella è dell'ordine di qualche bar (per la MCFC Ansaldo è 3,5 bar); questo comporta la necessità di raffreddare e comprimere il gas alla pressione di funzionamento della cella; è possibile in questo caso recuperare almeno in parte il calore di raffreddamento, restituendolo al gas stesso dopo la compressione mediante un secondo scambiatore rigenerativo (scambiatore SR2 di Figura 112).

La compressione del gas a 3,5 bar comporta una notevole perdita energetica e rappresenta sicuramente un punto critico del sistema. Il gas uscente dallo scambiatore SR2 può, a questo punto, alimentare il catodo della cella.

Come si vede, la cella elimina quasi del tutto la CO_2 dai gas di scarico della turbina a gas (ingresso catodo), concentrandola all'uscita anodica, in un flusso gassoso di portata 10 volte inferiore di quella uscente dalla turbina. Tale flusso peraltro, trattandosi del syngas in parte sfruttato all'interno della cella, contiene idrogeno ed una piccola parte di CO ed ha quindi un certo potere calorifico che può essere recuperato per ottimizzare il sistema.

La configurazione sopra descritta è riconducibile, a tutti gli effetti, ad un sistema ibrido turbina/cella di tipo "bottoming", ossia con la turbina a monte della cella e quest'ultima che cede calore all'aria compressa della TG.

Le tematiche da affrontare, per giungere ad una soluzione impiantistica ottimizzata dal punto di vista sia ingegneristico che energetico, sono legate essenzialmente ai seguenti punti: la pressione di funzionamento della cella: l'accoppiamento ideale gas turbina/cella, dal punto di vista sia delle potenze che delle temperature, ai fini di ottimizzare il funzionamento della cella; l'utilizzo della corrente di scarico anodico, che contiene sia la CO₂ concentrata che l'H₂ non reagito, ai fini sia della separazione della CO₂ che dello sfruttamento ottimale del suo potere calorifico.

Tali tematiche sono tra loro fortemente interdipendenti. Infatti, la necessità di lavorare con una pressione di cella di 3,5 bar comporta l'esigenza di ricomprimere il gas di scarico della turbine e questo comporta perdite energetiche troppo elevate, abbassando il rendimento del sistema complessivo a valori inferiori di quello dei singoli componenti. E' dunque opportuno, tra le varie possibilità, analizzare quella di fare lavorare la cella a pressioni inferiori.

Altra possibilità è quella di recuperare l'energia spesa nella compressione del gas utilizzando in modo opportuno l'energia residua dei gas anodici; nel caso simulato a titolo di esempio, in questo caso, la potenza elettrica del compressore è pari a 150 kW, mentre la potenza termica contenuta nei gas anodici ammonta a circa 670 kWt. Si potrebbe quindi ipotizzare di recuperare il quantitativo necessario di potenza elettrica, bruciando con ossigeno i gas ricchi di idrogeno dello scarico anodico ed espandendo successivamente i gas combusti. In tal modo peraltro si otterrebbe in uscita una gas composto esclusivamente da CO₂ e acqua, e quindi sarebbe già realizzata la separazione della CO₂.

C.2 <u>Studio delle potenzialità della carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio dell'anidride</u> carbonica

Questa parte dell'attività è stata sviluppata all'interno di una collaborazione con l'Università di Tor Vergata (UTV), Dipartimento di Ingegneria Civile, capofila di un gruppo di ricerca appositamente costituito e formato dalla stessa UTV, dall'Università La Sapienza (Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade) e dal Politecnico di Zurigo (ETH, Istituto di Ingegneria di Processo).

L'attività è stata articolata in tre fasi che hanno riguardato:

1. lo stato dell'arte e la selezione dei materiali più idonei; in quest'ambito è stato effettuato una review della letteratura riguardante il processo di carbonatazione minerale, un'analisi dei flussi e delle caratteristiche dei residui alcalini generati da processi industriali ed infine una review della letteratura riguardante la carbonatazione di residui alcalini.

Per quanto riguarda la *carbonatazione minerale*, molti sono le tipologie di minerali testati; i più promettenti dal punto di vista dell'applicabilità sono l'olivina, il serpentino e la Wollastonite, le cui reazioni di carbonatazione sono le seguenti.

Olivina $Mg_2SiO_4 + 2CO_2 \rightarrow 2MgCO_3 + SiO_2 + 89 \text{ kJ/mol } CO_2$

Serpentino $Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 3CO_2 \rightarrow 3MgCO_3 + 2SiO_2 + 2H_2O + 64 kJ/mol CO_2$

Wollastonite $CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2 + 90 \text{ kJ/mol CO}_2$

Il processo più efficiente è quello fatto avvenire in fase acquosa. Per l'olivina in questo caso si procede ad una fase di dissoluzione della CO_2 e dei silicati ed alla successiva fase di precipitazione dei carbonati. Il processo in fase acquosa può a sua volta avvenire a singolo stadio (la dissoluzione dei silicati e la precipitazione dei carbonati avvengono nello stesso reattore) o multistadio (le due reazioni vengono fatte avvenire in due reattori distinti adottando diverse condizioni operative).

Per quanto riguarda *la carbonatazione di residui alcalini*, i potenziali vantaggi rispetto alla carbonatazione di minerali sono rappresentati dall'utilizzo di materiali di scarto, talvolta disponibili presso gli stessi impianti di emissione di CO₂, dalla maggiore reattività a condizioni operative meno severe e dal minor fabbisogno energetico del processo, ed infine dal miglioramento del comportamento dei materiali dopo il trattamento.

Per contro è necessaria la disponibilità di flussi significativi di residui ed alte concentrazioni di Ca o Mg in forma di ossidi, idrossidi o silicati.

Nel caso dei residui alcalini, le tipologie di processo sono le seguenti:

- gas-solido: T elevate (> 350 °C), pCO₂ bassa (≤ 1 atm), adatto per residui caratterizzati da un alto contenuto di ossidi o idrossidi di calcio (ad es.: cenere volante);
- in fase acquosa;
- in slurry (L/S = 2-20 L/kg): T moderata (50<T<200 °C), pCO2 moderata (<20 atm);
- ad umido (L/S<0,5 L/kg):T bassa (20<T<50 °C), pCO₂ moderata (<20 atm);
- indiretto: processo in slurry con aggiunta di additivi.

I risultati dell'analisi effettuata sullo stato dell'arte si possono riassumere nei seguenti punti:

- ✓ il processo di carbonatazione di minerali a singolo stadio in fase acquosa risulta ancora il processo più investigato e per il quale sono disponibili il maggior numero di dati sperimentali (ad es: Gerdemann et al., 2007, Huijgen et al, 2005);
- ✓ dall'analisi di letteratura concernente la disponibilità e le caratteristiche chimico-fisiche dei residui industriali, i più interessanti a livello nazionale risultano i residui della produzione dell'acciaio;

- ✓ per questa specifica tipologia di residui, i processi di carbonatazione più indicati sono i processi in fase acquosa, i parametri chiave: granulometria e temperatura.
- 2. *la definizione delle condizioni operative e di modellazione*: si è proceduto alla definizione dello schema di processo e delle operazioni unitarie per il processo di carbonatazione minerale; si è poi effettuato uno studio sperimentale sulla carbonatazione di scorie di acciaieria.

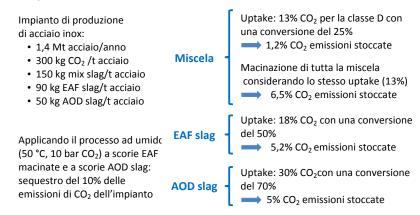
In particolare, per quanto riguarda il processo di carbonatazione minerale si è proceduto in quest'ordine:

- √ dall'analisi di letteratura sono stati estratti dati riguardanti il processo di carbonatazione in fase acquosa a singolo stadio relativi ai minerali: olivina, serpentino e wollastonite;
- ✓ sono stati definiti lo schema di processo e le operazioni unitarie necessarie per lo stoccaggio delle emissioni di CO₂ generate da un impianto di generazione di energia di media taglia (20 MW) alimentata a metano:
- √ è stato sviluppato un modello (in Excel) per calcolare i flussi di materia ed energia relativi ad ogni
 processo unitario considerato per ciascuno dei set di dati sperimentali analizzati.

Per quanto riguarda la carbonatazione di residui industriali, è stata effettuata una serie di prove sperimentali di carbonatazione accelerata di scorie di acciaieria, procedendo nel seguente modo:

- ✓ sono state selezionate tre tipologie di residui: EAF slag (scorie da forno ad arco elettrico), AOD slag (scorie di affinazione) ed una miscela delle varie tipologie di scorie prodotte nell'impianto. Tutte sono state dettagliatamente caratterizzate (granulometria, composizione, mineralogia, comportamento ambientale);
- ✓ sono stati eseguiti test di carbonatazione ad umido ed in slurry e sono stati analizzati la capacità di sequestro ed il rendimento di conversione dei residui;
- ✓ sono inoltre stati studiati gli effetti esercitati dal trattamento di carbonatazione sul comportamento ambientale dei residui.
- 3. *I bilanci di materia ed energia*: si è effettuata la valutazione delle potenzialità di applicazione di entrambe le tipologie di processi (carbonatazione minerale e dei residui alcalini) e delle possibilità di integrazione del processo di carbonatazione minerale con impianti di piccola/media taglia (20 MW).
 - E' stata valutata l'applicazione della tecnologia di carbonatazione dei residui al caso reale di una acciaieria ed è risultato che, è possibile sequestrare circa il 10% della CO₂ emessa dall'impianto, oltre che naturalmente ottenere una stabilizzazione del residuo prodotto. La percentuale di sequestro è incrementabile raccogliendo le scorie anche di altri impianti limitrofi.

Sequestro della CO₂ emessa da una acciaieria



Nel caso di impianto di produzione di energia a gas naturale da 20 MWt, che produce circa 1 kg/s di CO_2 , si rileva che le migliori condizioni di sequestro si ottengono mediante l'utilizzo di olivina, che è il minerale che richiede il minor consumo energetico (950 kWe, pari a circa il 13% della potenza elettrica prodotta dall'impianto nel caso che esso sia costituito da una turbina a gas) ed i minori volumi del reattore (48 m 3).

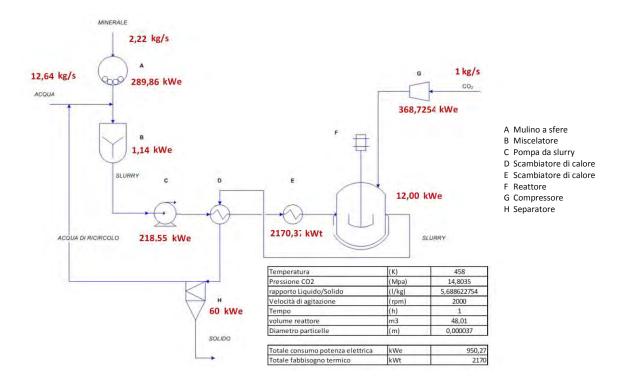


Figura 113. Applicazione della tecnologia della carbonatazione minerale alla CO2 emessa da un impianto a gas da 20 MWt

In conclusione per quanto riguarda la carbonatazione minerale, è risultato che non si presenta in realtà come alternativa alla tecnologia di riferimento, costituita dallo stoccaggio geologico negli acquiferi salini, in quanto non sembra essere applicabile alle taglie usuali degli impianti di produzione concentrata di energia (centinaia di MWe) ma, piuttosto, ad impianti di produzione distribuita di potenze medio basse (al più qualche decina di MWe). Un aspetto interessante del processo è quello di essere potenzialmente applicabile direttamente al fluido contenente la CO_2 , evitando in tal modo la fase di cattura. Tale eventualità è più concreta nel caso in cui la CO_2 non sia troppo diluita e questo può fare considerare l'ipotesi dell'integrazione con il sistema basato sulla turbina a gas e la cella a combustibile.

D. Contributo alla definizione della Road-map tecnologica italiana sulle tecnologie zero emission da carbone. Attività di informazione tecnologica e divulgazione delle tecnologie rivolta sia al pubblico che alle imprese

Le attività svolte hanno consentito da una parte la presenza nei tavoli nazionali ed internazionali di discussione ed aggiornamento delle priorità e quindi delle Road-map, dall'altra un'intensa attività di diffusione dei risultati della ricerca e di divulgazione tecnologica. Sono stati organizzati due convegni internazionali, uno a Roma (SAFE4 Luglio 2009) e l'altro a Ischia (PTSE 2010 - International Conference on "Processes and Technologies for a Sustainable Energy", luglio 2010).

Nell'ambito delle attività di contributo alla definizione ed all'aggiornamento della road-map tecnologica italiana sulle CCS, l'ENEA ha proseguito durante il corso dell'annualità le attività di partecipazione attiva a varie iniziative sia nazionali che internazionali quali: CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), ZEP Technology Platform, EERA (European Energy Research Alliance), EII (European Industrial Initiative) per il SET Plan e CO2 Club italiano.

La partecipazione alle iniziative sulle tecnologie CCS, quali le sopracitate CSLF, ZEP, EERA e EII, ha consentito di verificare l'allineamento delle attività svolte ed in programma in ENEA con le attuali priorità internazionali e quindi degli obiettivi della Ricerca sia a breve-medio termine (miglioramento dell'efficienza e diminuzione dei costi) che a lungo termine (messa a punto di nuove tecnologie).

Significativo risultato ottenuto nel corso dell'annualità è stato l'inserimento delle infrastrutture sperimentali Sotacarbo e Zecomix nella roadmap italiana delle Infrastrutture di Ricerca di interesse pan-europeo che il MIUR sta mettendo a punto sulla tematica Energy.

E stato attivato un portale sulle tecnologie zero-emission (www.zeroemission.enea.it) con un'ampia sezione dedicata alle "Clean Coal Technologies" ed alle tecnologie CCS; il portale è in fase di aggiornamento per quanto riguarda l'impiantistica dell'ENEA e delle società partecipate dedicate allo sviluppo di queste tecnologie.

Attraverso Sotacarbo che è presente, in rappresentanza dell'Italia, a numerosi tavoli internazionali sulle Clean Coal Technologies è stata assicurata la partecipazione italiana all'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center".

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università dell'Aquila – Dipartimento di Chimica (UNIVAQ)

L'Università dell'Aquila ha svolto l'attività "Studi e sperimentazioni sulle tecnologie impiantistiche per la produzione di elettricità e idrogeno da syngas da carbone", nell'ambito dell'obiettivo B prosegue ed integra quella iniziata nel primo anno sulle stesse tematiche e volta a dimostrare la fattibilità di tecnologie di separazione della CO₂ con metodi innovativi ad alta temperatura, per consentire l'utilizzo dell'idrogeno in turbina a gas.

In particolare, lo studio concettuale effettuato il primo anno della cattura a caldo dell'anidride carbonica, dal gas prodotto dalla idro-gassificazione di carbone, utilizzando un sorbente minerale di basso costo (dolomite calcinata), con un processo ciclico di carbonatazione - calcinazione, è stato integrato attraverso metodologie di caratterizzazione di sorbenti naturali e artificiali. Inoltre, nel primo anno di attività è stata studiata e quantificata una soluzione impiantistica basata su un processo continuo che prevede l'impiego di due reattori di reforming e decarbonatazione del gas combustibile, operanti in parallelo e in modo alternato (carbonatazione - calcinazione). La continuità del processo è garantita dalla uguaglianza della durata delle fasi operative richieste ai due reattori: quella per la cattura di CO₂e quella per la rigenerazione del sorbente. Tale soluzione appare promettente soprattutto nel caso di impianti di piccola taglia (al di sotto di 1 MW di potenza termica).

Oggetto degli studi del secondo anno è stato invece una soluzione alternativa, costituita da una coppia di reattori a letto fluidizzato, operanti in continuo (uno solo per la carbonatazione ed il secondo solo per la rigenerazione) con circolazione del materiale del letto tra di essi. Per consentire di effettuare la decarbonatazione del gas combustibile in condizioni operative favorevoli e, allo stesso tempo, compatibili con l'intero processo di idrogassificazione, questa è prevista avvenire a circa 30 atm. Tale configurazione di processo appare più applicabile a impianti di media taglia come quello in studio (5 MWt).

Università di Roma Tor Vergata – Dipartimento di Ingegneria Civile (UDR)

L'Università di Roma Tor Vergata è stata coinvolta per svolgere l'attività "Studio sulle potenzialità della carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio di anidride carbonica prodotta da impianti di piccola/media taglia" nell'ambito dell'obiettivo C.

Una delle possibili tecnologie di sequestro ex situ attualmente allo studio consiste nella carbonatazione, ovverosia nelle reazioni di neutralizzazione della CO₂ mediante reazione con matrici contenenti metalli alcalino-terrosi. Si vengono in questo modo a formare carbonati praticamente insolubili in acqua, stabili dal punto di vista chimico.

La carbonatazione può essere realizzata impiegando materiali disponibili in grandi quantità, quali minerali con contenuti rilevanti di calcio e/o magnesio (wollastonite, olivina e serpentino). O'Connor et al. 4 hanno individuato quali condizioni operative ottimali per la carbonatazione della olivina, una temperatura di 185 $^{\circ}$ C e una pressione parziale di CO_2 di 135 bar. Il miglioramento dell'efficienza del processo anche in condizioni di temperatura e pressione inferiori può essere ottenuto a condizione di comprendere meglio i meccanismi di dissoluzione e precipitazione che sottendono al processo.

Una fonte alternativa di materiali alcalini che possono essere impiegati ai fini della carbonatazione è rappresentata da residui industriali, disponibili in quantità relativamente elevate, ricchi di Ca o Mg. Tra le diverse tipologie di residui solidi, sono stati in particolare proposti i seguenti: ceneri da combustione prodotte da impianti alimentati a carbone, loppe d'altoforno prodotte dall'industria metallurgica, ceneri volanti e di fondo prodotte dall'incenerimento di rifiuti solidi, nonché ceneri risultanti dai trattamenti di disinchiostrazione per la produzione di carta di riciclo.

O'Connor W.K., Dahlin D.C., Rush G.E., Gerdemann S.J., Penner L.R., Nilsen D.N. (2005). Aqueous mineral carbonation: mineral availability, pretreatment, reaction parameters, and process studies. DOE/ARC-TR-04-002. Albany Research Center, Albany OR, USA.

L'obiettivo dell'attività era quello di valutare le rese di carbonatazione accelerata di minerali e di diverse tipologie di residui industriali in riferimento allo stoccaggio di CO₂ da impianti di produzione di energia di piccola/media taglia (< 20 MW termici).

Il progetto di ricerca è stato articolato su due percorsi paralleli, che hanno portato allo sviluppo delle seguenti attività: percorso 1: studio della carbonatazione accelerata di minerali e sviluppo di uno schema di impianto che integri il processo di carbonatazione all'interno di un impianto di gassificazione di piccola taglia (5-10 MW) percorso 2: studio della carbonatazione accelerata di residui industriali di diversa provenienza ed esecuzione di prove propedeutiche allo sviluppo di uno schema di impianto.

Stazione Sperimentale per i Combustibili (SSC)

Stazione Sperimentale per i Combustibili nell'ambito dell'obiettivo D è stata coinvolta per svolgere una serie di azioni atte a divulgare le tecnologie ed i processi legati all'utilizzo pulito del carbone.

Tali tecnologie, denominate con l'acronimo CCT (Clean Coal Technologies) hanno un legame molto stretto con l'insieme dei processi denominati CCS (Carbon Capture and Storage), ossia con quei processi atti ad eliminare l'anidride carbonica dal ciclo di utilizzo del carbone, ma comprendono uno spettro più ampio di configurazioni impiantistiche costituito sia dalle moderne tecnologie di combustione e gassificazione del carbone (impianti ultrasupercritici, a letto fluido e impianti IGCC) sia dalla produzione ed utilizzo di combustibili a bassissimo tenore di zolfo derivanti dal carbone (Coal to Liquid, ultra-clean coal).

L'obiettivo delle attività effettuate è stato quello di analizzare lo stato dell'arte delle tecnologie CCT al fine di attuare, sia mediante l'attivazione di un sito internet, sia con altre azioni di divulgazione tecnologica, una informazione qualificata ed autorevole e di dare un quadro il più possibile aggiornato sui possibili sviluppi futuri delle tecnologie legate al carbone.

Sotacarbo

Il lavoro condotto da Sotacarbo, nell'ambito dell'obiettivo D, è consistito nell'acquisire e gestire le informazioni ed i documenti riguardanti le tecnologie avanzate per l'utilizzo del carbone, prodotti nel quadro dell'Implementing Agreement IEA Coal Research, in qualità di rappresentante nazionale designato dall'MSE.

Sviluppo di tecnologie avanzate per componenti fotovoltaici innovativi

Le attività di questo tema di ricerca sono finalizzate allo sviluppo di un insieme di tecnologie e processi ad alto grado di innovazione per la realizzazione di impianti fotovoltaici con caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi.

L'affermazione della tecnologia fotovoltaica osservata negli ultimi anni ha determinato la necessità di sviluppare tecnologie alternative a quella del silicio cristallino con lo scopo di limitare i problemi legati alla disponibilità della materia prima (wafer di silicio) e, soprattutto, ridurre il costo dei moduli fotovoltaici. Sebbene, infatti, il problema dello shortage dei wafer di silicio sembra essere superato grazie alla creazione di nuove aziende di fabbricazione, la tecnologia del silicio cristallino presenta un notevole grado di sviluppo tecnologico che non consente di prevedere implementazioni tecnologiche tali da determinare una drastica riduzione dei costi di produzione dei moduli. Risulta allora necessario sviluppare tecnologie che abbiano le potenzialità per un abbattimento dei costi di produzione a valori ben inferiori a 1€/Wp. La tecnologia dei film sottili e le celle solari a base di materiali organici promettono nel breve e medio termine di ottenere prodotti competitivi in termini di efficienza di conversione e costi associati ed è per questo che su tali tematiche si è focalizzata l'attività di ricerca.

I film sottili, cha al momento ricoprono una quota del mercato fotovoltaico abbastanza contenuta (circa il 14%), sono considerati uno degli approcci più promettenti per una sostanziale riduzione dei costi per watt nel brevemedio termine. Impiegano, infatti, substrati a basso costo (vetro, metallo, plastica) insieme a quantità minime di materiale semiconduttore con una superiore capacità di assorbimento della radiazione solare rispetto al silicio cristallino. Si prestano a produzioni su larga scala, in cui il modulo, anche di grandi dimensioni (fino ad oltre 5 m²), è ottenuto direttamente al termine di un processo in linea a bassa intensità energetica, e non tramite processamento di wafer ad alta temperatura e successivo assemblaggio, come accade invece nel caso del silicio mono e multi-cristallino. Inoltre, i moduli a film sottile sono particolarmente adatti alle applicazioni in edilizia, in quanto è possibile realizzare elementi fotovoltaici esteticamente attraenti e con elevata adattabilità di forma, dimensione e trasparenza, permettendo all'utenza la possibilità di installare sistemi di produzione di energia elettrica con buona efficienza e costo competitivo anche in contesti particolari come centri storici, aree monumentali e di pregio.

La combinazione di potenziale riduzione di costi e possibilità di penetrazione in un mercato altamente remunerativo, come quello dell'integrazione architettonica, rendono le tecnologie a film sottile particolarmente interessanti per le prospettive di mercato.

Al miglioramento e agli ulteriori sviluppi delle tecnologie più innovative in questo campo sono dedicate risorse ingenti nei maggiori paesi industrializzati, in particolare USA, Germania e Giappone, con risultati molto incoraggianti. La loro piena maturazione richiede però ancora un notevole sforzo di ricerca e sviluppo, per raggiungere sia prestazioni che costi competitivi con le tecnologie tradizionali.

In Italia, l'incentivazione in conto energia ha stimolato l'interesse di molteplici operatori e tutta una serie di nuove iniziative imprenditoriali nel settore fotovoltaico sono state annunciate e hanno raggiunto diversi livelli di avanzamento, quasi tutte nel campo della tradizionale tecnologia del silicio cristallino. Nel campo dei film sottili, a parte l'annuncio di qualche sporadica iniziativa industriale, si registra un forte ritardo nell'applicazione e diffusione della tecnologia. Da qui l'esigenza di dare una forte spinta alla ricerca in questo settore in modo da aumentare le conoscenze a disposizione della comunità scientifica e imprenditoriale.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività sono rivolte al perfezionamento delle tecnologie delle celle solari a film sottile di II generazione a base di silicio e CIS, e allo sviluppo di nuove tecnologie a film sottile di III generazione a base di quantum dot di silicio e polimeri.

Per le celle in silicio è previsto lo sviluppo di soluzioni migliorative delle celle tandem micromorfe (silicio amorfo/silicio microcristallino) a film sottili con l'introduzione di riflettori intermedi, nuovi elettrodi trasparenti, metodi di deposizione ad alta velocità e substrati economici in plastica, allo fine di migliorare l'efficienza e ridurre i costi. Parallelamente si sviluppano materiali ingegnerizzati di III generazione basati su quantum dot di silicio

(nanocristalli con dimensioni pari a pochi nm) dispersi in matrici dielettriche da impiegare come strati attivi con gap energetica ottimizzata per ulteriori miglioramenti dell'efficienza dei dispositivi fotovoltaici.

Per le celle fotovoltaiche polimeriche, destinate alla realizzazione di componenti a bassissimo costo, è prevista la messa a punto, in atmosfera controllata, di processi di fabbricazione con l'impiego di polimeri coniugati commerciali e non, al fine di raggiungere efficienze e stabilità sufficienti ad un'applicazione commerciale.

Le celle solari a base di CIS hanno alte efficienze ma sono condizionate nella diffusione dalla scarsa disponibilità mondiale di indio, già massicciamente impiegato per la realizzazione di LCD e passato da 70 \$/kg nel 2002 a oltre 1000 \$/kg. Per superare tale limite si è operato per mettere a punto materiali con caratteristiche simili, dal punto di vista dell'applicazione fotovoltaica, ma in cui l'indio è sostituito da coppie di metalli dei gruppi II e IV della tavola periodica.

Accanto alle linee di ricerca sulle tecnologie e i materiali vengono affrontati i problemi legati alla definizione di procedure per la caratterizzazione e qualificazione di componenti fotovoltaici innovativi più adeguate rispetto agli attuali standard normativi, pensati per componenti convenzionali a base di wafer di silicio cristallino o di film sottili di silicio amorfo.

L'attività si articola nelle seguenti tre linee di ricerca:

- Fotovoltaico avanzato a base di film sottili di silicio
- Celle organiche a base di materiali polimerici o ibridi
- Materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI.

Gli obiettivi previsti per il primo anno del progetto sono elencati nel seguito.

A. Studio e sperimentazione di celle tandem micromorfe con riflettore intermedio

Per migliorare le prestazioni della cella tandem micromorfa in termini di stabilità è necessario mantenere sottile lo strato attivo della cella top amorfa. Una riduzione dello spessore comporterebbe, però, un limitato assorbimento della radiazione solare da parte di tale componente e, in conseguenza, una limitazione alla corrente del dispositivo. L'introduzione di uno strato riflettore intermedio posto tra le due celle componenti potrebbe consentire di aumentare il cammino ottico della radiazione all'interno della cella top e quindi di sfruttare le potenzialità in termini di correnti elevate della cella microcristallina. Tale strato deve essere trasparente in modo da consentire alla radiazione di raggiungere la cella bottom, sufficientemente conduttivo per non bloccare le cariche che devono ricombinarsi nella giunzione tunnel n/p e ad indice di rifrazione di circa 2 per agire come strato riflettore. Vengono studiati diversi materiali per essere testati allo scopo prefisso: in particolare vengono depositati film opportunamente drogati di nitruro e/o ossido di silicio per PECVD e di ossido di zinco per sputtering.

B. Studio e sperimentazione di strati assorbitori a quantum dot di Si e di array di nanoparticelle metalliche per celle fotovoltaiche di III generazione

Tra i diversi concetti proposti per il fotovoltaico di nuova generazione, un approccio promettente consiste nella realizzazione di dispositivi solari a multigiunzione, o celle tandem, dove ogni cella è realizzata ad-hoc e dedicata all'assorbimento di una particolare frazione dello spettro solare. Tramite nano-ingegneria del silicio, è possibile realizzare un nuovo materiale adatto allo scopo, con gap regolabile maggiore di quella del silicio in forma bulk (1,1 eV). L'idea è quella di fabbricare quantum dot di silicio immersi in una matrice dielettrica sufficientemente ravvicinati di modo che la sovrapposizione delle funzioni d'onda per gli stati permessi formi ampie mini-bande. È prevista la realizzazione di film di nitruro di silicio contenenti nanostrutture di silicio formatesi per autoaggregazione, mediante PECVD a bassa temperatura, e verificato il possibile utilizzo di questi materiali per applicazioni fotovoltaiche. Accanto ad una caratterizzazione di tipo strutturale, sono investigati, principalmente, conducibilità elettrica, assorbimento ottico e fotoluminescenza. A tal fine si prevede l'adeguamento della spettroscopia Raman per misure di fotoluminescenza e per la mappatura spaziale dei campioni. L'obiettivo consiste nella realizzazione di quantum dot in condizioni di elevato impacchettamento con gap energetiche variabili in principio da 1,5 a 3 eV, e in particolare intorno al valore ottimale di 1,7-1,8 eV, dimostrando in questo modo l'idoneità di questi materiali all'utilizzo come strati assorbitori in dispositivi fotovoltaici innovativi. La realizzazione di un'opportuna giunzione p-i-n per questo nuovo strato assorbitore intrinseco sarà il successivo banco di prova in vista di un futuro approccio a strutture tandem, ad esempio con questo tipo di cella a base di Si nanostrutturato in sostituzione della cella top amorfa nella struttura micromorfa.

Si prevede di studiare anche la possibilità di migliorare la raccolta di cariche elettriche agli elettrodi dei dispositivi sfruttando le risonanze plasmoniche superficiali in nanoparticelle metalliche, che sono di interesse per un gran

numero di applicazioni per la capacità di amplificare localmente il campo elettromagnetico. Ponendo tali nanoparticelle nelle vicinanze di un semiconduttore è atteso un miglioramento dell'assorbimento ottico dei fotoni incidenti e della raccolta delle cariche fotogenerate. Vengono realizzati film di nanoparticelle di oro e argento con diverse lunghezze d'onda di risonanza plasmonica al fine di adattare tali valori di risonanza alla risposta spettrale dei dispositivi. Tali strati sono successivamente testati nei dispositivi.

C. Sviluppo di moduli prototipali con TCO e materiali avanzati e studio delle relative metodologie di caratterizzazione e qualificazione

La tecnologia messa a punto per la deposizione di ZnO testurizzato, su area di 30 x 30 cm², viene migliorata con l'introduzione di trattamenti superficiali in plasma per ridurre le probabilità di shunt nei dispositivi che lo utilizzino come elettrodo frontale. I film vengono testati con la fabbricazione prototipale di moduli. A tale scopo è previsto un adeguamento dell'attrezzatura esistente (camera RIE per larga area). I film vengono utilizzati come elettrodi frontali per la realizzazione di moduli micromorfi fino a 30 x 30 cm². L'utilizzo di un TCO alternativo insieme all'utilizzo di strati di silicio con caratteristiche strutturali e ottiche differenti ha un impatto importante sui processi di laser scribing necessari alla fabbricazione dei moduli. E' quindi necessaria un'attività parallela di ottimizzazione dei parametri del patterning, quali ad esempio lunghezza d'onda, densità di potenza, frequenza di ripetizione impulsi e velocità di avanzamento del fascio laser incidente. Tali parametri sono valutati rispetto alle caratteristiche di assorbimento ottico e di dissipazione termica del materiale da incidere. L'obiettivo principale è ridurre al minimo l'ampiezza dei singoli tagli in modo da massimizzare l'area attiva e, quindi, la resa dei moduli.

La caratterizzazione dei dispositivi fotovoltaici innovativi e la conseguente definizione di standard di misura costituisce una questione aperta, che interessa notevolmente sia i gruppi di ricerca, che le industrie che stanno lavorando allo scale-up dei processi sviluppati su piccola area. Una particolare attenzione va, ad esempio, posta nella calibrazione dei simulatori solari utilizzati per la valutazione dell'efficienza dei nuovi dispositivi perché è diversa la sensibilità spettrale a seconda della composizione e della struttura del materiale attivo. Nel caso delle celle a multigiunzione, come le micromorph, risultano inadeguati gli standard di riferimento normalmente utilizzati per la caratterizzazione delle celle a singola giunzione tradizionali. Altra questione da affrontare è la valutazione della affidabilità dei dispositivi innovativi nel tempo e a condizioni stressanti, caratteristiche essenziali per componenti destinati ad installazioni outdoor e all'integrazione in edilizia in particolare. L'attività è rivolta allo studio e definizione di test finalizzati alla valutazione della qualità dei dispositivi fotovoltaici innovativi e della loro affidabilità e tempo di vita.

Nell'ambito del presente obiettivo sono inserite le attività relative alla partecipazione italiana all'Implementing Agreement "Photovoltaic Power Systems" della IEA, con scambio di informazioni, studi e analisi su temi di comune interesse.

D. Studio e sperimentazione di celle a film sottile di silicio su plastica

Generalmente le celle solari a film sottile di silicio sono depositate in configurazione p-i-n su substrato di vetro e illuminate dallo strato p (attraverso il vetro e l'elettrodo frontale trasparente), in modo da avere una migliore raccolta delle lacune caratterizzate da una bassa mobilità. Nel caso di utilizzo di substrati plastici, poco resistenti alla radiazione ultravioletta, molti adottano la configurazione n-i-p in modo che la radiazione solare non debba attraversare il substrato. In questo modo è possibile utilizzare anche substrati non trasparenti come sono la maggior parte delle plastiche resistenti a temperature sufficientemente alte. In alternativa si può esplorare l'utilizzo della configurazione p-i-n con illuminazione dallo strato n grazie alla potenzialità di crescere film di silicio microcristallino di tipo n altamente conduttivi e trasparenti. È prevista la realizzazione di dispositivi a singola o doppia giunzione di tipo p-i-n su substrati plastici sviluppando opportuni processi a bassa temperatura e strati di interfaccia per superare i problemi di disadattamento meccanico. Infatti, a causa dei differenti coefficienti di espansione termica tra i vari strati, possono verificarsi problemi di esfoliazione dei film che costituiscono il dispositivo fotovoltaico durante i processi di deposizione sui substrati polimerici.

E. Studio e sperimentazione di un processo per la realizzazione di celle polimeriche in atmosfera controllata

I materiali utilizzati per la realizzazione di celle polimeriche sono sensibili all'ossigeno e all'umidità per cui è indispensabile implementare tutti i passi del processo per la loro realizzazione in un ambiente controllato come le glove box. In particolare, occorre effettuare in atmosfera controllata la preparazione del materiale attivo, la sua deposizione e la deposizione dei contatti metallici. E' opportuno anche mettere a punto una misura dell'efficienza all'interno della glove box, per evitare il degrado in fase di test.

In questo obiettivo viene messo a punto il modello ottico delle celle solari organiche con lo scopo di investigare l'effetto dello spessore dello strato attivo sulla corrente di corto circuito del dispositivo. In generale, la struttura consiste in un multistrato di film sottili posti su un substrato di vetro relativamente spesso attraverso il quale

arriva la luce. Gli indici di rifrazione e i coefficienti di estinzione di ciascuno strato della struttura vengono determinati per calcolare il campo elettrico in ciascuna posizione del dispositivo. L'obiettivo è di ottimizzare la struttura determinando lo spessore ottimale dello strato attivo che massimizzi l'assorbimento e limiti le perdite dovute a ricombinazione in modo da migliorare la corrente di corto circuito e l'efficienza di conversione.

I dispositivi sono realizzati con materiali già disponibili in commercio; in particolare, si prevede l'uso di politiofeni con diverse catene laterali. Lo scopo è quello di affrontare e risolvere le varie problematiche connesse con la deposizione dei materiali polimerici, il controllo della loro morfologia, la realizzazione dei contatti e la caratterizzazione dei dispositivi. Successivamente si prevede di analizzare l'influenza di vari parametri sull'efficienza dei dispositivi (effetto del solvente di deposizione, del tipo di elettrodi, della velocità di deposizione, degli annealing sul materiale e sui dispositivi finali). Sono inoltre investigate modifiche ed implementazioni nell'architettura della cella.

F. Studio e sperimentazione di nuovi materiali polimerici o ibridi organici-inorganici per celle fotovoltaiche

In collaborazione con gruppi universitari che hanno un'esperienza consolidata nella sintesi di polimeri semiconduttori e nella preparazione di materiali nanostrutturati, sono realizzati dispositivi con polimeri di nuova formulazione allo scopo di migliorare le caratteristiche ottiche ed elettriche di quelli riportati finora in letteratura. Vengono impiegate tecniche di modeling molecolare dei materiali donori e accettori per progettare nuovi polimeri con una gap più piccola rispetto a quelli attuali e per dare indicazioni più dettagliate ai partner che si occupano della sintesi di nuovi materiali. Il modeling utilizza i metodi della chimica quantistica investigando la distribuzione elettronica, l'energia di gap e gli orbitali di frontiera (HOMO, LUMO).

G. Studio e sperimentazione di film sottili policristallini Cu2-II-IV-VI4 per la realizzazione di celle fotovoltaiche

L'attività parte dal materiale che ha finora dato i migliori risultati, e cioè il Cu₂ZnSnS₄, ma con esplorazioni collaterali di altri candidati, una volta individuati come promettenti. Si procede quindi con uno studio per confrontare i vari componenti della famiglia Cu₂-II-IV-VI₄ in base alle conoscenze attuali su struttura cristallina (stannite o kesterite), valore e tipo (diretta/indiretta) della gap, masse efficaci, mobilità ecc.

I film precursori contenenti gli elementi nelle corrette proporzioni vengono realizzati depositando sequenzialmente (per evaporazione o sputtering) i tre layer dei rispettivi solfuri metallici. Il film precursore è sottoposto ad un annealing con impiego di polvere di zolfo o H₂S.

I materiali vengono caratterizzati dal punto di vista strutturale (XRD e SEM), ottico (tramite Riflettanza e Trasmittanza) per determinare il valore ed il tipo di gap, luminescenza per valutare i difetti) ed elettrico (conducibilità, mobilità da effetto Hall, fotoconducibilità).

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Per quanto riguarda le celle a film sottile di silicio le attività hanno riguardato lo studio di materiali per l'utilizzo come strati riflettori intermedi in celle solari tandem micromorfe. Sono state indagate le potenzialità di due materiali il nitruro e l'ossido di silicio. Quest'ultimo è risultato essere il candidato migliore in termini di proprietà elettriche e ottiche. Gli strati di ossido di silicio sono stati inseriti nei dispositivi tandem ottenendo dei risultati preliminari incoraggianti. E' stato evidenziato, infatti, un incremento della risposta spettrale nella componente top in silicio amorfo del dispositivo che dimostra un migliore assorbimento della radiazione solare in tale cella componente. Inoltre i film di ossido di silicio drogati n hanno mostrato interessanti applicazioni anche come strati alternativi nelle celle p-i-n.

Per quanto concerne le attività sullo studio di materiali nanostrutturati da utilizzare come strati assorbitori innovativi, è stato eseguito lo studio di film di nitruro di silicio a varia stechiometria depositati con tecnica PECVD. Sono stati studiati dei regimi di crescita che potessero consentire una separazione di fase con formazione di nanostrutture di silicio. Per favorire tale separazione sono stati inoltre eseguiti dei trattamenti termici, ottenendo una completa separazione di fase con formazione di dot cristallini alle più alte temperature utilizzate (1100°C).

Nel campo delle celle polimeriche all'inizio dell'attività relativa al presente accordo, l'ENEA aveva sviluppato dispositivi, operando completamente all'aria, utilizzando una miscela composta da un derivato del politiofene e un derivato del fullerene con un'efficienza dell'1,3% su area di circa 1 cm². Nel corso di questa annualità tale risultato è stato migliorato, integrando alcuni passi di processo in glove box e quindi operando in atmosfera inerte. Il valore di efficienza ottenuto è del 2,9%. E' stato anche messo a punto un modello ottico per la progettazione dei dispositivi che consente di ottimizzare lo spessore dello strato attivo. Si è, inoltre, provveduto ad allestire una linea

sperimentale per la realizzazione di dispositivi polimerici completamente in atmosfera controllata. Sono state inoltre avviate attività per la sintesi di nuovi materiali polimerici e ibridi per l'utilizzo nei dispositivi solari.

Per quanto riguarda la realizzazione di una linea per la fabbricazione di film sottili policristallini Cu₂-II-IV-VI₄ e la messa a punto di un materiale adatto alla realizzazione di celle fotovoltaiche, l'attività è stata incentrata sul materiale che ha finora dato i migliori risultati, il Cu₂ZnSnS₄. I film precursori contenenti gli elementi nelle corrette proporzioni devono essere realizzati depositando in sequenza (per evaporazione o sputtering) i tre layer dei metalli (Zn, Cu, Sn) o dei rispettivi solfuri (ZnS, CuS, SnS) ed il film deve poi essere sottoposto ad un annealing con impiego di polvere di zolfo o H₂S.

Sono stati prodotti una ventina di film precursori e si è approntato un sistema di annealing in vapori di zolfo. I film ottenuti con questi trattamenti hanno mostrato spettri di diffrazione X e spettri Raman compatibili con la struttura voluta del Cu₂ZnSnS₄ ma le misure di analisi composizionale (EDS e XRF) mostrano che non si è ancora raggiunto il necessario controllo della stechiometria del film. Questo difetto nella stechiometria è probabilmente la causa delle insufficienti proprietà elettriche ottenute dalle misure di effetto Hall e dalle prime prove di realizzazione di giunzioni Schottky. L'ottimizzazione dei processi di crescita è comunque appena iniziata e si spera di ottenere buoni risultati in breve tempo.

Nel seguito si riporta una descrizione sintetica delle attività dei singoli obiettivi.

A. Studio e sperimentazione di celle tandem micromorfe con riflettore intermedio

Lo scopo dell'obiettivo è stato quello di mettere a punto materiali da utilizzare come strati riflettori intermedi per celle tandem di tipo micromorfo. La cella micromorfa (Figura 114)) è una tra le strutture più promettenti nell'ambito della tecnologia a film sottile di silicio. In questa struttura la cella superiore, quella, cioè, che viene

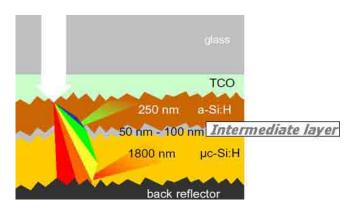


Figura 114. Schema della cella tandem micromorfa con uno strato riflettore intermedio.

investita direttamente dalla radiazione, è realizzata in silicio amorfo e quella inferiore in silicio microcristallino. Tale struttura presenta un raccordo ottimale tra le gap ottiche delle singole celle, inoltre in essa, data la presenza della componente microcristallina, viene ridotto il degrado delle prestazioni durante l'illuminazione. Per limitare ulteriormente tale degrado sarebbe opportuno minimizzare lo spessore della cella top in silicio amorfo. Questa strategia ha la controindicazione di ridurre la corrente ottenibile dalla componete top limitando, quindi, le prestazioni del dispositivo. Si stanno, allora, studiando degli strati da utilizzare come riflettori cosiddetti intermedi per la componente top della cella tandem (Figura 114). Tali strati devono avere tre requisiti fondamentali, devono:

- 1) esser sufficientemente conduttivi in modo da non bloccare le cariche che devono ricombinarsi alla giunzione tunnel;
- 2) avere un indice di rifrazione più basso di quello del silicio in modo tale che il salto di indice di rifrazione produca una riflessione della luce all'interfaccia;
- 3) essere molto trasparenti in modo da ridurre le perdite di corrente dovute a fenomeni di assorbimento al di fuori delle regioni attive del dispositivo.

Inoltre è opportuno che questi strati siano cresciuti con la stessa tecnica di deposizione utilizzata per crescere il dispositivo in modo da evitare di interrompere la sequenza di fabbricazione e rendere necessario il trasferimento dei substrati su cui viene cresciuta la cella in altri sistemi da vuoto. Sono stati investigati film di nitruro di silicio (n-SiNx:H) e ossido di silicio (n-SiOx:H) non stechiometrici entrambi drogati di tipo n. I film sono stati depositati con tecnica Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD), la stessa utilizzata per crescere i film di silicio necessari alla fabbricazione dell'intero dispositivo.

o Proprietà dei film di SiN_x:H e SiO_x:H

I film di nitruro e ossido di silicio sono stati cresciuti utilizzando varie miscele di gas. Al variare di esse, infatti, si riesce a ottenere film con stechiometrie diverse caratterizzati da differenti proprietà ottiche ed elettriche. In particolare risultano fondamentali le quantità di ammoniaca (NH₃) e di biossido di carbonio (CO₂) utilizzati rispettivamente per crescere film di nitruro di silicio o ossido di silicio. E' stato condotto uno studio delle proprietà dei materiali al variare del rapporto X/SiH₄ dove con X viene indicato alternativamente CO₂ o NH₃ e il silano (SiH₄) è il gas comunemente utilizzato per la crescita di film di silicio.

In Figura 115 è riportato l'indice di rifrazione n in funzione del rapporto X/SiH_4 . L'indice n è stato valutato intorno alla lunghezza d'onda di 500 nm, che corrisponde alla parte dello spettro solare che raggiunge lo strato intermedio della cella tandem e necessita di essere riflesso all'interfaccia del materiale. In entrambi i casi si osserva una riduzione dell'indice di rifrazione che è correlata all'incorporazione di ossigeno/azoto nel materiale. Nel caso dei film di nitruro di silicio si ha una forte variazione iniziale e si osserva poi un plateau con valori di n di circa 1,95, molto vicini ai valori trovati per film stechiometrici di Si_3N_4 cresciuti con tecnica PECVD. Nel caso invece dei film di ossido di silicio la riduzione dei valori di n è molto meno rapida e i valori minimi ottenuti sono di circa 2,2. Per tale materiale, evidentemente, l'incorporazione di ossigeno sembra essere piuttosto difficoltosa: anche utilizzando alti flussi di CO_2 i film sono ancora ricchi di silicio.

Gli spettri di trasmittanza riportati nell'inserto della Figura 115 relativi ai campioni di nitruro di silicio mostrano l'aumento di luce trasmessa all'aumentare del rapporto NH₃/SiH₄ dovuto all'allargamento della gap ottica. Un andamento simile è stato ottenuto anche per i film di ossido di silicio.

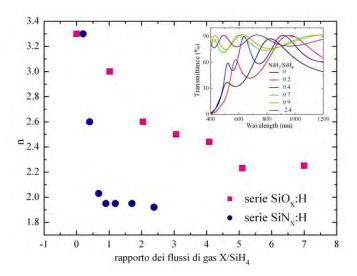


Figura 115. Andamento dell'indice di rifrazione in funzione di X/SiH4, con X = CO2 (quadrati) o X = NH3 (cerchi). Inserto: Spettri di trasmittanza dei film di SiNx:H

Se dal punto di vista ottico i campioni di nitruro di silicio hanno mostrato idonee qualità, potendo ottenere valori molto bassi dell'indice di rifrazione, dal punto di vista elettrico tali campioni hanno mostrato invece dei fattori limitanti. In Figura 116 è riportato l'andamento della conducibilità elettrica in funzione del rapporto X/SiH₄ per i campioni di nitruro e ossido di silicio. Per ambedue le serie si osserva una riduzione di σ quando l'ossigeno/azoto comincia ad essere incorporato nel materiale. Aumentando il contenuto di ossigeno/azoto nei film, infatti, i materiali subiscono una transizione strutturale con un incremento di fase amorfa che determina una minore efficacia di drogaggio e spiega la diminuzione della conducibilità. Nel caso dei film di nitruro di silicio si osserva una variazione molto rapida di σ con valori che diventano minori di 10^{-7} S/cm non appena vengono aggiunte piccole quantità di ammoniaca alla miscela di gas utilizzati per la deposizione. Tali valori risultano essere poco compatibili con l'utilizzo dei film di SiN_x:H nei dispositivi, sebbene le proprietà elettriche determinate sui singoli strati possono differire sensibilmente rispetto a quelle dei materiali cresciuti all'interno del dispositivo. I film di SiO_x:H hanno mostrato invece proprietà elettriche più promettenti in quanto la riduzione di σ da valori di circa 1 S/cm a valori di 10^{-6} S/cm è ottenuta nell'intervallo di CO_2/SiH_4 = 0 - 4, molto più ampio di quanto osservato nel caso dei nitruri. Il regime di deposizione trovato nel caso di film di ossido di silicio consente di ottenere materiali con conducibilità sufficientemente elevata per il loro utilizzo nei dispositivi. Si è pertanto deciso di testare tali film nelle celle solari.

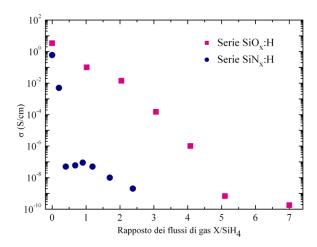


Figura 116. Conducibilità elettrica in funzione di X/SiH₄, con X = CO₂ (quadrati) or X = NH₃ (cerchi)

Proprietà delle celle solari

Sono state fabbricate celle solari tandem micromorfe con e senza lo strato riflettore intermedio. Lo strato riflettore è stato depositato utilizzando un rapporto CO_2/SiH_4 pari a 4 in modo da poter contare su un materiale dotato di caratteristiche elettriche idonee, avente indice di rifrazione ($n \approx 2,4$) abbastanza differente da quello dei film di silicio ($n \approx 3,8$) in modo da produrre un aumento di luce riflessa all'interfaccia Si/SiO_x :H. Lo spessore dello strato riflettore è di circa 70 nm, tale spessore è stato scelto in modo da massimizzare il fenomeno della riflessione all'interfaccia.

In Figura 117 è riportato il confronto tra le misure di efficienza spettrale (EQE) eseguite su due celle tandem (area 1 cm²) con e senza lo strato riflettore intermedio. La misura di EQE consente di avere informazioni sul contributo delle varie parti dello spettro alle raccolta delle cariche e, nel caso delle cella tandem, di valutare il contributo alla

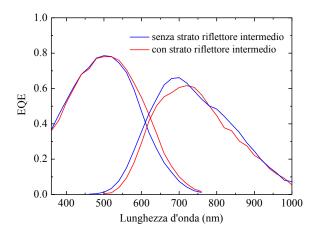


Figura 117. Confronto tra la risposta spettrale misurata su una cella tandem micromorfa con e senza strato intermedio di ossido di silicio

corrente delle due celle componenti. Dalla figura si può osservare un aumento dell'efficienza spettrale che compete alla cella top in silicio amorfo nella regione di lunghezza d'onda tra 500 nm e 700 nm. Nello stesso intervallo si nota una riduzione della risposta spettrale della cella bottom dovuto alla ridotta intensità di luce che raggiunge tale componente. La misura di EQE ci dà quindi indicazione di un migliore intrappolamento della luce nella cella top. Tuttavia la caratteristica I-V della cella con strato intermedio ha evidenziato un leggero peggioramento delle prestazioni della cella. In particolare si è avuta una riduzione del FF da valori di circa 70% a valori di circa 65%, probabilmente a causa di problemi alla giunzione tunnel n/p tra le celle componenti. Si è compreso allora la necessità di ottimizzare la giunzione tunnel quando in essa venga inserito lo strato intermedio. Sarà probabilmente necessario riprogettare tale giunzione sia in termini di caratteristiche elettriche dei film drogati di tipo n e p che in termini di spessore degli stessi strati.

Sono stati messi a punto processi di deposizione di film di ossido di silicio con caratteristiche idonee all'utilizzo nelle celle tandem. E' stato evidenziato un miglioramento dell'intrappolamento della radiazione nella cella top, ma non è stato ancora raggiunto un miglioramento dell'efficienza iniziale della cella del 10%, come ipotizzato. Tuttavia la possibilità di assottigliare lo spessore della cella top ci consente di affermare che le celle con lo strato riflettore intermedio possono mostrate una migliore stabilità delle prestazioni sotto illuminazione rispetto a quelle in configurazione standard. Un confronto dei valori di efficienza stabilizzati delle celle con e senza strato riflettore consentirà di analizzare costi-benefici di un eventuale futuro trasferimento su linea industriale dello strato di SiOx:H. In tal senso si vuole inoltre rimarcare che gli strati di ossido di silicio sono depositati con la stessa tecnica di deposizione utilizzata per i film sottili di silicio e quindi lo strato riflettore può essere tranquillamente inserito nella catena di fabbricazione del dispositivo.

B. Studio e sperimentazione di strati assorbitori a quantum dot di Si e di array di nano particelle

L'obiettivo si riferisce alla sperimentazione di concetti innovativi per il fotovoltaico di III generazione come materiali assorbitori a base di quantum dot di silicio in matrici dielettriche e come nanofili metallici e/o array di nanoparticelle metalliche con capacità di amplificazione locale del campo elettromagnetico.

L'attività si è incentrata in particolare sullo sviluppo di:

- 1. film sottili di nitruro di silicio con nanoparticelle di Si;
- 2. array di nanoparticelle metalliche (attività svolta in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova).
- o Film sottili di nitruro di silicio con nanoparticelle di Si

Tra i diversi concetti proposti per il fotovoltaico di nuova generazione, un approccio promettente consiste nella realizzazione di dispositivi solari a multigiunzione, o celle tandem, dove ogni cella è dedicata all'assorbimento di una particolare frazione dello spettro solare. Il concetto è già in uso nel caso della tecnologia a film sottile con prodotti commerciali a due e tre giunzioni. Nell'approccio di terza generazione l'idea si spinge oltre e mira alla progettazione e realizzazione di semiconduttori artificiali con la capacità di assorbire una qualsiasi lunghezza d'onda dello spettro solare, sfruttando le specifiche proprietà di confinamento quantistico delle nanostrutture (in particolare la possibilità di modulare la bandgap variando la dimensione delle nanoparticelle). In questo ambito, una delle idee maggiormente seguite a livello internazionale è quella della "All-Si tandem solar cell", proposta per la prima volta da Martin A. Green dell'UNSW (Australia), basata sulla realizzazione di nuovi strati assorbitori a quantum dot (QD) di Si, nanoparticelle di Si, con dimensioni di qualche nanometro in matrice dielettrica (come l'ossido, il nitruro o il carburo di silicio). Il nitruro di Si è particolarmente promettente come matrice ospite, sia perché rispetto all'ossido offre una barriera più bassa al trasporto delle cariche (a vantaggio della mobilità delle cariche stesse) e sia perché alcuni lavori riportano la possibilità di realizzare spontaneamente QD di Si in tale materiale in opportune condizioni.

La fabbricazione di film dielettrici con quantum dot di silicio richiede in genere dei trattamenti post deposizione ad alta temperatura piuttosto lunghi che complicano l'utilizzo di tali strati in celle solari a film sottile. Per un più diretto utilizzo di tali materiali sono state studiate delle metodologie di realizzazione basate su processi di deposizione a bassa temperatura seguiti da eventuali trattamenti termici brevi possibilmente a temperature non troppo elevate. I vari campioni sono stati caratterizzati in termini di struttura, assorbimento ottico e fotoluminescenza..

Sono state fabbricate serie di film sottili di nitruro di silicio a stechiometria variabile mediante tecnica PECVD a bassa temperatura (300°C) a partire da silano e azoto. In tutti i casi è stata osservata fotoluminescenza a temperatura ambiente. In particolare, è stato possibile "tunare" la lunghezza d'onda di emissione nel visibile variando la stechiometria dei film, intervenendo sui flussi gassosi utilizzati nel processo di crescita. La figura 118 mostra il "tuning" della gap ottica (a) e della fotoluminescenza (b) per una serie di campioni al variare del contenuto di silicio. Una possibile interpretazione di questo risultato si basa su una crescita non-omogenea dei film, con formazione spontanea di nanoaggregati (QD) di silicio all'interno della matrice di nitruro di silicio, con dimensioni dei dot variabili al variare delle condizioni di deposizione (fotoluminescenza da confinamento quantistico).

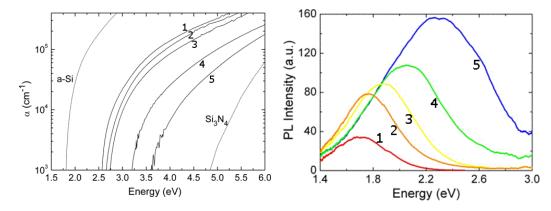


Figura 118. Coefficiente di assorbimento (a) e fotoluminescenza (b) di una serie di film di nitruro di silicio non stechiometrico al decrescere del contenuto di silicio andando dal campione 1 al 5

Le indagini EFTEM su campioni *as-grown* tuttavia non hanno mostrato presenza di nanoparticelle di Si. I risultati della spettroscopia Raman sono comunque compatibili con una parziale separazione di fase, con regioni "siliconrich" in una matrice meno ricca di silicio (inserto Figura 119). La fotoluminescenza è, dunque, probabilmente dominata piuttosto da un meccanismo di ricombinazione radiativa tra stati localizzati nelle code di banda.

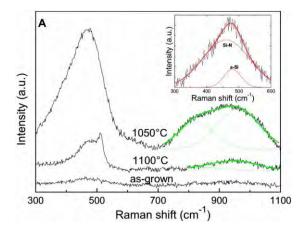


Figura 119. Spettri Raman del campione A (eccesso di Si pari a 18%) prima e dopo l'annealing (per alcune temperature), mostrati con un offset arbitrario lungo l'asse delle ordinate dopo sottrazione della baseline. In verde è mostrata l'analisi del modo 2TO. Inserto: dettaglio della deconvoluzione dello spettro Raman del primo ordine per il campione A in condizione *as-grown*

A questo punto è stata studiata la possibilità di realizzare QD di silicio tramite opportuni trattamenti termici. Sono stati effettuati degli annealing rapidi (≤ 10min) a temperature variabili nel range 500-1050°C tramite forno RTP e, per confronto, degli annealing più convenzionali (1 h a 1100°C). Si è osservata de-idrogenazione per temperature di annealing più basse (entro gli 800°C) e riarrangiamento dei legami per temperature più alte. La parziale separazione di fase rivelata da analisi micro-Raman nei campioni as-grown viene accentuata con gli annealing a temperature ≥ 800°C, ma, almeno per le stechiometrie indagate finora, la formazione di nanocristalli di silicio (con dimensioni variabili mediamente da 1 a 4 nm) è stata osservata solo dopo l'annealing di tipo classico (1 h a 1100°C). Sia la temperatura più elevata che la maggior durata del trattamento possono aver giocato un ruolo chiave. In figura 120 sono riportate le immagini EFTEM di due campioni dopo annealing a 1100°C da cui già qualitativamente si evidenzia che le dimensioni medie delle nanoparticelle di Si (agglomerati chiari) scalano con il contenuto di Si di partenza.

In presenza di una parziale separazione di fase già in condizioni *as-grown*, dovrebbe, però, essere possibile indurre la formazione di puri aggregati amorfi anche con trattamenti brevi a temperature più basse. L'anomala intensità molto elevata dello spettro Raman osservata per campioni con moderato eccesso di Si dopo annealing rapido a 1050°C (Figura 119) può essere effettivamente un segnale di formazione di dot amorfi di dimensioni tali da avere una bandgap che combacia con l'energia di eccitazione utilizzata per l'analisi, dando luogo a uno scattering risonante. In base a dati di letteratura tali dot amorfi avrebbero diametri di circa 1,7 nm. Si è inoltre riscontrato

che il modo 2TO in questi casi è molto accentuato. Ciò è probabilmente dovuto ad una maggiore intensità dell'interazione elettrone-fonone nel Si nanostrutturato.

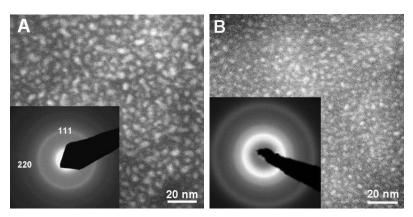


Figura 120. Immagini EFTEM in piano e pattern di diffrazione elettronica (inset) di due campioni a diversa stechiometria (eccesso di Si pari a 18% e 11% rispettivamente per i campioni A e B) dopo trattamento termico per 1h a 1100°C.

Sono stati poi indagati gli effetti di questi cambiamenti strutturali su fotoluminescenza e assorbimento ottico. In genere si è riscontrato un *quenching* della fotoluminescenza oltre gli 800° C, molto probabilmente a causa della formazione di canali di ricombinazione non-radiativi (la de-idrogenazione genera infatti un elevato numero di dangling bonds). Per quanto riguarda l'analisi ottica, il trend generale con gli annealing a temperature crescenti vede un aumento del coefficiente di assorbimento con uno shift degli spettri verso energie più basse compatibile con la de-idrogenazione e l'aumento di legami Si-Si. Una lieve inversione di questo trend si riscontra a medie energie (≈ 2 -4 eV) solo a seguito del trattamento a 1100° C. Questo è un ulteriore segnale della formazione di nanocristalli di Si, dato il più basso coefficiente di assorbimento del c-Si rispetto all'a-Si in tale intervallo di energia.

o Array di nanoparticelle metalliche

Le risonanze plasmoniche superficiali in nanoparticelle metalliche sono di interesse per un gran numero di applicazioni per la capacità di amplificare localmente il campo elettromagnetico. Ponendo tali nanoparticelle nelle vicinanze di un semiconduttore è atteso un miglioramento dell'assorbimento ottico dei fotoni incidenti e della raccolta delle cariche fotogenerate, e quindi un incremento di efficienza nel caso di applicazione alle celle solari.

L'attività svolta all'Università di Genova si è incentrata sullo studio dei processi di crescita auto-organizzata di array di nanoparticelle metalliche con funzionalità plasmonica, allo scopo di implementare strategie di "photon harvesting" in dispositivi fotovoltaici a film sottile. La crescita delle nanoparticelle è stata messa a punto sui substrati solitamente impiegati dall'ENEA per la realizzazione di celle solari a film sottile in silicio amorfo (vetri e film di ossidi conduttori trasparenti). L'attività si è basata sugli sviluppi della tecnica di sintesi fisica di array di nanofili metallici supportati su substrati dielettrici messi a punto a Genova. La sintesi auto-organizzata di nanostrutture periodiche su larga area (scala del cm²) viene ottenuta tramite irraggiamento ionico defocheggiato (IBS-lon Beam Sputtering) di un substrato dielettrico o di un film di metallo nobile supportato. Sfruttando la competizione tra le instabilità erosive indotte dal fascio ionico ed i processi di rilassamento diffusivo in superficie si ottengono nanostrutture periodiche con taglie e periodicità caratteristiche nella scala dei 100 nm. Il lavoro svolto ha permesso di dimostrare che le nanostrutture metalliche cresciute tramite IBS presentano marcati effetti ottici nella regione visibile dello spettro elettromagnetico, dovuti alla eccitazione delle risonanze plasmoniche localizzate. La frequenza di risonanza delle nanoparticelle può essere ottimizzata rispetto allo spettro solare attraverso una modifica controllata della morfologia (variando la dose di ioni).

Alternativamente alla sintesi diretta delle nanoparticelle metalliche ottenuta tramite IBS, si è verificato che la crescita delle nanostrutture può essere indotta tramite agglomerazione controllata (deposizione ad angoli radenti) su substrati pre-strutturati, sfruttando effetti di ombreggiatura indotti dal profilo topografico del substrato e dal cluster metallico stesso. Il processo è stato inizialmente messo a punto su substrati di vetro dimostrando che è possibile controllare in modo semplice la risposta plasmonica delle nanoparticelle variando la loro sezione (attraverso il controllo della dose depositata). Successivamente si è dimostrato che la deposizione dei film di TCO sui substrati di vetro nanostrutturati avviene in modo conforme, replicandone la morfologia. I substrati di TCO nanostrutturato, così ottenuti, sono quindi stati impiegati con successo come supporto per indurre il confinamento delle nanoparticelle metalliche. In Figura 121 è riportata come esempio l'immagine topografica AFM di un substrato di ZnO su cui sono stati evaporati 5 nm di oro ad angolo radente (85°). Nell'immagine sono

anche indicati la direzione del fascio di evaporazione e i cluster generati dall'effetto di ombra. Questi sono distanziati nella direzione del fascio e generalmente connessi nella direzione ortogonale.

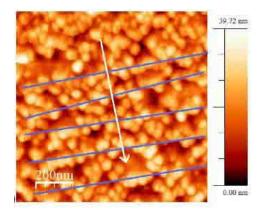


Figura 121. Topografia di un film di oro ottenuto tramite evaporazione radente su ZnO. La freccia bianca indica la direzione del fascio di evaporazione, le linee blu indicano le catene di oro formate a seguito dell'effetto di ombreggiatura

La procedura di evaporazione ad angoli radenti, che ha il vantaggio di non richiedere trattamenti termici ad alta temperatura, applicata alle celle ha dato risultati incoraggianti. In esperimenti preliminari la configurazione in cui le nanoparticelle vengono incapsulate nella regione posteriore della cella, in prossimità del backreflector, è stata identificata come la più promettente. In Figura 122(a) è riportata l'efficienza quantica di una cella p-i-n in silicio amorfo con e senza nanoparticelle di oro sul retro. In Figura 122(b) è riportato lo studio degli effetti plasmonici in termini di spettro ottico in trasmissione in seguito ad evaporazione ad angoli radenti su SnO₂ e vetro. Con il substrato di vetro è chiaramente presente un marcato minimo di estinzione dovuto al plasmone centrato attorno a 650 nm; per quanto riguarda il substrato di SnO₂ non è possibile identificare la posizione esatta del minimo plasmonico a seguito delle oscillazioni dovute all'interferenza nel film di ossido. Tuttavia è ben evidente una diminuzione della trasmissività per lunghezze d'onda comprese tra i 500 nm ed i 700 nm. Si nota che l'efficienza quantica della cella con nanoparticelle è leggermente più alta rispetto a quella della cella di riferimento proprio in corrispondenza delle lunghezze d'onda della risonanza plasmonica.

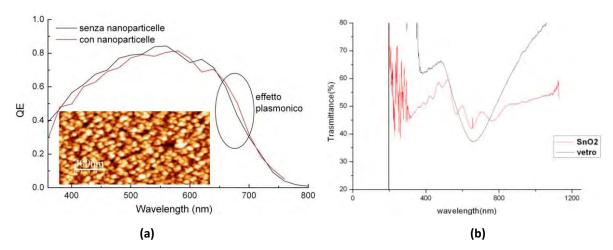


Figura 122. (a) Efficienza quantica di una cella p-i-n in Si amorfo con e senza nanoparticelle di oro u in prossimità del backreflector. Inset: immagine AFM di nanoparticelle di oro da evaporazione radente su vetro. (b) Trasmittanza delle nanoparticelle realizzate con evaporazione radente su vetro ed SnO₂ rugoso

Per ridurre le perdite per riflessione alla interfaccia vetro-aria è stata infine verificata la possibilità di realizzare una nanostrutturazione sub-diffrattiva di elevato rapporto di altezza (replicando la gradazione dell'indice di rifrazione che si osserva in strutture bio-mimetiche naturali quali la cornea di insetti notturni). Il processo di amplificazione verticale delle nanostrutture è stato messo a punto e consente di ottenere una amplificazione della ampiezza delle nanostrutture da circa 30 nm a quasi 100 nm. Test preliminari realizzati sulle celle indicano che è necessario

aumentare ulteriormente il rapporto di altezza delle nanostrutture di vetro per conseguire un effetto significativo del punto di vista dell'efficienza.

In conclusione si può affermare di aver raggiunto quanto previsto mettendo a punto sia film di nitruro di silicio con nanoparticelle di Si, che film di nanoparticelle metalliche con effetti plasmonici.

C. Sviluppo di moduli prototipali con TCO e materiali avanzati e studio delle relative metodologie di caratterizzazione e qualificazione

Lo scopo delle attività svolte in questo obiettivo è stato l'ottimizzazione dei processi di trattamento dei film di ZnO da utilizzare come contatto frontale nelle celle solari e l'implementazione del laboratorio di caratterizzazione celle e moduli e del laboratorio di laser scribing.

Laboratori di caratterizzazione celle e moduli

Per quanto riguarda la caratterizzazione I-V delle celle tandem micromorfe, è stato acquisito un simulatore solare a doppia sorgente. A causa della sensibilità spettrale delle celle micromorfe (Figura 123), una non corretta distribuzione spettrale della sorgente luminosa del simulatore può falsare i risultati della misura del dispositivo. Potrebbe, infatti, determinarsi la saturazione parziale delle singole celle componenti del dispositivo con conseguente limitazione della corrente misurata.

Quasi tutti i simulatori solari impiegano come sorgente luminosa una singola lampada allo xenon di opportuna

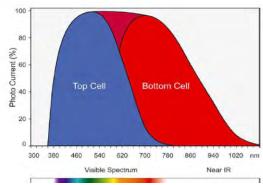


Figura 123. Risposta spettrale di una cella tandem micromorfa

potenza. Purtroppo lo spettro della scarica elettrica nello xenon presenta picchi particolarmente evidenti ad alte lunghezze d'onda e questo determina una distribuzione dell'irradianza nelle varie bande tale da influenzare notevolmente l'esito delle misure su dispositivi a multigiunzione, cosa del resto già verificata sperimentalmente su dispositivi micromorfi. Per ovviare a questo inconveniente è necessario poter "modulare" lo spettro del simulatore in modo da contenere l'entità dei picchi cercando di rispettare le specifiche previste per la classe spettrale di appartenenza della macchina (norma IEC 904-9). Purtroppo per i simulatori a singola lampada questa modulazione è inattuabile perché, pur agendo sulla corrente della lampada o interponendo opportune ottiche, gli effetti si risentono sull'intero spettro alla stessa maniera con un conseguente "declassamento" della macchina. Questo problema trova soluzione nell'utilizzo di un simulatore a doppia lampada nel quale lo spettro viene ad essere il risultato di quello di una lampada allo xenon e di una sorgente alogena con opportune ottiche di filtraggio. Per quanto concerne il nostro campo di interesse si è ritenuto sufficiente l'impiego di una sorgente continua a doppia lampada di classe AAA avente un'area di test dell'ordine dei 100 cm² in modo poter caratterizzare sia celle di piccola area che mini-moduli. A tale riguardo si è provveduto ad un indagine di mercato individuando la miglior soluzione tecnico - economica nel simulatore WXS-156 S-L2 AM 1.5G della Wacom Electric Co. Ltd. (Figura 124), tra l'altro questa macchina è attualmente in uso nei più titolati laboratori di ricerca (JRC Ispra, ISE Fraunhofer Friburgo, IMT Neuchatel, HMI Berlino, ZSW Stoccarda, QCell Research Centre ecc..).



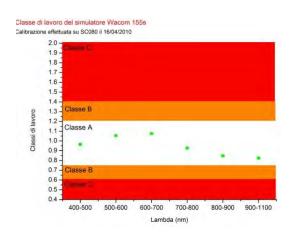


Figura 124. Simulatore dual lamp Wacom WXS-156 S-L2 e sua classe spettrale

Il simulatore è stato installato presso il laboratorio di caratterizzazione del Centro Ticerca ENEA di Portici e quindi sottoposto a collaudo per verificarne la classe di appartenenza (AAA).

La macchina è stata oggetto di una serie di confronti con il simulatore Spectrolab X25 a singola lampada in dotazione allo stesso laboratorio per verificarne a parità di classe le differenze intervenute negli spettri e come questi influenzavano le misure, in particolar modo sulle celle multi giunzione. Con l'ausilio della cella di riferimento disponibile nei nostri laboratori, entrambi i simulatori sono stati impostati per un'irradianza sul piano di test pari a 100 mW/cm² e con lo spettroradiometro sono state effettuate delle misure di spettro dalle quale è emerso che a parità di corrente di calibrazione il simulatore Wacom presenta un integrale dello spettro di 77,12 mW/cm² nell'intervallo di misura dello spettro radiometro di 300-1100 nm contro i 74,79 mW/cm² dello Spectrolab X25 e quindi molto più vicino al valore di 79,69 mW/cm² dello spettro di riferimento AM 1.5 G stabilito nella norma IEC 904-3.

Dalla Figura 125 si può notare come nel simulatore Wacom dual lamp l'irradianza sia distribuita in maniera tale da

attenuare i picchi tipici della lampada allo xenon, compensando nelle zone in cui quest'ultimo ha delle vere e proprie buche, attenuando così lo scarto rispetto allo spettro normativo.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei moduli bisogna sottolineare come la valutazione delle prestazioni dei moduli sia di estrema importanza per l'utente finale, che deve avere garanzie circa la qualità dell'investimento dal punto di vista tecnico. L'affidabilità ed il tempo di vita incidono, infatti, sugli indicatori economici e sul tempo di ritorno dell'investimento.

Si è ritenuto fondamentale acquisire un simulatore di classe BBB per effettuare i test previsti dalla norma EN 61646 sui moduli a film sottili al fine di verificarne le prestazioni a basso irraggiamento, l'esposizione prolungata alla luce (Lightsoaking) e la prova ai surriscaldamenti localizzati (Figura 126). I primi due test costituiscono fattori fondamentali per una corretta valutazione della producibilità dei moduli a film sottile tandem micromorfi.

Un'attività correlata alla qualificazione di moduli a film sottile ha visto la partecipazione di ENEA a gruppi di lavoro internazionali (IEA IEC e CENELEC). Le attività hanno riguardato la predisposizione delle specifiche tecniche per gli standard di accettazione, di energy rating di qualifica dei moduli, di prestazione delle celle e l'elaborazione di uno standard pensato per le applicazioni dei moduli fotovoltaici per l'integrazione in edilizia.

Laboratorio del laser scribing

Il laser patterning è il processo che viene utilizzato per produrre un'integrazione monolitica di celle in pannelli a larga area, con superfici di dimensioni anche maggiori del m². Per ridurre le perdite per resistenza serie che si avrebbero facendo scorrere delle alte

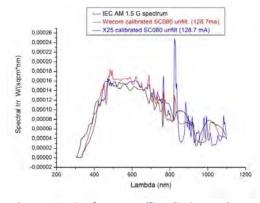


Figura 125. Confronto tra l'irradiazione solare AM 1.5g, lo spettro del simulatore Spectrolab X25 e quello del Wacom WXS-156 S-L2



Figura 126. Simulatore solare di classe BBB

correnti nel dispositivo di larga area si separano sul substrato delle singole celle che vengono interconnesse tra di loro in serie. Ciò si ottiene utilizzando tre tagli laser (*laser scribing*) che consentono di realizzare la struttura mostrata in Figura 127.

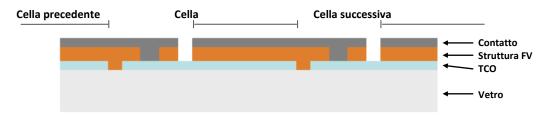


Figura 127. Connessione in serie delle celle

Nell'ambito di questa attività era inoltre previsto l'ammodernamento del banco laser scribing in dotazione al centro di Portici. In particolare sono state sostituite la coppia di tavole motorizzate, la sorgente laser nel verde ed il porta campioni (componenti grigi nella Figura 128). La sorgente è stata quindi sostituita con una di nuova generazione oscillante a 532 nm (2ª armonica del Nd:YAG).

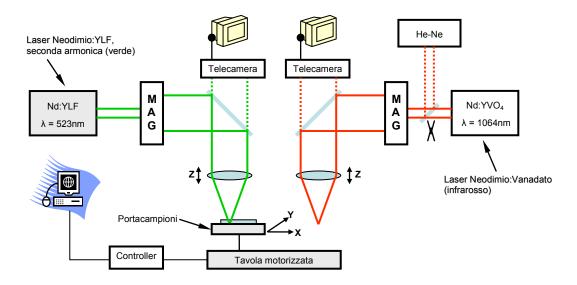


Figura 128. Schema dell'apparato di laser scribing

Rispetto alla precedente, la nuova sorgente presenta una maggiore stabilità dichiarata in energia di singoli impulsi ed una dinamica superiore in termini di potenza media d'uscita, cosa che permette una più agevole ottimizzazione dei parametri per un'incisione di qualità.

Per quanto riguarda la movimentazione, le nuove tavole permettono una maggiore velocità di scorrimento che consente di trovare la condizione di taglio ottimale in un più ampio intervallo di valori di frequenza di ripetizione impulsi. La risoluzione nel posizionamento è di 1,25 μ m mentre l'accuratezza su di un escursione di 300 mm è di soli 7 μ m.

La sostituzione del portacampioni si è resa necessaria principalmente a causa di un inaccettabile "tilt" in Z, quantificabile come circa 200 μ m su 300 mm, sia sui lati in direzione X che Y. Inoltre sono state realizzate due cornici per alloggiare campioni di area 30 x 30 cm² e 10 x 10 cm², in modo da poter posizionare in maniera ripetibile substrati di diversa dimensione.

In figura 129 è riportata la caratteristica I-V di un modulo micromorfo di area 10 x 10 cm² cresciuto su substrato Asahi U-type. L'efficienza misurata è pari a 7,7%, valore inferiore rispetto al previsto 9%. Riteniamo che grazie ad un adeguato numero di prove sperimentali che ottimizzeranno le procedure di taglio, sarà possibile colmare il gap di prestazioni sul modulo.

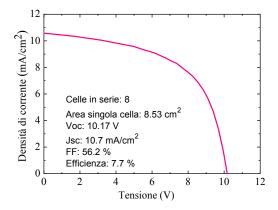


Figura 129. Caratteristica di I-V di uno dei primi moduli micromorfi

Ottimizzazione dei trattamenti superficiali e del processo di laser scribing per film di ZnO

L'attività, che ha lo scopo di sviluppare moduli prototipali con ZnO come elettrodo frontale, è stata svolta attraverso le seguenti fasi:

- ottimizzazione del processo di plasma etching per il trattamento della superficie dello ZnO al fine di migliorare la qualità dell'interfaccia ZnO/p;
- laser scribing dello ZnO e caratterizzazione dei tagli.

Il trattamento superficiale dello ZnO è fondamentale per assicurare l'ottenimento di celle con buone prestazioni elettriche. I trattamenti di plasma etching sono stati effettuati utilizzando due differenti tipologie di gas: argon come gas inerte, ossigeno ed anidride carbonica come gas reattivi per valutare il ruolo che il tipo di gas riveste nel meccanismo di rimozione e di conseguenza sulla risultante morfologia superficiale. In Figura 130 è mostrato il confronto tra la morfologia di un film di ZnO "as grown" ed uno sottoposto ad attacco in plasma di argon. Nell' "as grown" è visibile la tipica testurizzazione dell'ossido di zinco cresciuto per LPCVD, che consiste di grani di forma piramidale, che emergono fuori dalla superficie con facce cristallograficamente ben definite e grani di dimensioni medie intorno a 0,2 µm. Tra i grani larghi sono presenti molti grani piccoli che rendono la superficie molto difettata. Il campione sottoposto a trattamento in plasma mostra uno smussamento dei grani sulla superficie e la rimozione dei grani piccoli, tali fenomeni procedono con l'aumentare del tempo di trattamento fino alla scomparsa della struttura del grano con conseguente riduzione della rugosità.

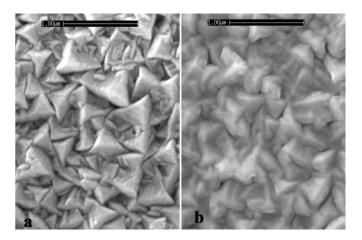


Figura 130. Immagini SEM della superficie di film di ZnO:B depositati per MOCVD: a) film come depositato e b) film sottoposto ad attacco in plasma di argon

Sono state poi realizzate celle solari p-i-n di silicio amorfo utilizzando come elettrodo frontale film di ossido di zinco sottoposti a plasma etching in differenti ambienti gassosi, al fine di valutare l'influenza dei trattamenti superficiali sulle proprietà elettriche del dispositivo fotovoltaico.

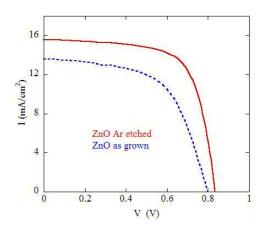


Figura 131. Caratteristica I-V di dispositivi a base di silicio amorfo realizzati su substrati di ZnO senza e con etching della superficie in argon

La Figura 131 mostra a confronto la caratteristica I-V di due dispositivi realizzati su ZnO senza e con trattamento in plasma. I parametri elettrici (Voc, Jsc, FF e resistenza serie) del dispositivo realizzato su ZnO senza trattamento sono estremamente bassi, l'efficienza risultante è del 6,3%. Diversamente, i dispositivi realizzati su ZnO trattato con plasma mostrano un significativo miglioramento di tutti i parametri fotovoltaici: si ottiene in tal caso un'efficienza del 9,1%.

L'attività sperimentale svolta sui trattamenti di plasma etching ha individuato nell'argon la migliore sorgente gassosa per questi trattamenti. In particolare, il plasma in argon avendo una velocità di rimozione più elevata produce una riduzione maggiore della rugosità all'aumentare del tempo di etching, inoltre, i campioni esposti al plasma in argon mostrano un cambiamento della superficie consistente in uno smussamento anisotropo dei grani superficiali che si rivela come la miglior superficie da usare come elettrodo frontale avendo una più ridotta barriera di contatto.

Infine i risultati ottenuti mostrano che il miglioramento dei parametri fotovoltaici dipende prevalentemente dall'efficacia dello smussamento della superficie dello ZnO attraverso il processo di plasma etching e solo in piccola misura dalla natura chimica dell'interazione plasma /ZnO e del tipo di gas di etching.

E' stato, poi, condotto uno studio riguardante il processo di laser scribing dei film di ZnO al fine di ottimizzare le condizioni del processo di taglio. Sono stati eseguiti tagli laser sui film di ZnO con una sorgente Nd:YVO4 (lunghezza d'onda pari a 1064 nm), variando in maniera opportuna i diversi parametri di processo quali: distanza tra il piano focale della lente ed il piano della superficie dello strato da tagliare (defocus distance f o altezza del fuoco), densità di potenza, velocità di avanzamento del campione, intensità di corrente relativa al laser, frequenza di ripetizione.

A titolo di esempio la Figura 132 evidenzia l'influenza della frequenza di ripetizione sulla qualità del taglio. Si nota un graduale aumento sia della larghezza che della profondità del taglio all'aumentare della frequenza di ripetizione ed ancora un aumento della percentuale di sovrapposizione all'aumentare di questo parametro.

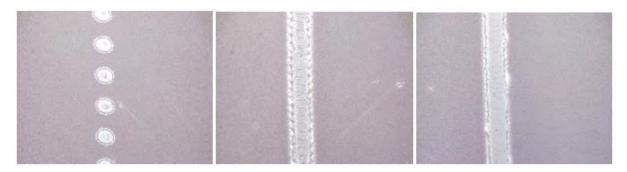


Figura 132. Aumento graduale della sovrapposizione degli spot all'aumentare della frequenza di ripetizione (1000 Hz, 4000 Hz, 7000 Hz). I tagli sono stati eseguiti utilizzando un'intensità di corrente pari a 13,00 A, una velocità di avanzamento pari a 80 mm/s e un'altezza del fuoco pari a 0,80 mm

Altro parametro preso in esame è rappresentato dall'altezza del fuoco. Nella Figura 133 sono riportati la morfologia del taglio ottenuto ad una altezza del fuoco pari a 0,86 mm (a) ed il profilo dello scavo determinato al profilometro (b). Il taglio ottenuto in queste condizioni di back-scribing presenta un isolamento elettrico di circa 30 $M\Omega$ e può essere considerato selettivo.

Si ritiene che ulteriore sperimentazione sia necessaria per ottenere tagli di ampiezza inferiore in modo da massimizzare l'area attiva e, quindi, la resa dei moduli

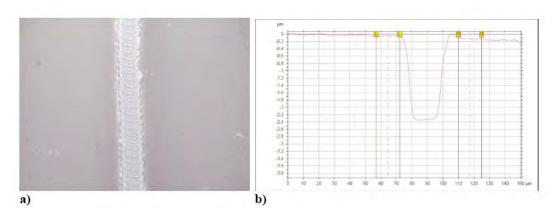


Figura 133. (a) Morfologia di un taglio laser ottimizzato dello ZnO:B e (b) relativo profilo. Le condizioni di taglio usate sono: intensità di corrente di 13,00 A, frequenza di ripetizione di 5000 Hz, velocità di avanzamento di 80 mm/s e defocus distance di 0,86 mm

Per concludere nell'ambito di questo obiettivo sono stati implementati i laboratori di caratterizzazione di celle e moduli ed il laboratorio del laser scribing ottenendo un modulo prototipale con efficienza del 7,7%. Il valore del 9%, previsto, è sicuramente alla portata e si ritiene che nei prossimi mesi tale valore potrà essere raggiunto senza grosse difficoltà. Sono stati ottimizzati i trattamenti superficiali di film di ZnO su area 10x10 cm², più piccola di quella ipotizzata, in quanto non è stato acquisito un nuovo sistema RIE per superfici maggiori (30x30cm²).

D. Studio e sperimentazione di celle a film sottile di silicio su plastica

Attività di trattamento dei substrati polimeri

Nella tecnologia fotovoltaica a film sottile l'uso di substrati flessibili è divenuto di grande interesse per le loro potenzialità di applicazione nell'integrazione architettonica. Il criterio principale per la selezione dei materiali da utilizzare è che essi debbano conservare elevate proprietà meccaniche e stabilità durante tutte le fasi di lavorazione e successivamente durante il loro impiego, in particolare durante la realizzazione del dispositivo. Poiché, la riduzione dei costi nelle tecnologie fotovoltaiche a film sottile è un fattore strategico, nel selezionare il materiale polimerico da utilizzare la scelta è caduta su un polimero termoplastico di basso costo, il polietilenetereftalato (PET), la cui temperatura di utilizzo è compatibile con quelle generalmente utilizzate per la deposizione del silicio amorfo e/o microcristallino tra i 140 ed i 170°C.

Il polimero utilizzato è semicristallino, ottenuto in film per estrusione ed avente uno spessore di $125 \mu m$. E' stata effettuata la caratterizzazione delle proprietà termiche, strutturali e della morfologia superficiale del polimero per poter meglio valutare le più opportune tecniche di condizionamento chimico-fisico della superficie per la successiva realizzazione del dispositivo fotovoltaico.

L'ottimizzazione del substrato polimerico è stata effettuata nell'ottica di realizzare dispositivi a film sottile in configurazione cosiddetta "substrato", facendo, cioè, incidere la radiazione solare dalla parte opposta rispetto al substrato.

Poiché la superficie di un film polimerico è usualmente idrofobica ed inattiva a reazioni chimiche, è difficile crescere film su tali substrati e comunque l'adesione di essi alla superficie è molto debole. In precedenti attività sperimentali un sottile strato attivo intermedio, a base di silica-like, era stato depositato sulla superficie di un film polimerico prima della deposizione dell'elettrodo metallico allo scopo di migliorare l'adesione tra il substrato polimerico e tale elettrodo. Sottili film di silica-like erano stati preparati utilizzando un processo sol-gel. Il film ottenuto non era una pura silica inorganica ma un film di silica modificato con gruppi organici con elevata adesione al substrato, inoltre, la superficie del polimero ricoperta di silica-like presentava una più elevata idrofilicità.

L'attività svolta nella presente sperimentazione ha riguardato lo studio e lo sviluppo di processi di testurizzazione idonei ad ottenere substrati con superfici di appropriata rugosità, in grado di migliorare le proprietà di light-

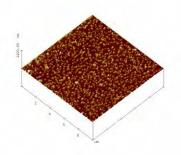


Figura 134. Immagine AFM della superficie di nanoparticelle di silice depositate su substrato di PET modificato con *silica-like*

scattering del substrato ed ottenere più elevate correnti nel dispositivo fotovoltaico. Nanoparticelle di silicio funzionalizzate (npF) con gruppi amminici sono state usate per impartire rugosità e funzionalità chimiche alla superficie del PET modificato con silica. Le nanoparticelle di silicio disperse in un solvente polare sono state depositate sul film di PET modificato mediante spin-coating. Un'immagine AFM della morfologia superficiale è mostrata in Figura 134.

Le nanoparticelle, aventi dimensioni medie di circa 100 nm, tendono a formare agglomerati di qualche micron. Tali agglomerati sono distribuiti uniformemente e creano rugosità micrometriche sulle superfici. Sono state realizzate strutture PET/silica-like/npF/Ag. La forza di adesione dell'argento depositato sulla struttura PET/silica-like testurizzata è stata misurata, ottenendo un valore, circa 10 volte superiore rispetto al valore (12 kg/cm²) ottenuto con argento depositato direttamente su

polimero. Dall'analisi ottica emerge che le strutture realizzate hanno buone proprietà di scattering con un fattore di Haze del 20% ed una capacità di scattering della luce molto elevata anche a lunghezze d'onda superiori ad 800 nm. La struttura ottimizzata PET/silica-like/npF/Ag può essere valutata un appropriato back reflector capace di ottenere un elevato confinamento ottico della luce in celle solari a film sottile di silicio.

Sviluppo di strati n altamente trasparenti e loro utilizzo nei dispositivi

Nello sviluppo di celle solari su substrato polimerico si deve tener presente che in generale le plastiche sono poco resistenti alla radiazione ultravioletta. Per tale motivo è preferibile illuminare i dispositivi non dal substrato, come viene comunemente fatto quando si utilizzano supporti di vetro, ma dalla direzione opposta. Si è deciso allora di crescere film di silicio microcristallino di tipo n altamente conduttivi e trasparenti da utilizzare come strato finestra per le celle solari di tipo p-i-n. Lo strato finestra è infatti uno strato molto importante in quanto la radiazione solare lo attraversa prima di penetrare nello strato intrinseco dove avviene l'assorbimento della luce. Per questo motivo tale strato deve essere molto trasparente e avere una conducibilità elevata e tali richieste sono tra loro conflittuali. Si è valutata la possibilità di utilizzare film di tipo n di ossido di silicio (SiO_x:H) che, come già discusso

per l'obiettivo A, consentono di essere drogati efficacemente e di essere più trasparenti rispetto agli strati di silicio microcristallino generalmente utilizzati nei dispositivi.

Sono state valutate le proprietà di strati preparati utilizzando diversi regimi di crescita. In particolare sono state cresciute tre serie di film, utilizzando due diverse diluizioni di idrogeno (H₂/SiH₄=100, 200), due valori della pressione di deposizione (1,9 e 3 Torr) e variando il rapporto CO₂/SiH₄ in modo da variare il contenuto di ossigeno nei film. Dalla Figura 135 si può osservare che la diminuzione della conducibilità con l'incremento del contenuto di ossigeno nei film ha andamento diverso a seconda delle condizioni di pressione e diluizione di idrogeno utilizzati.

In particolare a parità di CO₂/SiH₄ le conducibilità sono maggiori ad alta pressione ed ad alta diluizione.

Le proprietà ottiche dei campioni sono mostrate nella Figura 136. Per le tre serie di ossido di silicio, l'indice di rifrazione si riduce all'aumentare della quantità di ossigeno incorporato nel materiale, ma i valori più bassi di n sono stati misurati per la serie cresciuta utilizzando la più bassa pressione di deposizione (1,9 Torr) e la più alta diluizione di idrogeno (H₂/SiH₄=200). I materiali cresciuti in tali condizioni sono anche i più trasparenti, come evidente dalla Figura 136b dove è riportato il valore E04 (energia alla quale il coefficiente di assorbimento assume il valore 104 cm⁻¹) in funzione del rapporto CO₂/SiH₄. Evidentemente le condizioni di crescita utilizzate per tale serie consentono una maggiore facilità di incorporazione dell'ossigeno. Si è deciso di testare tali strati di SiOx:H (H₂/SiH₄=200, p=1,9Torr) quali strati n nei

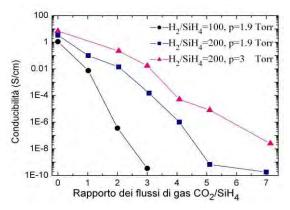


Figura 135. Andamento della conducibilità in funzione del rapporto CO₂/SiH₄ per le tre serie di campioni analizzati

dispositivi p-i-n in quanto per essi hanno mostrato valori di conducibilità elettrica sufficientemente elevati e proprietà ottiche molto interessanti. Infatti essi sono molto trasparenti e hanno bassi indici di rifrazione che consentono di ridurre le perdite di riflessione alla loro superficie, avendo un valore di n intermedio tra quelli caratteristici del TCO e del silicio.

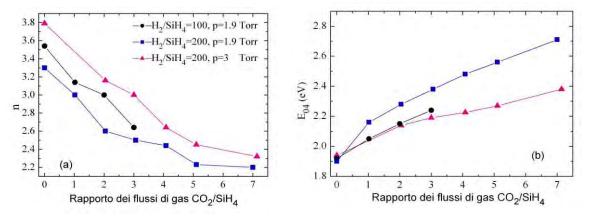


Figura 136. (a) Indice di rifrazione e (b) E04 in funzione del rapporto CO₂/SiH₄ per le tre serie di campioni analizzati

In una prima fase di sperimentazione sono state fabbricate celle p-i-n di silicio amorfo su substrato di vetro in configurazione standard, illuminandole cioè dallo strato p, al fine di valutare l'idoneità degli strati di ossido di silicio quali strati di tipo n in dispositivi standard. Le prestazioni delle celle p-i-n su vetro con strato n di SiOx:H sono state quindi confrontate con quelle di celle cresciute utilizzando film standard di tipo n di silicio microcristallino. Nella Figura 137 sono mostrati i parametri elettrici valutati sulle celle fabbricate con diversi strati n. In particolare gli strati n sono stati depositati variando il rapporto CO₂/SiH₄ nell'intervallo da 0 a 4. Come si vede le celle con strato n di ossido di silicio sono migliori rispetto a quelle ottenute utilizzando film di tipo n standard. Tali strati, grazie all'effetto combinato di conducibilità appropriate, buona trasparenza e bassi indici di rifrazione, consentono di ottenere migliori valori di corrente e fill factor e di incrementare fino a un massimo del 13,6% l'efficienza delle celle rispetto a quelle con strato n di tipo standard.

In conclusione nel quadro di questo obiettivo sono stati messi a punto trattamenti di testurizzazione di substrati polimerici, realizzati film di ossido di silicio di tipo n altamente trasparenti idonei alla fabbricazione di dispositivi.

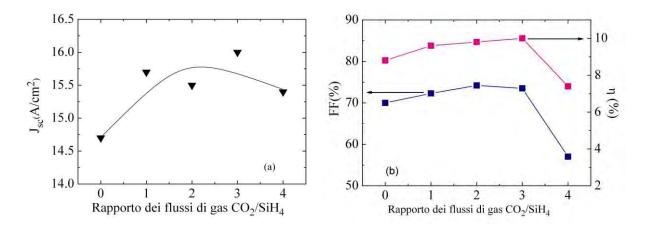


Figura 137. (a) Corrente di corto circuito, (b) Fill Factor ed efficienza di celle p-i-n in silicio amorfo su vetro cresciute con diversi strati n depositati variando il rapporto CO₂/SiH₄

E. Studio e sperimentazione di un processo per la realizzazione di celle polimeriche in atmosfera controllata

L'attività ha riguardato l'allestimento di un nuovo laboratorio per la realizzazione di celle fotovoltaiche polimeriche in atmosfera controllata, lo studio dei fattori che influenzano l'efficienza del dispositivo (in particolare la corrente di corto circuito) e la messa a punto di un processo per la realizzazione dei dispositivi.

Poiché in letteratura è riportato che questo tipo di dispositivi degrada rapidamente quando esposto all'aria (per effetto dell'ossigeno e dell'umidità normalmente presenti in essa), per poter migliorare significativamente le efficienze di conversione di questi dispositivi, è opportuno condurre gli step critici di processo in atmosfera inerte (azoto) con un contenuto di ossigeno ed umidità che devono essere inferiori ad 1 ppm.

Pertanto è stato acquisito ed installato un sistema composto da due glove box (4+3 guanti) che opera in atmosfera di azoto con sistema di purificazione e controllo di acqua ed ossigeno (contenuti inferiori ad 1 ppm) ed un evaporatore termico integrato in esso per la deposizione del contatto metallico. Questo sistema consente di effettuare le seguenti operazioni principali: pesatura materiali di partenza (tramite una bilancia analitica), dissoluzione dei materiali in solventi organici (tramite una piastra agitante/riscaldante), spinning delle soluzioni su substrati di vetro, plastica o lastre solidi sottili (tramite spin coater) ed evaporazione di contatti metallici o di solidi ionici (tramite evaporazione termica). Il sistema permette pertanto di realizzare il dispositivo fotovoltaico finale a partire da materiali di partenza (stabili all'aria o forniti in opportuni contenitori con atmosfera protettiva).

Inoltre il laboratorio è stato completato con altre attrezzature per il trattamento preliminare dei campioni da processare (cappa chimica) e per una prima caratterizzazione (in situ) dei dispositivi finali ottenuti.

Parallelamente alla implementazione del laboratorio sono proseguite le attività di studio e sperimentali con le attrezzature già disponibili. E' stato messo a punto un modello ottico con lo scopo di investigare l'effetto dello spessore dello strato attivo sulla corrente di corto circuito del dispositivo. Sono stati determinati gli indici di rifrazione e i coefficienti di estinzione di ciascuno strato della struttura e successivamente si è calcolato l'assorbimento dello strato attivo al variare del suo spessore. Da questi dati è stato ottimizzato lo spessore dello strato attivo in modo da migliorare la corrente di corto circuito e l'efficienza di conversione finale del dispositivo.

Sono state realizzate celle solari, utilizzando materiali disponibili in commercio e già usati con successo da altri gruppi di ricerca. Sono state affrontate le varie problematiche connesse con la deposizione dei materiali polimerici, il controllo della loro morfologia, la realizzazione dei contatti e la caratterizzazione dei dispositivi. E' stata realizzata una cella fotovoltaica polimerica con efficienza di conversione pari al 2,9% (V_{oc} 635 mV, J_{sc} 8,51 mA/cm², FF 53.6%). Il prototipo è stato ottenuto partendo da un blend di poly(3-hexylthiophene) (P3HT) e 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(6,6)C₆₁ (PCBM), entrambi commerciali ed implementando alcuni passi del processo precedentemente messo a punto in una glove box. La struttura del dispositivo è VETRO/ITO/PEDOT:PSS /P3HT:PCBM/Al con un'area attiva di 0,80 cm² (Figura 138). Considerata l'area del dispositivo, il risultato raggiunto è degno di nota.

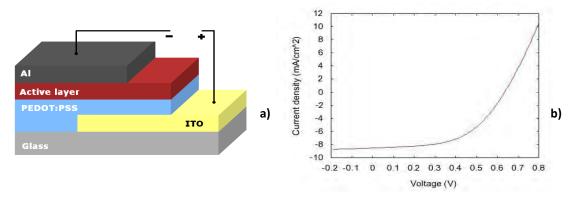


Figura 138. (a) Struttura della cella polimerica e (b) caratteristica I-V della migliore cella realizzata

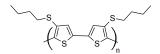
Si prevedono margini di miglioramento ottimizzando gli step di deposizione e conducendo l'intero processo nel nuovo sistema di glove box con evaporatore termico integrato.

F. Studio e sperimentazione di nuovi materiali polimerici o ibridi organici-inorganici per celle fotovoltaiche

In collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università di Modena e Reggio Emilia è stata avviata la sintesi di nuovi materiali da testare in dispositivi fotovoltaici. Le attività svolte sono sintetizzate nel seguito.

1. Sintesi e caratterizzazione di poli[4,4'-bis(butilsulfanil)-2,2'-bitiofene]

Il poli[4,4'-bis(butilsulfanil)-2,2'-bitiofene] è stato ottenuto, con una resa del 79% per polimerizzazione ossidativa con FeCl₃ dal corrispondente dimero simmetrico. Su vari batch di campione, prima e dopo il trattamento con idrazina ed EDTA, sono stati



determinati i pesi molecolari con Gel Permeation Chromatography (GPC) e la percentuale di metalli (Fe, Pd, Ag) utilizzando uno spettrometro di massa quadrupolare con sorgente al plasma (ICP-MS). Sono inoltre state eseguite le analisi con risonanza magnetica nucleare (¹H-NMR, ¹³C-NMR, HSQC, HMBC), spettroscopia infrarossa (IR) e spettroscopia UV-Visibile (UV-Vis).

2. Sintesi e caratterizzazione di poli[9,9-diottilfluorene-alt-4,4'-bis(alchilsulfanil)-2,2'-bitiofeni]

Il poli[9,9-diottilfluorene-alt-4,4'-bis(butilsulfanil)-2,2'-bitiofene] ed il poli[9,9-diottilfluorene-alt-4,4'-bis(ottilsulfanil)-2,2'-bitiofene] sono stati ottenuti attraverso accoppiamento di Suzuky dei rispettivi bitiofeni dibromurati alle posizioni 5- e 5'- con l'estere boronico commerciale del diottilfluorene. Anche su questi polimeri sono state effettuate diverse analisi al fine di investigare la struttura, le tracce di metalli (Pd e Ag), i pesi molecolari e le proprietà ottiche dei polimeri: 1H-NMR, 13C-NMR, HSQC, HMBC, GPC, spettroscopia IR e UV-Vis, ICP-MS.

In collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento sono stati sintetizzati nano cristalli colloidali di CdSe/CdS e CdSe/CdTe a forma di nanorods e di tetrapods. Per la preparazione di nanorods colloidali di CdSe/CdS con una bassa distribuzione delle dimensioni in lunghezza e diametro, è stata sviluppata una procedura di sintesi, detta crescita "seeded-type" (crescita mediata da nuclei, ovvero semi). I nanorods ottenuti presentano un'elevata luminescenza variabile con la dimensione, hanno una forma molto regolare, tendono ad assemblarsi spontaneamente sui substrati e possono essere facilmente organizzati in film impacchettati su larga area. La sintesi è basata sulla co-iniezione di precursori appropriati e semi di nanocristalli di CdSe sferici monodispersi in un pallone di reazione che contiene una miscela di tensioattivi caldi adatti alla crescita anisotropica di nanocristalli di CdS. Il punto di forza della "seeded-growth" consiste nel rendere possibile la preparazione nanorods con un grande aspect ratio che conservano però una forma regolare e nessuna tendenza all'aggregazione. Tutte queste caratteristiche non possono essere ottenute con gli approcci standard. Questa procedura di sintesi porta inoltre alla formazione di nanorods con pochi difetti strutturali, come ad esempio stacking faults lungo la struttura del rod.

La preparazione di tetrapods con una buona resa nella forma è notoriamente difficile, infatti la maggior parte delle procedure porta alla formazione di una miscela di rods, dipodi, tripodi e tetrapods. Un modo per aggirare il problema della poli-dispersione nella forma e dimensione dei tetrapods è quello di applicare l'approccio della crescita "seeded-growth", già applicata con successo alla preparazione di nanorods. Nel progetto è stato

sviluppato un approccio generale per la sintesi di nanocristalli colloidali a forma di tetrapods combinando materiali semiconduttori del gruppo II-VI, utilizzando semi preformati di strutture sphalerite sulle quali si formano braccetti di wurzite esagonale semplicemente co-iniettando i semi e i precursori chimici in una miscela di tensioattivi caldi. Per il core dei tetrapods si è scelto di utilizzare il CdSe poiché nanocristalli di questo materiale possono essere preparati nella fase sphalerite e anche perché hanno una buona resa quando vengono utilizzati come semi per la crescita dei tetrapods; d'altro canto, il materiale migliore per la crescita dei braccetti risulta essere il CdTe.

I nanorods di CdSe/CdS e i tetrapods di CdSe/CdTe sono stati testati come materiali foto attivi per la fabbricazione di celle fotovoltaiche ibride basate su nanocristalli e materiali organici al fine di superare i principali limiti che caratterizzano i materiali attualmente impiegati. In particolare l'utilizzo di nanocristalli colloidali come materiali fotoattivi in celle fotovoltaiche può portare ad un incremento delle prestazioni dei dispositivi migliorando l'assorbimento dello spettro solare e il trasporto di carica agli elettrodi. Inoltre i nanocristalli colloidali sono disponibili in soluzione quindi compatibili con la tecnologia dei dispositivi polimerici realizzati mediante processi di spin-coating.

I nanorods colloidali inorganici in combinazione con un polimero coniugato, poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT), sono stati testati come materiali attivi per la fabbricazione di celle fotovoltaiche. Per migliorare la solubilità di nanocristalli è stata utilizzata una miscela di solventi, in cui una delle componenti è rappresentata dal tensioattivo dei nanocristalli; questa tecnica permette di controllare la dispersione dei nanocristalli nel polimero. A questo scopo viene utilizzato un particolare tensioattivo che si lega debolmente alla superficie dei nanocristalli e che può essere rimosso una volta formato il film attraverso un trattamento termico. In questo modo si facilita il contatto tra polimero e nanocristalli permettendo che avvenga la separazione di carica all'interfaccia tra i due materiali. I nanorods in piridina vengono miscelati con P3HT in diversi rapporti col fine di ottenere un film uniforme una volta depositato per spin-coating. I dispositivi fotovoltaici vengono preparati depositando per spin-coating una soluzione di nanorods di CdS e P3HT nella miscela di piridina e cloroformio su dei substrati di ossido di indio stagno (ITO) trasparente che funge da anodo per il dispositivo. La fabbricazione del dispositivo viene completata con l'evaporazione termica di uno strato di alluminio spesso circa 120 nm che funge da catodo. I dispositivi vengono quindi sigillati utilizzando un sistema di incapsulamento che provvede alla protezione del dispositivo da contaminanti presenti in aria. L'efficienza massima ottenuta per questi dispositivi è dello 0,15% con un FF pari a 0,34, una V_{oc} di 0,7 V e una Jsc di 0,63 mA/cm².

Sono stati fabbricati inoltre dispositivi fotovoltaici in cui tetrapods di CdSe/CdTe, sintetizzati con la tecnica di crescita "seeded-type", fungono da materiale donore di elettroni. La struttura del dispositivo consiste in un bilayer formato da uno strato di nanocristalli di CdSe/CdTe e uno strato di fullerene (C_{60}) evaporato termicamente. Il C_{60} funge da elettron-accettore e strato trasportatore di elettroni. Le prestazioni di questi dispositivi vengono sostanzialmente incrementate rispetto ai dispositivi in cui i tetrapods vengono utilizzati come singolo strato oppure combinati con il poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) in un dispositivo tipo bulk heterojunction (BHJ). L'utilizzo dello strato di C_{60} , materiale con un'elevata affinità elettronica ed una grande lunghezza di diffusione dell'eccitone, permette infatti di migliorare la percolazione degli elettroni al catodo. L'efficienza massima ottenuta per questi dispositivi è dello 0,62% con un FF pari a 0,46, una V_{oc} di 0,43 V e una J_{sc} di 3,15 mA/cm².

Per quanto riguarda la progettazione di nuovi materiali, sono state utilizzate tecniche di modeling molecolare per lo studio di molecole potenzialmente idonee al miglioramento delle prestazioni delle celle organiche. Sono stati studiati i livelli LUMO dei bis-addotti del Phenyl-C₇₁-Butyric-Acid-Methyl Ester (bis[70]PCBM) per verificare se questi fullereni potessero essere usati come accettori di elettroni nelle celle solari polimeriche. I livelli LUMO calcolati per i mono-addotti del [70]PCBM sono simili a quelli del [60]PCBM, largamente usato in questo tipo di dispositivi. Per quanto riguarda i bis-addotti del [70]PCBM, possono essere ottenuti più isomeri ma i calcoli mostrano che i livelli LUMO sono energeticamente molto simili tra loro. Ciò è importante perché per un corretto funzionamento del dispositivo occorre evitare la presenza di trappole per gli elettroni. I livelli LUMO per gli isomeri del bis-[70]PCBM sono più alti rispetto ai mono-addotti e quindi possono aumentare la Voc dei corrispondenti dispositivi P3HT-fullerene. In aggiunta, poiché queste molecole hanno un assorbimento più marcato nell'UV-Visibile, possono anche migliorare la J_{sc}.

G. Studio e sperimentazione di film sottili policristallini Cu₂-II-IV-VI₄ per la realizzazione di celle fotovoltaiche

o Scelta, acquisizione ed installazione di apparati per la crescita di film policristallini di Cu₂ZnSnS₄ idonei all'utilizzo nei dispositivi solari

Nella prima fase dell'attività sono state definite le specifiche tecniche dell'apparato di sputtering da acquisire per la deposizione dei materiali necessari per il progetto. Si è scelto un sistema con tre sorgenti magnetron sputtering

per target da 4 pollici montate in configurazione confocale e cioè puntate tutte e tre verso un portacampioni rotante capace di ospitare substrati da 10x10 cm². Con questa configurazione è possibile depositare dei precursori anche per co-sputtering.

Non avendo ancora a disposizione il sistema di sputtering per la deposizione dei precursori si è deciso di utilizzare un sistema di evaporazione e-beam (Balzer BAK640) disponibile presso i laboratori ENEA. Si tratta di un sistema di ottimo livello anche se datato: il vuoto viene fatto da una criopompa ad elio e la camera contiene un grande planetario in rotazione che assicura una ottima omogeneità anche su campioni di aree superiori a 10x10 cm². Tutti i processi sono controllati da un VAX Digital con un software complesso e non modificabile.

\circ Messa a punto di processi di crescita di film policristallini Cu_2 -II-IV-VI $_4$ idonei all'utilizzo nei dispositivi solari

Nonostante le difficoltà tecniche incontrate si sono comunque prodotti vari film di precursori che sono stati poi solforizzati per ottenere circa venti film di Cu₂ZnSnS₄ (CZTS). I film ottenuti in questo modo sono stati caratterizzati tramite misure di diffrazione X (effettuate anche in collaborazione con l'Università di Trento), misure ottiche (trasmittanza, riflettanza e spettroscopia Raman effettuate in collaborazione con l'Università di Roma "La Sapienza") e misure delle proprietà elettriche (conducibilità e mobilità).

I campioni prodotti possono essere divisi sostanzialmente in due gruppi. Il primo gruppo comprende i primi 5 campioni. Questi campioni derivano da precursori in cui le percentuali dei metalli evaporati sono state controllate basandosi semplicemente sulle masse misurate dalla bilancia al quarzo installata nell'evaporatore senza tentare di tarare i "tooling factors" della bilancia mediante misure di spessore dei film evaporati. I campioni ottenuti in questo modo mostrano ai raggi X, oltre ai picchi corrispondenti alla struttura voluta del Cu₂ZnSnS₄, la probabile presenza di una fase spuria tipo SnS. La presenza di SnS è confermata dal Raman e in uno dei campioni (K5, Figura 139) in maniera particolarmente evidente. Tuttavia le misure di EDX danno per uno dei campioni una composizione abbastanza vicina a quella stechiometrica e anche le misure ottiche forniscono buoni risultati (la trasmittanza mostra un valore sufficientemente alto ad energie inferiori alla gap e la presenza di frange di interferenza).

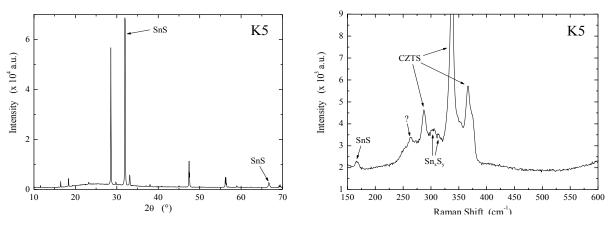
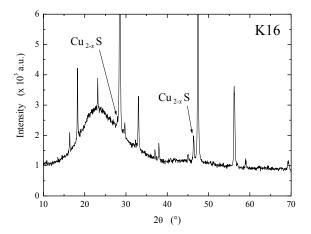


Figura 139. a) Spettro di diffrazione X e (b) spettro Raman relativo al campione K5

La presenza del SnS ha però indotto a cercare di migliorare la situazione tarando i tooling factors per avere un miglior controllo delle quantità di metalli depositate nei precursori. Come risultato nei campioni successivi i picchi del SnS sono scomparsi dai raggi X e dal Raman ma sono comparsi i picchi relativi alla presenza di Cu_{2-x}S (Figura 140). Questi campioni non mostrano più frange di interferenza e presentano un notevole calo della trasmittanza sotto gap. Inoltre hanno una conducibilità nettamente più elevata dei precedenti. In effetti tutti i vari solfuri Cu_{2-x}S (dalla calcocite con x<0.01 fino alla covellite con x=1) hanno tipicamente una concentrazione di difetti e di buche libere così alte da indurre un forte assorbimento ottico anche nell'infrarosso spiegando in questo modo i risultati delle misure ottiche ed elettriche.

Misure di composizione EDX effettuate su questo secondo gruppo di campioni mostrano un notevole deficit di stagno, un eccesso di zinco ed in molti casi anche un eccesso di rame.



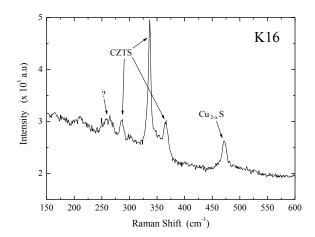


Figura 140. a) Spettro di XRD e (b) spettro Raman relativo al campione K16

In definitiva le caratterizzazioni effettuate sui film cresciuti fino ad ora mostrano che hanno tutti una larga parte del materiale corrispondente alla struttura voluta del Cu₂ZnSnS₄ ma che non si è ancora raggiunto il necessario controllo della stechiometria del film e che sono presenti fasi spurie in concentrazioni significative. Questo difetto nella stechiometria è probabilmente la causa delle cattive proprietà elettriche ottenute dalle misure di effetto Hall. L'ottimizzazione dei processi di crescita è comunque appena iniziata e a breve si prevede di ottenere buoni risultati.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Genova - Dipartimento di Fisica

L'attività svolta si è incentrata sullo studio dei processi di crescita auto-organizzata di array di nanoparticelle metalliche con funzionalità plasmonica, allo scopo di implementare strategie di "photon harvesting" in dispositivi fotovoltaici a film sottile. La sintesi auto-organizzata di nanostrutture periodiche è ottenuta tramite irraggiamento ionico defocheggiato (IBS - Ion Beam Sputtering) di un substrato dielettrico o di un film di metallo nobile supportato, oppure tramite agglomerazione controllata (deposizione ad angoli radenti) su substrati pre-strutturati.

Università di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Chimica

Il Dipartimento di Chimica dell'Università di Modena e Reggio si è occupato delle sintesi di nuovi materiali da testare in dispositivi fotovoltaici. In particolare è stata avviata la sintesi e la caratterizzazione di poli[4,4'-bis(butilsulfanil)-2,2'-bitiofene] e di poli[9,9-diottilfluorene-alt-4,4'-bis(butilsulfanil)-2,2'-bitiofene].

Università del Salento - Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione

Nell'ambito della collaborazione sono stati sintetizzati nanocristalli colloidali di CdSe/CdS e CdSe/CdTe a forma di nanorods e di tetrapods. I nanorods di CdSe/CdS e i tetrapods di CdSe/CdTe sono stati entrambi testati come materiali foto attivi per la fabbricazione di celle fotovoltaiche ibride basate su nanocristalli e materiali organici.

Università di Trento - Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali)

La collaborazione ha avuto come obiettivo la caratterizzazione strutturale mediante XRD di film sottili conduttori a base di rame. La diffrazione a raggi X è stata utilizzata per determinare la corretta formazione della fase voluta e l'eventuale presenza di fasi spurie. I risultati delle caratterizzazioni XRD sono stati messi in correlazione con quelli delle caratterizzazioni ottiche ed elettriche e sono stati usati per l'ottimizzazione del processo di crescita dei materiali.

Università "La Sapienza" di Roma - Dipartimento di Fisica

L'attività è stata finalizzata alla valutazione dei diversi metodi ottici di caratterizzazione (misure di riflettanza e trasmittanza, di fotoluminescenza e di microraman) utili per determinare il valore ed il tipo di gap, l'eventuale presenza di fasi spurie e di difetti reticolari. Si è evidenziato che le misure di spettroscopia Raman e di

spettrofotometria sono estremamente utili per ottimizzare il processo di crescita dei materiali. In particolare la spettroscopia Raman ha fornito informazioni preziose e complementari a quelle della diffrattometria X per determinare le fasi presenti nei campioni e per correlare le informazioni strutturali con quelle ottiche ed elettriche

Nuovo nucleare da fissione

Il prodotto finale delle attività del presenta tema di ricerca è costituito da una serie di attrezzature e prove sperimentali, programmi e piattaforme di calcolo, analisi di sistema e di sicurezza, progettazioni concettuali di sistemi e componenti per impianti evolutivi/innovativi, sviluppo di tecnologie per il trattamento e lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi, studi, valutazioni di opzioni scientifiche e tecnologiche, ecc.. A tali prodotti si accompagna un'azione di formazione scientifica e di comunicazione sui vari aspetti dell'utilizzo dell'energia nucleare.

Occorre sottolineare che le attività descritte nel presente tema erano state pianificate ed eseguite prima dell'incidente avvenuto in Giappone ed erano finalizzate a fornire al Governo elementi necessari a supportare il processo decisionale relativo alla reintroduzione dell'opzione nucleare nel nostro Paese.

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

La terza generazione - costituita da reattori già certificati e disponibili sul mercato - comprende i reattori avanzati ad acqua naturale. Alcuni di questi sono già in funzione in Giappone, come l'Advanced Boiling Water Reactor (ABWR da 1400 MWe progettato da General Electric e Hitachi), mentre altri - come gli European (o Evolutionary) Pressurized - Water Reactor (EPR da 1.600 MWe fornito da AREVA) e l'Advanced Passive AP1000 della Westinghouse - sono in fase di costruzione in Europa e in Asia. Industrie italiane (ad es. ENEL, Ansaldo Nucleare, Mangiarotti Nuclear, ecc.) stanno già partecipando alla loro progettazione e realizzazione in altri paesi dell'Unione Europea. Esiste poi una classe di reattori evolutivi rispetto ai precedenti - noti come reattori di Generazione III+ - fra i quali spiccano i reattori di piccola o media taglia di tipo modulare (SMR) che hanno recentemente guadagnato l'attenzione sia dei Paesi in via di sviluppo sia l'interesse di operatori elettrici di limitata dimensione, per le loro potenziali caratteristiche di elevata sicurezza, facilità di trasporto, costruzione e ridotto rischio economico - finanziario

Gli studi che attualmente vengono svolti in Italia riguardo ai reattori di generazione III e III+, sono soprattutto rivolti alle analisi ed alle verifiche sperimentali che siano rilevanti per valutarne la sicurezza.

Tra i reattori di quarta generazione, invece, alcuni sono ancora allo stadio concettuale mentre altri come MYRRHA (LFR - ETPP) ed ASTRID (DEMO SFR) sono già in una fase di progettazione avanzata, in vista di richiedere all'autorità di sicurezza l'autorizzazione alla costruzione ed esercizio nel 2014. I reattori di quarta generazione nascono a seguito di un'iniziativa avviata dal Department of Energy nel gennaio 2000, allorquando dieci paesi si sono uniti per formare il Generation IV International Forum (GIF) col fine di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, cioè i sistemi che potranno divenire operativi fra circa 30 anni, subentrando all'attuale generazione di reattori a neutroni termici refrigerati ad acqua.

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

Occorre sottolineare che le attività descritte nel presente capitolo erano state pianificate ed eseguite prima dell'incidente avvenuto in Giappone ed erano finalizzate a fornire al Governo elementi necessari a supportare il processo decisionale relativo alla reintroduzione dell'opzione nucleare nel nostro Paese.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il tema "Nuovo nucleare da fissione riguarda:

- attività di R&S e studi nel campo dei reattori nucleari da fissione di generazione III+ e IV, incluso il relativo ciclo del combustibile, sviluppati nell'ambito di programmi internazionali e comunitari;
- attività di R&S relative alle fenomenologie di base di dispersione di contaminanti in un deposito definitivo di rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo di rifiuti di III categoria;

- attività di supporto all'Autorità di sicurezza per gli iter autorizzativi e comparazione delle differenti opzioni scientifiche e tecnologiche;
- formazione scientifica e funzione Advisor in tema di energia nucleare.

Gli obiettivi programmatici dell'intero progetto sono a breve, medio e lungo termine, e precisisamente:

A breve termine: contribuire a mantenere le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per la ricerca nel settore nucleare in Italia, con particolare attenzione agli studi sulla sicurezza dei reattori. Sviluppare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche, in particolare dal punto di vista della sicurezza e della sostenibilità anche grazie ad accordi bilaterali con grandi istituzioni di ricerca quali il CEA e l'IRSN francesi, i laboratori del DOE americano, ecc., consentire all'Italia di partecipare a pieno titolo alle grandi iniziative di R&S internazionali/europee (GIF, INPRO, IFNEC, SNETP, ESNII, EERA, programmi EURATOM, ecc.) sul nuovo nucleare.

A medio termine: supportare il sistema di ricerca nucleare italiano per lo sviluppo di reattori di IV generazione e relativo ciclo del combustibile in termini di competenze, infrastrutture di ricerca, laboratori, processi di qualificazione, ecc. Conservare ad alto livello le competenze sul nucleare da fissione per rendere possibile la valutazione di progetti di reattori evolutivi proposti in ambito internazionale:

Nel lungo termine: sfruttare le competenze e le infrastrutture di ricerca così sviluppate per partecipare a pieno titolo alla progettazione, realizzazione ed operazione di un prototipo dimostrativo di sistemi nucleari di quarta generazione a ciclo chiuso quale il *Lead-cooled Fast Reactor* in ambito *European Sustainable Nuclear Industrial Initiative* e GIF, nonché a grandi iniziative europee per la gestione in sicurezza e la minimizzazione dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita.

Anche per le attività relative allo smaltimento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi sono stati individuati obiettivi a breve, medio e lungo termine, e precisamente:

A breve termine: definire la reale ed oggettiva situazione italiana attraverso una revisione del lavoro svolto in passato dai vari soggetti interessati; eseguire studi e ricerche;

A medio termine: fornire, sulla base delle attività avviate o definite nel breve termine, i servizi scientifici e tecnologici volti, in generale, al performance assessment, alla Valutazione Ambientale Strategica e alla Valutazione di Impatto Ambientale, allo studio di scenari ed alle analisi territoriali specifiche, alla definizione dei criteri di accettabilità dei rifiuti nell'installazione, all'individuazione dei sistemi di trattamento e condizionamento, alle valutazioni di radioprotezione, alla sicurezza (Safety & Security) e gestione delle potenziali emergenze, alla comunicazione, alla formazione, etc. In particolare, si tratta anche di ricostituire il sistema di collaborazioni che negli anni scorsi portarono allo sviluppo di metodologie e di procedure atte all'individuazione del sito ed alla realizzazione dell'impianto di smaltimento ed al suo rilascio finale.

Nel lungo termine: mettere a disposizione competenze specifiche per la definizione, in collaborazione con le amministrazioni preposte e le autorità competenti, dei criteri di progetto, del "Progetto di Massima" ed il "Rapporto preliminare di Sicurezza", la preparazione di normativa tecnica, l'elaborazione di procedure per la caratterizzazione dei rifiuti da conferire al sito e la loro categorizzazione (in II e III categoria) e la ricostruzione delle infrastrutture necessarie, anche distribuite sul territorio (Centri ENEA), l'elaborazione e gestione dell'inventario radiologico, l'elaborazione dei piani di conferimento, l'elaborazione di piani di security e risposta elle emergenze, l'elaborazione delle procedure chiusura, di sorveglianza a lungo termine e di rilascio del sito, etc.

La seconda annualità, oltre alle 4 linee progettuali già avviate nel PAR 2006, presenta due nuove linee di attività relative ai reattori di III generazione e alla formazione e comunicazione in campo nucleare. Nello specifico il progetto è organizzati nelle 6 linee progettuali riportate nel seguito.

LINEA PROGETTUALE 1: Studi sul nuovo nucleare e partecipazioni ad accordi internazionali/bilaterali sul nucleare da fissione. Funzione Advisor

LINEA PROGETTUALE 2: Reattori evolutivi INTD - International Near Term Deployment

LINEA PROGETTUALE 3: Reattori di IV Generazione

LINEA PROGETTUALE 4: Attività di ricerca e sviluppo relative alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi e alle fenomenologie di base tipiche di un deposito definitivo di rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo di rifiuti di III categoria

LINEA PROGETTUALE 5: Supporto all'Autorità istituzionale di sicurezza per gli iter autorizzativi, anche al fine di elevare il grado di accettazione dei reattori di III generazione. Comparazione delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche

LINEA PROGETTUALE 6: Formazione scientifica funzionale alla ripresa dell'opzione nucleare in Italia.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Linea progettuale 1: Studi sul nuovo nucleare e partecipazioni ad accordi internazionali/bilaterali sul nucleare da fissione. Funzione Advisor

Le attività di ricerca e sviluppo relative al nuovo nucleare da fissione richiedono una costante partecipazione alle iniziative internazionali nel settore dei sistemi nucleari e dei relativi cicli del combustibile. È necessario acquisire ed elaborare informazioni ad uso dei decisori politici e degli stakeholders per una strategia nazionale che si raccordi con le numerose iniziative internazionali nello specifico settore. Studi di scenario, completi di valutazioni economiche e di impatto ambientale e socio-politico, sono di fondamentale importanza per la valutazione delle strategie di impiego dei vari sistemi nucleari. La valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi nucleari innovativi è necessaria per qualsiasi strategia di impiego.

In materia di definizione di programmi di ricerca comunitari, sicurezza, protezione fisica, salvaguardie nucleari e produzione di normativa tecnica è necessaria la partecipazione ai principali comitati e gruppi internazionali: (EURATOM, OECD-NEA, IAEA, INPRO, GIF, IFNEC ecc.).

Sono inoltre estremamente importanti accordi bilaterali/multilaterali, nella modellistica nucleare e nella realizzazione e utilizzo di grandi strutture sperimentali, come ad esempio l'accordo tra l'ENEA e il CEA francese.

La presenza in tali contesti richiede diverse ompetenze, sia tecnico-scientifiche, appartenenti ad Enti, Università e Industrie, sia politico-amministrative, appartenenti a Ministeri, Autorità di Controllo ecc. L'ENEA opera per l'integrazione fra le varie competenze e soggetti coinvolti e assicura la funzione di Advisor verso le Istituzioni e i Ministeri che richiedono supporto nella definizione della policy nazionale nel campo dell'energia nucleare.

La linea LP1 si articola in quattro obiettivi che prevedono:

- A. Prosecuzione del supporto al Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali;
- B. Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali (NEA, IAEA,EURATOM, GIF, IFNEC, ecc.);
- C. Prosecuzione della partecipazione italiana al gruppo *Physical Protection & ProliferationResistance* (PR&PP) del Generation IV International Forum;
- D. Attività di studio e ricerca nell'ambito del rinnovato accordo bilaterale ENEA-CEA sul nucleare da fissione;
- E. Studio di uno scenario relativo ad un ipotetico impiego di reattori nucleari di diversa taglia sul territorio nazionale e relative valutazioni economiche.

Nel seguito per ogni obiettivo sono descritte le attività svolte ed evidenziati risultati più significativi ottenuti

LP1.A Prosecuzione del supporto al Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali

In quest'ambito l'ENEA ha garantito il necessario supporto tecnico scientifico al Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali nel campo del nuovo nucleare da fissione.

Le attività svolte si sono articolate secondo i temi riportati di seguito:

- Supporto tecnico-scientifico alla Direzione Generale Energia e Risorse Minerarie del Ministero dello Sviluppo Economico;
- Supporto per la definizione del posizionamento nazionale in ambito VII Programma Quadro Europeo parte Euratom;
- Presidio delle attività istituzionali internazionali sull'energia nucleare, sicurezza e salvaguardie nucleari, ecc.; partecipazione ai relativi Comitati e Gruppi di Lavoro nazionali ed internazionali.

LP1.B Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali

L'ENEA, a volte con il supporto del CIRTEN, ha svolto, il ruolo istituzionale di "focal point" e di "Advisor" per le tematiche scientifiche e tecnologiche nel campo dell'energia nucleare essendo presente nei principali comitati ed organizzazioni che si occupano di energia nucleare sia a livello nazionale che internazionale (NEA -Nuclear Energy Agency, IAEA-International Atomic Energy Agency, etc.). In particolare ENEA ha assicurato la presenza di rappresentanti ed esperti italiani nella quasi totalità degli Standing Committees della NEA (NSC-Nuclear Science Committee, NDC-Committee for Technical and Economic Studies of Nuclear Energy development and the Fuel Cycle, CSNI-Committee on the Safety of Nuclear Installations, RWMC Radioactive Waste Management Committee, CRPPH-Committee on Radiation Protection and Public Health, NLC-Nuclear Law Committee), oltre che esprimere un rappresentante nazionale nello Steering Committee, ed in un numero elevato di Working Party della NEA e Technical Working Groups (TWG) permanenti dell'IAEA.

Ricercatori dell'ENEA sono anche presenti come rappresentanti italiani e/o esperti in altri importanti gruppi internazionali, quali, ad esempio, l'European Security Research and Innovation Forum (ESRIF), l'European Atomic Energy Society (EAES), il Research Reactor Operators Group (RROG), l'International Society for Neutron Radiology (ISNR), il Global Nuclear Cleanout Coalition (GNCC), il Cooperative Severe Accident Research Programme (CSARP), il MELCOR Cooperative Assessment Program (MCAP), l'European Safeguards Research and Development Association (ESARDA) e l'Interpretation Circle PHEBUS-FP.

LP1.C Prosecuzione della partecipazione italiana al gruppo Physical Protection & Proliferation Resistance (PR&PP) del Generation IV International Forum

Le attività ENEA legate a resistenza alla proliferazione (PR) e protezione fisica (PP) nel periodo di riferimento si sono svolte all'interno dei due forum internazionali più rilevanti su questo tema: il Proliferation Resitance & Physical Protection (PR&PP) Working Group del Generation IV International Forum (GIF, il gruppo di lavoro su "Options to Enhance Proliferation Resistance and Secuity of NPPs with Innovative SMRs and associated Fuel Cycles" della IAEA.

Nell'ambito del PR&PP WG di GIF è stato pubblicato sul sito GIF (http://www.gen4.org/Technology/horizontal/proliferation.htm) il rapporto su "Example Sodium Fast Reactor (ESFR) Case Study", un ipotetico reattore veloce raffreddato a sodio e parte del ciclo associato cui è stata applicata la metodologia sviluppata dal PR&PP WG, "Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems - Revision 5". L'iterazione tra esperti del PR&PP WG ed i progettisti del System Steering Commettees (SSCs) prosegue per sviluppare i Proliferation Resistance and Physical Protection White Papers per ognuno dei sistemi GenIV.

La IAEA ha iniziato con la partecipazione di ricercatori ENEA e sotto l'egida della *Nuclear Power Technology Development Section, Division of Nuclear Power*, il confronto con gli Stati Membri interessati sull'*Options to Enhance Proliferation Resistance and Security of NPPs with Innovative Small and Medium SizedReactors (SMRs)*. Lo sviluppo ed utilizzazione sostenibile dell'energia nucleare da fissione nei paesi sviluppati e/o in via di sviluppo, si esprime anche attraverso la proposta di diverse dozzine di progetti innovativi di reattori di piccola e media taglia (SMR), ovvero fino a circa 700 MWe, con una previsione di installazione nel periodo 2012 – 2030. L'iniziativa è volta a identificare opzioni che aumentino le caratteristiche di resistenza intrinseca alla proliferazione e protezione fisica di questi reattori e le metodologie di valutazione più appropriate. Il contribuito ENEA ha posto l'accento sulla necessità di una stretta interazione tra progettisti ed esperti di non proliferazione nucleare fin dalle prime fasi di progetto.

LP1.D Attività di studio e ricerca nell'ambito del rinnovato accordo bilaterale ENEACEA sul nucleare da fissione

Il nuovo accordo bilaterale ENEA-CEA sul nucleare da fissione è stato formalmente siglato nel luglio 2009 e quindi le attività sono formalmente partite dopo la data di inizio del PAR-2007. Per questa ragione alcune attività, quali ad esempio la collaborazione sul reattore di ricerca denominato Jules Horowitz Reactor (JHR), in corso di realizzazione presso il CEA-Cadarache, sono slittate sostanzialmente a causa dei problemi formali ed organizzativi sollevati dal partner. Nonostante ciò, alcuni obiettivi sono stati portati a termine ed altre attività sono avviate. Si riporta una brevissima relazione sullo stato delle attività inserite nell'accordo.

<u>Programma di lavoro CAST3M</u> - Il programma prevede due attività principali:

- diffusione del sistema di calcolo CAST3M;
- sviluppo e validazione di modelli per il comportamento di calcestruzzo in temperatura.

Per il CAST3M si è effettuato un corso introduttivo a ingegneri in formazione presso il centro ENEA di Portici, affrontando problematiche termomeccaniche tipiche di impianti energetici; presso il Centro ENEA Casaccia si è

svolto un secondo corso con richiami sul metodo degli elementi finiti ed esempi applicativi. Le attività di progetto e verifica di componenti mediante questo codice di calcolo permettono costantemente di testare l'affidabilità del sistema. Sono stati individuati alcuni limiti d'impiego per quanto riguarda l'irraggiamento termico in cavità e sono state proposte soluzioni per superare tali limitazioni.

Relativamente alla seconda azione, è stata adeguata la procedura HTCTRAN per il trasferimento di massa e di calore nei calcestruzzi basata sul modello termo-igrometrico monofase di BAZANT, resosi necessario per la modifica da parte CEA di alcune strutture dati da essa richiamate. Su detta procedura si sta lavorando per estenderne il funzionamento in presenza di dipendenza delle proprietà termo-igrometriche del calcestruzzo con la temperatura.

Il CEA, inoltre, sta operando l'inserimento di un modello per lo studio dei calcestruzzi totalmente accoppiato termo-igrometrico-meccanico sviluppato congiuntamente tra Università di Padova ed ENEA nell'ambito del progetto HITECO.

<u>Codice termoidraulico di sistema CATHARE</u> - L'ENEA ha modificato il codice allo scopo di rendere possibile la simulazione di sistemi raffreddati a metallo liquido pesante. L'implementazione, nelle future release del codice, delle modifiche effettuate dovrà sottostare ad una ampia campagna di validazione sia con dati sperimentali che tramite confronto con altri codici di sistema già testati.

L'attività svolta presso il CIRTEN, in collaborazione con ENEA, rappresenta il primo passo nel processo di validazione di CATHARE nel trattare nuovi fluidi. Questa attività è mirata a verificare la capacità del codice nel riprodurre test integrali su impianti sperimentali. In particolare, sono stati presi in considerazione i dati provenienti da un benchmark internazionale realizzato dall'OECD/NEA denominato LACANES cui ENEA partecipa con la propria versione modificata del codice RELAP5 per fluidi metallici. In tale ambito è stato costruito un modello rappresentativo del loop sperimentale denominato HELIOS raffreddato a piombo-bismuto per CATHARE ed è stato testato in circolazione forzata, attraverso due stazionari isotermi a differente portata che hanno mostrato una buona capacità di simulazione delle perdite di carico lungo il loop, sia nei confronti dei risultati sperimentali sia di quelli ottenuti con RELAP5. Inoltre, è stato analizzato il comportamento del loop in circolazione naturale fornendo una potenza alle barre scaldanti e le perdite di carico calcolate sono risultate in accordo con quelle misurate sperimentalmente. Nonostante piccole discrepanze mostrate nei confronti di RELAP5, il risultati di questo studio preliminaresono un buon punto di partenza per le future analisi condotte allo scopo di validare le modifiche a CATHARE per simulare impianti raffreddati con la lega eutettica piombo-bismuto.

<u>ERANOS V2.1</u> - Le attività svolte in collaborazione con il CEA, peraltro non ancora totalmente terminate, riguardano sostanzialmente il test e la validazione del codice di trasporto neutronico ERANOS per l'interpretazione delle tecniche sperimentali di controllo della reattività in Accelerator Driven Systems (ADS), previste nell'esperimento GUINEVERE in corso di svolgimento presso la facility VENUS del centro SCK.CEN di Mol (Belgio). E' stata inoltre condotta, come previsto nell'accordo, un'analisi comparativa, in parte mediante tecniche perturbative, fra le librerie JEFF 3.1 per il piombo usate dai codici Montecarlo MCNP e deterministico ECCO/ERANOS. I confronti fra i risultati prodotti da ERANOS e MCNP sono molto incoraggianti, sia per il keff sia per alcuni profili di flusso e tassi di reazione.

Jules Horowitz Reactor (JHR) - Il reattore JHR da 100 MW in fase di avanzata costruzione a Cadarache (Figura 141), frutto della collaborazione del CEA con la Commissione Europea e vari partner internazionali sia pubblici che privati (CIEMAT-Spagna, SCK-Belgio, NRI-Repubblica Ceca, VTT-Finlandia, DAE-India, JAEA-Giappone, EDF e AREVA-Francia), VATTENFALL-Svezia), una volta operativo sarà il più importante reattore sperimentale europeo a disposizione della collaborazione internazionale per lo sviluppo, la qualificazione, l'ottimizzazione e la sicurezza del combustibile nucleare e dei materiali utilizzati dall'industria per i reattori di II, III e IV generazione. Si prevede lo start-up del reattore nel 2014 e un'operatività di circa 50 anni.

Nell'ottica di valutare l'opportunità di una partecipazione dell'Italia al consorzio internazionale JHR, l'ENEA ha proposto

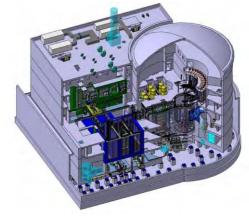


Figura 141. Ricostruzione 3D del Jules Horowitz Reactor del CEA (Cadarache)

ai responsabili del CEA una prima collaborazione finalizzata sia alla partecipazione di ricercatori italiani (ENEA e CIRTEN) ad alcune specifiche fasi di progettazione che all'approfondimento delle informazioni utili a fornire elementi per valutare l'opportunità di una adesione italiana al consorzio. L'importanza di entrare nel Consorzio JHR risiede nella circostanza che l'organismo che intende aderire potrà assumere il ruolo di capofila per le

industrie del suo Paese non solamente per le attività sperimentali e di qualifica di interesse per l'industria, ma anche per potere con ogni probabilità ottenere commesse per forniture di componenti. Altro aspetto importante legato all'inserimento nel Consorzio è che tutti i partecipanti condividono e possono utilizzare le informazioni che si ottengono dalle prove sperimentali, indipendentemente da chi le ha proposte.

LP1.E Studio di uno scenario relativo ad un ipotetico impiego di reattori nucleari di diversa taglia sul territorio nazionale e relative valutazioni economiche

Sono stati studiati due scenari, uno di riferimento, l'altro di sviluppo, caratterizzati da una capacità nucleare installata di 19,5 e 35 GW(e) rispettivamente. Utilizzando il codice DESAE (Dynamic Energy System - Atomic Energy), di origine IAEA, sono state investigate le opzioni ciclo del combustibile aperto e riciclo del plutonio con l'intento di studiare le prestazioni di sistemi nucleari ad acqua leggera rispetto a parametri quali consumo di uranio, quantità di combustibile spento, accumulo di plutonio fissile ed attinidi minori; i risultati confermano che sistemi nucleari caratterizzati da elevati valori di burnup sono più performanti. Per contro, sistemi a basso burnup sono più attrattivi, sulla base di un maggiore accumulo di plutonio fissile, qualora si pianificasse l'introduzione di reattori veloci e la chiusura del ciclo del combustibile. Il confronto tra ciclo aperto e riciclo del plutonio richiede approfondimenti di carattere sia tecnico che economico.

Un secondo interessante studio si riferisce all'ipotesi di un possibile scenario che preveda l'impiego in Italia di centrali nucleari in un parco misto di SMR (Small-Medium Reactors) e LR (Large Reactors) all'orizzonte temporale 2020-2030. Una "High variant" (2,5% di tasso di crescita annuale della domanda elettrica) ed una "Low variant" (1,0% di tasso di crescita annuale della domanda elettrica) finalizzate entrambe alla fornitura del 25% di energia elettrica in Italia al 2030, sono state analizzate sia in termini di flussi di massa di materiali che per gli aspetti economici. Lo studio è stato condotto anche come contributo ENEA all'IAEA Coordinated Case Studies on Competitiveness of SMR in Different Applications, parte integrante del Collaborative Project on Common Technologies and Issues for SMRs.

Questo secondo studio mette in evidenza che, nonostante costi totali più elevati, il ricorso ad un parco reattori di tipo "misto" offre degli indubbi vantaggi: miglior scaglionamento nella costruzione di impianti, maggior flessibilità ed indipendenza delle singole unità di impianto, maggior facilità di gestire "modularmente" il debito iniziale che diventa più "attraente" per gli investitori grazie alla maggior controllabilità del rischio.

Linea Progettuale 2: Reattori evolutivi INTD – International Near Term Deployment

Le attività di questa linea progettuale sono la naturale continuazione di quelle iniziate nel corso del primo anno dell'Accordo di Programma ed hanno avuto come obiettivo principale lo sviluppo di reattori di piccola-media taglia di tipo integrato ed a "loop", raffreddati ad acqua in pressione. In particolare per i reattori di tipo integrato l'attenzione è stata focalizzata su un concetto particolarmente innovativo sviluppato da un consorzio internazionale. Per i reattori a loop le attività sono state limitate allo studio di noccioli innovativi la cui principale caratteristica è la mancanza del controllo chimico della reattività durante il ciclo.

All'interno di questa linea sono previsti i seguenti macro-obiettivi:

- Prova integrale SPES-3 per reattori SMR di tipo integrato
- Sviluppo di componenti critici per reattori di piccola-media taglia
- Analisi di sistema.

L'attività di progettazione e realizzazione degli impianti è stata eseguita dalla SIET, società partecipata dell'ENEA, con la collaborazione dell'ENEA stessa. L'attività del CIRTEN è stata focalizzata sia sulla selezione della strumentazione per misure in bifase chesulla verifica della capacità dell'impianto sperimentale di simulare i transitori incidentali.

LP2.A Realizzazione della struttura di supporto dell'impianto SPES-3

Presso l'area sperimentale della SIET è stato predisposto il sito destinato all'installazione dell'impianto SPES-3 eseguendo le opere necessarie all'installazione-

LP2.B Design review dell'impianto SPES3 e follow-up del progetto di reattore di piccola-media taglia di tipo integrato

L'attività è stata finalizzata alla revisione del progetto esecutivo dell'impianto SPES-3, terminato nella precedente annualità, al fine di realizzare un impianto capace di simulare un reattore di piccola-taglia taglia di tipo integrato e di poter procedere all'approvvigionamento dei componenti. A tal fine è stata effettuata una serie di calcoli di sensitività per eliminare le discrepanze evidenziate sull'evoluzione della pressione nel contenimento rispetto al

reattore reale per i transitori analizzati. Sono state studiate diverse configurazioni del contenimento e del sistema EHRS (*Emergency HeatRemoval system*). Il confronto con i risultati ottenuti per l'impianto reale ha permesso di evidenziare le modifiche necessarie all'impianto sperimentale per una corretta simulazione dei transitori da studiare.

E' stato, inoltre, preparato un *input deck* dell'impianto SPES-3 per il codice TRACE al fine di disporre di un modello multidimensionale dell'impianto, e i risultati per lo stato stazionario a 10 MW sono stati confrontati con i relativi calcoli RFLAP5.

L'analisi dei transitori incidentali con i codici RELAP5 e TRACE permetterà di avere un'ulteriore conferma sulla capacità di simulazione dell'impianto SPES-3 e sarà di aiuto nella redazione delle procedure di prova. Inoltre, a seguito delle modifiche resesi necessarie durante la progettazione di dettaglio, per le posizioni dei bocchelli del canale centrale, che simula il circuito primario del reattore, sono state ricalcolate tutte le tubazioni, in seguito alle modifiche apportate al loro sviluppo tridimensionale (lay-out).

LP2.C Selezione strumentazione speciale per l'impianto SPES-3

In continuità con quanto realizzato nel corso del primo anno, durante il quale era stata progettata una sonda a termoresistenza per la misura della velocità del fluido e sono state analizzate le problematiche relative alla scelta e qualificazione delle metodiche di misura delle grandezze di interesse (portata, densità, grado di vuoto e slip ratio) per le condizioni operative che si instaurano durante i vari transitori da simulare, nel secondo anno sono proseguiti gli studi sulla sonda a termoresistenza e sull'individuazione della strumentazione non convenzionale da sviluppare o da approvvigionare. Gli studi effettuati sulla sonda a termoresistenza hanno evidenziato che tale sensore è idoneo per misure di tipo "on-off", cioè misure di livello, ma non per la misura della velocità del fluido, a causa della piccola variazione della sua conducibilità termica del fluido.

Per l'individuazione della strumentazione da approvvigionare per l'impianto SPES-3, è stata effettuata una ricerca bibliografica sugli strumenti idonei per la misura di grandezze fluidodinamiche in regime bifase (misuratori a turbina, a pressione differenziale, a strozzamento, ultrasuoni, ecc.) e sono state prodotte le specifiche tecniche che definiscono, in particolare, l'intervallo di variazione delle grandezze termofluidodinamiche di interesse. La selezione degli strumenti di misura è stata fatta sulla base delle specifiche tecniche, dei risultati della ricerca bibliografica, delle esperienze passate realizzate in SIET, degli esperimenti eseguiti presso il Politecnico di Torino, e della verifica che la maggior parte della strumentazione commerciale o sviluppata da laboratori di ricerca non è utilizzabile per l'impianto SPES-3, a causa delle condizioni operative durante il transitorio e dei requisiti richiesti.

Per la misura della portata in regime bifase è stato deciso di utilizzare un dispositivo costituito da un set di tre strumenti eterogenei (misuratore di frazione di vuoto, misuratore di velocità di miscela e misuratore di quantità di moto). Data l'attuale impossibilità di reperire sul mercato tale dispositivo, esso verrà realizzato approvvigionando i singoli strumenti, ad eccezione dei misuratori della frazione di vuoto, per i quali è necessario procedere al loro sviluppo.

Alcune attività relative allo sviluppo di un misuratore della frazione di vuoto, previste per il terzo anno, sono state anticipate, è stata pertanto eseguita la progettazione concettuale ed esecutiva di un prototipo di sonda di tipo capacitivo, il cui funzionamento si basa sulla variazione della costante dielettrica del fluido in funzione della presenza di vapore o acqua liquida nel condotto. In particolare, a supporto della progettazione concettuale del dispositivo, sono state eseguite alcune prove per verificare il principio di funzionamento.

Infine sono state analizzate dal punto di vista teorico le prestazioni di un dispositivo costituito da una combinazione di due o tre misuratori sopracitati. A tal fine, per ogni combinazione è stato sviluppato un modello matematico con il quale è stata valutata la portata in funzione di alcuni input ricavati da calcoli RELAP5 (grado di vuoto, titolo e slip ratio). Il confronto con i valori di portata calcolati dal codice ha permesso di verificarne la fattibilità teorica. Tale analisi ha messo in evidenza l'impossibilità di misurare la portata con una combinazione di due misuratori, anche nell'ipotesi di flusso bifase omogeneo, e la fattibilità della misura solo con tre misuratori.

LP2.D Progettazione e realizzazione circuito di prova delle canne scaldanti

L'attività ha riguardato la progettazione e la realizzazione, presso l'area sperimentale della SIET, di un circuito di prova per la verifica delle prestazioni delle canne scaldanti da installare nell'impianto SPES3, prima di procedere all'emissione dell'ordine di approvvigionamento. La progettazione e costruzione è stata fatta in conformità con la norma UNI EN 13480-5. Sono state effettuate anche alcune prove di avviamento a freddo, tra cui la prova idraulica alla pressione di progetto.

L'impianto realizzato potrà essere utilizzato in futuro anche per la qualifica degli elementi riscaldanti da installare, ad esempio, in pressurizzatori di reattori nucleari ad acqua pressurizzata.

LP2.E Approvvigionamento serbatoi impianto SPES-3

Le attività di questo obiettivo sono state annullate e rinviate alla successiva annualità sia per consentire di bandire una gara in ottemperanza alla normativa europea ed al decreto legge n. 163/2006 (codice dei contratti pubblici di lavori, servizi e forniture), sia per ridurre i costi complessivi attesi per la realizzazione ed installazione dei componenti.

LP2.F Analisi CFD del downcomer a supporto del progetto

L'attività è stata finalizzata sia alla realizzazione di un simulacro del fondo del vessel e del *downcomer* di un reattore di piccola-media taglia di tipo integrale, in scala 1:5, per lo studio della relativa fluidodinamica al fine di ottimizzare le perdite di carico e la distribuzione della portata nel fondo del vessel, sia alla validazione di modelli di turbolenza implementati nei codici CFD commerciali.

E' stata eseguita la progettazione esecutiva del simulacro e sono stati emessi gli ordini per l'approvvigionamento dei componenti, che verranno assemblati presso l'area sperimentale "Lo Scalbatraio" dell'Università degli Studi di Pisa. Tutta la strumentazione convenzionale è già stata approvvigionata ed è stata avviata la costruzione dei singoli componenti.

E' stata, inoltre, eseguita una campagna sperimentale su una apparecchiatura, costruita per riprodurre, in una opportuna scala, alcune caratteristiche fluidodinamiche essenziali del *downcomer*. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per la validazione di un modello sviluppato per superare i limiti dei modelli commerciali nello studio del campo di moto turbolento ed implementato nel codice ANSYS Fluent. Il nuovo modello permette una migliore predizione del campo di moto rispetto ai modelli di turbolenza disponibili nel codice commerciale.

LP2.G Studi teorico-sperimentali per componenti critici di reattori di piccola-media taglia di tipo integrato (GV, EHRS)

Le attività di questo obiettivo sono state finalizzate sia allo studio teorico e sperimentale delle instabilità potenziali, nelle quali può incorrere il deflusso di una miscela bifase in canali dei generatori di vapore disposti in parallelo, sia alla progettazione di un nuovo impianto che permetta di investigare il moto di miscele bifase in tubi elicoidali o soluzioni alternative (es. tubi a spirale).

A tal fine è stata effettuata una ricerca bibliografica finalizzata ad evidenziare le principali differenze di comportamento tra tubi elicoidali e tubi diritti. In particolare sono stati investigati gli aspetti riguardanti la fluidodinamica del condotto, lo scambio termico, le cadute di pressione per attrito ed i regimi di deflusso. Sono stati, in seguito, individuati i fenomeni di instabilità più importanti nello studio di un generatore di vapore, focalizzando l'attenzione sulle onde di densità, ovvero fenomeni di instabilità legati ai ritardi di trasmissione delle onde cinetiche all'interno del sistema. E' stato verificato che i generatori di vapore in condizioni di funzionamento nominale non risentono di fenomeni di instabilità legati alle onde di densità.

Sono state analizzate, inoltre, le condizioni di flusso e di scambio termico che si possono instaurare in tubi elicoidali con passo nullo (tubo toroidale), caratterizzati da diversi rapporti tra il raggio del tubo ed il raggio medio del toro, al variare del numero di Reynolds. I risultati ottenuti sono estrapolabili anche al caso dei tubi elicoidali di un reattore di piccola-media taglia di tipo integrale.

E' stato modificato il codice RELAP5 per trattare lo scambio termico e le perdite di carico in tubi elicoidali, al fine di rendere il codice capace di simulare tali geometrie e le fenomenologie coinvolte. Le modifiche effettuate sono state validate con i risultati sperimentali relativi a prove effettuate al Politecnico di Torino per valutare le perdite di carico di deflussi bifase in condotti elicoidali, caratterizzati da differenti valori del diametro dell'elica. I risultati ottenuti hanno consentito di mostrare la buona capacità del codice modificato nella simulazione delle fenomenologie termofluidodinamiche.

E' stata eseguita una prima campagna di prove per studiare l'instabilità termofluidodinamica che si può instaurare in canali paralleli di generatori a tubi elicoidali. Allo scopo è stata utilizzata l'apparecchiatura sperimentale esistente in SIET, che è stata modificata per permettere l'esecuzione della matrice di prova. Le principali modifiche hanno riguardato la strumentazione, la coibentazione e l'alimentazione elettrica di potenza del secondo tubo.

Infine è stata completata la progettazione concettuale di un ulteriore impianto sperimentale per l'investigazione di miscele bifase in tubi elicoidali di vari diametri di elica, per l'estensione della caratterizzazione agli altri tubi del fascio del generatore di vapore e per l'indagine di soluzioni alternative.

LP2.H Calcoli di schermaggio deterministici e Montecarlo per il blocco reattore

L'attività ha riguardato la verifica del progetto per gli aspetti radioprotezionistici e di danneggiamento dei

materiali sia con codici Monte Carlo (MCNP5, MCNPX 2.5.0 e MCNPX 2.6.d.) che con il codice deterministico TORT. A tal fine è stato valutato il danneggiamento del recipiente in pressione e dei generatori di vapore dovuto all'irraggiamento neutronico e gamma; sono state calcolate le dosi in varie zone dell'impianto in condizioni di funzionamento nominale e durante le operazioni di manutenzione.

Infine è stata valutata l'attivazione dei materiali a fine vita dell'impianto per le operazioni di smantellamento dell'impianto.

LP2.I Analisi sismiche

In continuità con quanto realizzato nella precedente annualità, durante la quale è stato analizzato il comportamento dell'edificio degli ausiliari di un reattore di piccola-media taglia di tipo integrato per diverse configurazioni, parzialmente interrato con e senza isolamento sismico, ed è stata definita una metodologia per valutare le curve di fragilità al fine di poter eseguire un PRA (*Probabilistic Risk Assessment*) sismico, nella presente annualità l'attività ha riguardato:

- la proposta di guidelines per la progettazione dell'isolamento sismico degli impianti nucleari, considerato che a livello mondiale, ad eccezione del Giappone, non esiste un corpo normativo su tale tematica. La proposta riguarda l'estensione della norma europea EN 15129, emessa per gli edifici civili, agli impianti nucleari. Le modifiche ed integrazioni alla norma europea sono state concordate con gli esperti del gruppo sulla sismica del reattore;
- lo studio del comportamento di un edificio isolato sismicamente in caso di guasto di una frazione limitata degli isolatori (1-2%). I risultati dello studio dimostrano che il comportamento dell'edificio non è influenzato dall'indisponibilità di tale frazione di isolatori;
- la valutazione delle curve di fragilità per un edificio non isolato simicamente con la metodologia sviluppata nel corso della precedente annualità;
- la caratterizzazione numerica e sperimentale di un isolatore del tipo HDRB (*High Damping Rubber Bearing*) al fine di poter determinare anche le curve di fragilità per un edificio isolato simicamente.

LP2.L Analisi eventi esterni

L'attività ha riguardato l'analisi del comportamento dell'edificio ausiliari di un reattore di piccola media taglia di tipo integrato a fronte di determinati eventi esterni quali impatto aereo ed un tornado. In entrambi i casi sono state effettuate valutazioni deterministiche utilizzando un codice ad elementi finiti ed il modello del contenimento, utilizzato per le analisi sismiche.

Le metodologie proposte per l'impatto aereo ed il tornado hanno una valenza generale e possono essere utilizzate anche per gli attuali reattori di terza generazione.

LP2.M Progettazione core innovativo

L'attività ha riguardato lo studio di nuovi modelli di nocciolo e la valutazione di soluzioni che contengono spunti innovativi rispetto ai reattori pressurizzati ad acqua pesante attualmente in esercizio. In particolare i modelli studiati differiscono in rapporto alle diverse soluzioni considerate per il controllo della reattività: sistema di barre a cluster e barre cruciformi; sistema di barre di controllo rotanti esterne e sistema di controllo del *leakage*.

E' stato effettuato inoltre uno studio sul controllo dell'eccesso di reattività iniziale e lungo il ciclo per noccioli in cui sia assente il boro disciolto nel refrigerante primario. I calcoli sono stati eseguiti con codici Monte Carlo. Le discrepanze osservate rispetto ad analoghi calcoli deterministici sembrano essere imputabili al diverso trattamento degli effetti di eterogeneità (profili di temperatura, distribuzione di potenza e temperatura).

Linea Progettuale 3: Reattori di IV Generazione

Le attività di ricerca e sviluppo condotte nell'ambito della linea "Reattori di IV Generazione" hanno avuto come obiettivo principale il supporto allo sviluppo delle tecnologie relative ai reattori nucleari veloci refrigerati a piombo, *Lead cooled Fast Reactor* (LFR).

Si sono inoltre avviate attività in supporto ai sistemi nucleari di quarta generazione refrigerati a sodio, *Sodium cooled Fast Reactor* (SFR), focalizzate prevalentemente sulla caratterizzazione sperimentale dei fenomeni di scambio che governano l'accoppiamento termico tra il circuito primario a sodio ed il circuito intermedio a sali fusi.

Infine, in continuità di attività svolte nella precedente annualità, si sono ulteriormente implementate attività di qualifica e validazione di codici di calcolo per il supporto alla progettazione dei sistemi nucleari refrigerati a gas ad alta temperatura, *Very High Temperature Reactor* (VHTR).

LP3.A Tecnologie LFR: Progettazione e realizzazione circuito ad acqua in pressione per l'alimentazione del DHR

Sulla base delle specifiche funzionali e di prova è stato progettato e realizzato presso il Centro ENEA del Brasimone, il circuito ad acqua in pressione (pressione di progetto 6 bar) per l'alimentazione del prototipo di scambiatore per la rimozione del calore di decadimento (DHR), come proposto per il dimostrativo di LFR nell'ambito del progetto ELSY del VI Programma Quadro Euratom.

L'impianto ad acqua in pressione è stato realizzato in maniera da garantire l'interfaccia termomeccanica con l'impianto sperimentale a metallo liquido CIRCE in configurazione di prova ICE (Integral Circulation Experiment, Figura 142) nel quale è stata installata la sezione di prova per la qualifica del prototipo di scambiatore DHR.

Tale attività è stata inoltre condotta in sinergia con quanto previsto nell'ambito del progetto IP-EUROTRANS del VI Programma Quadro Euratom, che ha come obiettivo l'investigazione sperimentale del comportamento termo-fluidodinamico di una porzione del sistema primario di un reattore LFR/ADS in scala 1 MW.

Successivamente si è provveduto al collaudo del sistema, verificandone le prestazioni in termini di pressione di alimentazione, regolazione della portata di alimento, grado di addolcimento dell'acqua, e in termini di affidabilità e funzionalità dei sistemi di controllo ed emergenza.

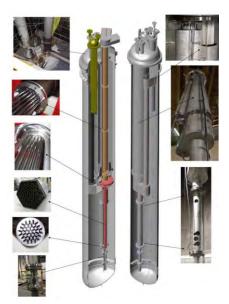


Figura 142. Impianto CIRCE in configurazione di prova ICE

LP3.B Tecnologie LFR: Montaggio e collaudo della sezione di prova DHR sull'impianto sperimentale a metallo liquido CIRCE

Nell'ambito dell'attività sopra menzionata, in sinergia con la quale si è definita ed implementata l'attività di qualifica sperimentale del prototipo di DHR per sistemi LFR, si è reso necessario progettare, definire ed approvvigionare una sorgente termica che simulasse una porzione di nocciolo di reattore LFR da 1 MW. Tale porzione di nocciolo, costituito da un fascio di 37 barrette disposte su reticolo esagonale è realizzata con resistenze elettriche altamente performanti (flusso da 1 MW/m², densità di potenza di circa 500 W/cm³) che necessitano, per il corretto funzionamento, di un'alimentazione in corrente continua ad una tensione costante di 300 V.

A tale scopo si è provveduto alla progettazione, definizione, implementazione e collaudo di un apposito sistema di alimentazione in corrente continua, consistente di un convertitore AC/DC della potenza di 1 MW, e di un quadro distribuzione della potenza. Al fine di rendere omogeneo l'impianto CIRCE alle nuove esigenze sperimentali, è stato inoltre progettato ed implementato un nuovo sistema di regolazione e controllo della potenza e di acquisizione dati.

Si è provveduto quindi all'avvio dell'impianto CIRCE, per i collaudi in temperatura e, in anticipo sui tempi, alla realizzazione di una campagna sperimentale preliminare (test a piena potenza in regime stazionario) atta a verificare la funzionalità del sistema e a fornire i primi dati sulle prestazioni del prototipo di DHR. UNA completa caratterizzazione sperimentale saarà oggetto delle attività della prossima annualità (PAR 2008-09).

LP3.C Tecnologie LFR: Qualifica girante per pompa centrifuga realizzata con materiale ad elevata resistenza alla corrosione/erosione

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo a supporto dell'implementazione della tecnologia dei sistemi nucleari refrigerati a piombo, si è reso necessario attivare delle linee di azione che avessero come obiettivo la qualifica dei sistemi di pompaggio per la circolazione del fluido refrigerante. Occorre infatti individuare nuovi materiali per la realizzazione della girante della pompa, dei cuscinetti idrodinamici e del corpo valvola, vista l'aggressività del piombo fluente a temperature superiori ai 400°C.

Come materiale ad elevata resistenza alla corrosione ed erosione è stato individuato il MAXTHAL, che permette applicazioni d'uso in piombo fino a 500°C Si tratta di un composto ceramico (Ti₃SiC₂) con buone proprietà meccaniche e buona lavorabilità alle macchine utensili.

Si è quindi provveduto alla progettazione concettuale e termoidraulica di un apposito circuito a metallo liquido, da realizzare presso il Centro ENEA del Brasimone, denominato HELENA (*Heavy Liquid Metal Experimental Loop for Advanced Nuclear Applications*) nel quale installare un prototipo di pompa centrifuga con girante in MAXTHAL.

Il progetto concettuale, accoppiato con le verifiche termo-meccaniche di impianto, già completato, permetterà l'approvvigionamento dello stesso entro il 2011. Si è provveduto ad attivare tutte le azioni necessarie all'approvvigionamento della pompa prototipica, che avrà una prevalenza di 3,5 bar e una portata di 35 kg/s (BEP, Best Efficency Point).

A supporto della progettazione del circuito HELENA, sono state effettuate delle simulazioni numeriche di pre-test, mediante il codice di sistema RELAP5, al fine di valutare il comportamento termoidraulico dell'impianto sia in regime stazionario che durante i transitori operazionali. I risultati ottenuti hanno permesso di validare le soluzioni impiantistiche adottate e la rispondenza sulle prestazioni richieste al sistema per la caratterizzazione dei componenti prototipici.

LP3.D Tecnologie LFR: Progettazione attività sperimentale, definizione set-up impiantistico e analisi numerica di pre-test in supporto alla qualifica del generatore di vapore

Nell'ambito delle attività sperimentali in supporto alle analisi incidentali di un sistema nucleare refrigerato a piombo a seguito dell'evento di rottura del generatore di vapore (Steam Generator Tube Rupture - SGTR), sull'impianto sperimentale LIFUS5 del Centro ENEA del Brasimone (Figura 143) è stata condotta una campagna sperimentale preliminare, anche in sinergia con il progetto europeo ELSY.

I risultati ottenuti hanno permesso di validare e supportare la progettazione e futura realizzazione di una

appropriata sezione di prova da installare nell'impianto LIFUS5. Sarà quindi possibile supportare la caratterizzazione sperimentale di un mock-up del generatore di vapore prototipico proposto per il dimostrativo di LFR denominato ALFRED "Advanced Lead Fast Reactor European Demostrator" in fase di progettazione nell'ambito del progetto europeo LEADER del VII Programma Quadro Euratom.

Ai risultati sperimentali preliminari si è inoltre associata un'analisi di post-test mediante simulazioni numeriche realizzate con il codice SIMMER III (2-D) e SIMMER IV (3D). Le simulazioni realizzate hanno permesso di ottenere una qualificata modellazione della sezione di prova attuale e una validazione del codice per applicazioni di supporto alla progettazione.

I risultati ottenuti dall'analisi numerica di post-test hanno quindi permesso di affinare, con nuovi calcoli di

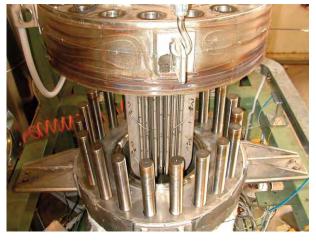


Figura 143. Sezione di prova impianto LIFUS5

pre-test, la progettazione della nuova sezione di prova, la definizione del nuovo layout di impianto e la definizione della strumentazione, ottimizzando il sistema di prova verso le attività di qualifica sperimentale del generatore di vapore a tubi a spirale piana in caso di un evento SGTR.

LA realizzazione delle sezione di prova sarà oggetto della prossima annualità.

LP3.E Tecnologie LFR: Sezione di prova e provini per la caratterizzazione fuori pila dei materiali strutturali

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo definite in supporto alla qualifica dei materiali strutturali per sistemi nucleari innovativi, e in sinergia con il progetto europeo GETMAT del VII Programma Quadro Euratom, l'ENEA ha avviato il progetto LEXUR-II, che prevede test di irraggiamento neutronico sui materiali strutturali proposti.

I test, che saranno condotti nel reattore russo a spettro neutronico veloce BOR-60, hanno l'obiettivo di qualificare il comportamento dei materiali strutturali sotto irraggiamento quando operati in piombo fluente.

Per definire un database di confronto per la caratterizzazione degli effetti da danneggiamento neutronico sulle proprietà termo-meccaniche dei materiali strutturali, nell'ambito delle attività di questo obiettivo sono stati definiti e progettati opportuni test di qualifica su campioni identici a quelli proposti per LEXUR-II ma a irraggiamento nullo.

Acquisiti i materiali strutturali selezionati per l'irraggiamento [T91, T91 ricoperto in GESA e FeAl, 15-15Ti, 14Cr ODS (Y2O3)] questi saranno caratterizzati fuori pila presso il Laboratorio di Prove Meccaniche del Centro ENEA del Brasimone.

E' stata definita la matrice di prova per l'esperimento LEXUR II. I test saranno realizzati ad una temperatura di 500°C, su campioni miniaturizzati di T91, T91 ricoperto, 14Cr ODS, 15-15Ti. I campioni saranno immersi in piombo, all'interno di un canale appositamente realizzato ed attrezzato per essere installato nel reattore BOR-60. La dose massima prevista sui campioni è di 16 dpa. Il tenore di ossigeno disciolto nel piombo verrà controllato introducendo una quantità nota di ossido di piombo nell'ampolla di prova.

LP3.F Core LFR: Sviluppo modelli di calcolo per la termo-fluidodinamica, la neutronica e la cinetica di nocciolo

L'attività svolta da ENEA ha riguardato principalmente la validazione del modello 3D sviluppato dall'Università di Bologna per il reattore ELSY, attraverso la comparazione con i risultati del codice SIMMER-III sviluppato e validato in ambito internazionale per l'analisi termo-fluido dinamica di reattori veloci raffreddati a metallo liquido tra cui il piombo.

Anche se la simulazione effettuata con SIMMER-III è di tipo bidimensionale e quindi meno dettagliata rispetto al calcolo tridimensionale del modello FEM-LCORE, fornisce un importante punto di riferimento per una valutazione globale della risposta del codice CFD. Inoltre, l'analisi con SIMMER-III, estesa a tutto il circuito primario del reattore ELSY, ha fornito le condizioni al contorno per il calcolo CFD limitato alla regione circostante il nocciolo.

Il confronto puntuale dei profili di pressione, velocità e temperatura nelle diverse regioni del nocciolo ha messo in evidenza un generale accordo sui risultati ed in particolare per quanto riguarda l'influenza dei fenomeni di turbolenza nei volumi di ingresso e uscita sui flussi trasversali nel nocciolo considerato aperto. Il confronto ha inoltre dimostrato come l'accuratezza del modello CFD può evidenziare eventuali disomogeneità e punti caldi che ovviamente non sono calcolati nella approssimazione bidimensionale con SIMMER-III.

In sintesi, l'attività svolta nell'ambito della collaborazione tra ENEA e Università di Bologna, ha contribuito significativamente allo sviluppo e validazione del codice FEM-LCORE per un suo impiego più generalizzato nello studio del comportamento termo-fluido dinamico di reattori nucleari innovativi.

Per quanto riguarda la neutronica, si è ulteriormente esteso il modello di cinetica neutronica sviluppato nella prima annualità. Lo sviluppo di un modello computazionale per il calcolo neutronico di un sistema innovativo richiede infatti la messa a punto di un algoritmo per la soluzione delle equazioni di bilancio in geometria pluridimensionale. Nel PAR-2006 è stato sviluppato un modulo di calcolo per la soluzione delle equazioni della diffusione multigruppi in geometria cartesiana multidimensionale. Nel corso del secondo anno di attività il modulo numerico sviluppato in precedenza è stato sottoposto a verifiche mediante confronti con vari benchmark analitici e numerici. Ciò ha permesso di studiare i vari aspetti connessi alle limitazioni degli approcci computazionali adottati.

E' stato quindi intrapreso lo studio della possibilità di estendere il modulo computazionale a problemi dipendenti dal tempo. In questa fase si è studiata a fondo la possibilità di accoppiare un modulo di calcolo statico ad un modulo di cinetica puntiforme nell'ambito di una procedura quasi-statica, utilizzando il modulo statico per l'aggiornamento della forma della popolazione neutronica, in uno schema fattorizzato forma-ampiezza. In questa fase del lavoro è stato messo a punto uno strumento informatico di accoppiamento fra il modulo di calcolo di forma e quello per la valutazione delle ampiezze.

L'attività di ricerca già completata è quindi propedeutica alla messa a punto e alla validazione di un modulo completo di dinamica. Questo prevede pertanto lo sviluppo di uno schema quasi-statico e l'accoppiamento con un modulo di calcolo termoidraulico. Ciò permetterà la simulazione del comportamento dinamico di un sistema, tenendo conto in modo consistente degli effetti di controreazione termica.

LP3.G Concettualizzazione del DEMO di LFR

Con l'obiettivo di dimostrare la fattibilità di un reattore raffreddato a piombo, è stato realizzato un progetto preliminare di un nocciolo per un reattore dimostrativo. Uno degli scopi principali del design è stato quello di raggiungere un alto flusso neutronico veloce (per finalità di irraggiamento), ovviamente rispettando i principali limiti tecnologici. Dopo aver analizzato diverse configurazioni, si è giunti ad un design dell'elemento di combustibile, delle barrette e del sistema di controllo. Il nocciolo è stato poi caratterizzato neutronicamente per mezzo del codice ERANOS e della libreria JEFF 3.1.

Il nocciolo così progettato è dimensionato per generare una potenza di 300 MW_{th}, è alimentato con combustibile MOX, ed è composto da elementi di combustibile quadrati, senza scatola. Sono previste due zone di arricchimento (30,7% e 33,0% in Pu) per appiattire la distribuzione in pianta della potenza (assumendo un fattore di forma

massimo di 1,2) e quindi la distribuzione della temperatura del refrigerante in uscita dal nocciolo, non altrimenti regolabile essendo gli elementi di combustibile aperti.

La variazione di reattività durante il ciclo di 5 mesi è stata valutata in circa 4000 pcm. Due sistemi differenti ed indipendenti (basati sul concetto dei *Finger Absorber Rods*) sono stati previsti per la regolazione/compensazione della reattività e per lo *shut-down* del sistema.

Sono stati poi calcolati i coefficienti di reattività che quindi possono essere utilizzati come input per l'analisi cinetica.

È stata infine effettuata un'analisi termo-idraulica preliminare, che ha verificato il rispetto dei limiti di temperatura assunti in fase di progetto (i valori massimi calcolati sono di 2180 °C per il combustibile e di 550 °C per la guaina del combustibile).

Parallelamente, è stato sviluppato un modello semplificato di dinamica di nocciolo che permette un approccio preliminare alle problematiche di controllo del sistema: questo consente un'analisi relativamente veloce della dinamica e della stabilità del sistema, che non può essere tralasciata in fase di progettazione. Il modello adottato, basato sull'approssimazione *point-kinetics* e su un modello di scambio di calore a temperature medie, è comunque in grado di considerare i principali feedback che controreazionano la variazione di reattività a fronte dei principali transitori operativi ed incidentali, tenendo conto della neutronica, della termo-idraulica e della espansione termomeccanica.

Sono state quindi analizzate le risposte del reattore (in termini di escursione di temperatura del combustibile MOX e della guaina in acciaio ferritico-martensitico T91) ad eventi iniziatori di transitori, sia ad inizio sia a fine ciclo, implementando il modello sviluppato sulla piattaforma MATLAB/SIMULINK.

LP3.H Tecnologie SFR: Generatore di vapore per reattori SFR

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo e la messa a punto, presso il Laboratorio Solare Termodinamico del Centro ENEA della Casaccia, di un laboratorio di misura dotato di strumentazione e sensori miniaturizzati, progettato per la determinazione delle proprietà termofisiche primarie e secondarie di una miscela di sali fusi composta da nitrati di sodio (NaNO₃) e di potassio (KNO₃) rispettivamente al 60% e 40%.

La miscela di sali, utilizzata come fluido di accumulo e scambio termico principalmente negli impianti a solare termodinamico, è proposta, nei reattori nucleari di IV Generazione refrigerati a sodio (SFR) come fluido di scambio termico intermedio, poiché permette un impiego a temperature fino a 550 °C.

Infatti, quantunque l'uso di tale miscela di sali fusi si stia diffondendo in tutto il mondo per diverse applicazioni tecnologiche di avanguardia, in letteratura non sono ancora disponibili tutte le loro proprietà fisiche, primarie e secondarie, la cui conoscenza è essenziale per descrivere il comportamento dei fluidi stessi quando vengono utilizzati come fluidi termovettori di processo.

Le correlazioni di scambio termico normalmente esistenti in letteratura non possono essere applicate 'tout court' ai fluidi per le quali non sono state testate. Tra i fluidi non testati, vi sono certamente questi sali fusi, per cui si è reso necessario effettuare studi appositi per la determinazione dei coefficienti di scambio termico nelle condizioni reali di esercizio.

Le azioni che sono state svolte in questo ambito hanno riguardato l'approvvigionamento, la fornitura, la messa a punto e la realizzazione delle attrezzature necessarie alla definizione delle proprietà fisiche della miscela di sali fusi. In particolare, si è proceduto a:

- realizzazione e messa a punto di sensori di misura miniaturizzati necessari alla determinazione dei valori delle proprietà fisiche primarie dei sali fusi (calore specifico, dilatazione termica, conduttività termica, viscosità, diffusività termica);
- allestimento di un laboratorio di misura con acquisizione di un calorimetro a scansione differenziale;
- realizzazione della strumentazione di una sezione di prova, denominata 'Simulacro da 300 kW del Generatore di Vapore', tramite applicazione di termocoppie, al fine di determinare i coefficienti di scambio termico sali fusi/acqua in fascio tubiero immerso nei sali.

LP3.I Tecnologie VHTR: Calcoli di pre-test e definizione specifiche per prove sull'impianto HE-FUS3 evoluto

L'attività di calcolo di pre-test per la definizione di una campagna sperimentale sull'impianto HEFUS3 del Centro ENEA del Brasimone è stata condotta alla luce dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali effettuate nel corso del primo anno di attività del progetto. In particolare si è data risposta alle seguenti problematiche:

- individuazione della nuova strumentazione, indispensabile per acquisire tutta l'informazione necessaria alla validazione dei codici di sistema durante le prove sperimentali in regime transitorio;
- definizione di nuovi transitori sperimentali per ampliare il data base di validazione dei codici, tenendo conto di scenari e condizioni di impianto significative per il progetto e la sicurezza dei reattori a gas ad alta temperatura (HTR e VHTR).

I calcoli di pre-test realizzati con il codice di sistema RELAP5, nel cui modello sono state introdotte opportune modifiche basate sui risultati delle precedenti simulazioni, hanno portato alla definizione di una campagna sperimentale caratterizzata da pressione e portata dell'elio superiori a quelle delle precedenti prove sperimentali.

Per migliorare la caratterizzazione dell'impianto si è previsto di raggiungere le condizioni di riferimento per i transitori sperimentali tramite un incremento a gradino della portata e potenza nell'impianto. Sono stati poi simulati tre transitori incidentali:

- perdita di portata (LOFA) per rallentamento di compressore;
- transitorio di potenza (TOP) provocato da un incremento della potenza elettrica fornita;
- perdita di refrigerante (LOCA) a seguito dell'apertura di una valvola del serbatoio di espansione.

Le simulazioni numeriche dei tre transitori incidentali hanno permesso di individuare le condizioni iniziali ed al contorno ottimali per la conduzione dei transitori sperimentali.

LP3.L Tecnologie VHTR: Effettuazione di prove in regime transitorio su impianto HE-FUS3 evoluto.

LP3.M Tecnologie VHTR: Interpretazione prove per validazione codici per VHTR

Gli obiettivi LP3.L ed LP3.M, relativi alle tecnologie per reattori a gas ad alta temperatura, prevedevano rispettivamente l'esecuzione delle prove sperimentali definite nell'obiettivo LP3.I e successivi calcoli di post-test per l'analisi dei risultati.

Le attività di questi due obiettivi sono slittate al terzo anno in quanto il concomitante utilizzo dell'impianto HE-FUS3 nell'ambito di programmi internazionali per la fusione nucleare ha impedito l'effettuazione delle prove sperimentali previste.

LP3.N Core VHTR: Progettazione set-up TAPIRO ed esperienza per interfaccia core -riflettore VHTR

Nell'ambito delle attività di questo obiettivo è stato valutato, mediante simulazioni numeriche, il rateo di dose sviluppata nelle sezioni di prova preventivamente progettate, dopo uno o più cicli d'irraggiamento nella colonna termica del reattore TAPIRO.

Lo studio dell'andamento nel tempo della dose residua nelle componenti del manufatto permette di valutare il rischio radiologico associato a tutte le operazioni di manipolazione dei campioni e dei materiali del manufatto.

Tra i codici di trasporto si è utilizzato il codice Monte Carlo FLUKA, che dispone di una routine standard per valutare l'evoluzione temporale dei prodotti di attivazione e la dose associata.

La valutazione del rateo dose equivalente è stata fatta simulando un singolo irraggiamento di 4 ore a 1 kW di potenza sulle sezioni in configurazione HTGR termico ed epitermico osservando l'andamento del rateo a "contatto" dopo 0 s, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 12 h, 24 h, 48 h, 10 e 30 d dalla fine dell'irraggiamento.

Nel caso HTGR termico si è simulato anche un profilo d'irraggiamento di 6 giorni (irraggiamento di 4 h a 1 kW intervallate da una sosta di 20 h). Il rateo di dose equivalente è stato stimato negli stessi intervalli temporali dei primi due casi. I tempi di irraggiamento che minimizzano l'attivazione dei materiali della *facility* e permettono misure significative sui fogli metallici sono dell'ordine di 4 h alla potenza di 5 kW del reattore TAPIRO.

Per quanto riguarda il supporto numerico alla implementazione delle attività previste, si è predisposto un benchmark per la validazione di codici e librerie da utilizzare per il calcolo di reattori tipo VHTR.

Per ottimizzare l'esperienza si sono scelti punti nella colonna termica in cui lo spettro del flusso neutronico sia nella zona termica/epitermica, ovvero dove si trovano le più elevate risonanze dei materiali fertili (U238). Si è trovato che ciò si verifica a circa 40 cm di distanza dall'imbocco della colonna di grafite.

I risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche evidenziano, per queste energie, delle variazioni significative dello spettro all'interfaccia tra la grafite e l'uranio. Si è proceduto poi alla simulazione di misure di attivazione con vari rivelatori a soglia. Saranno questi dati sperimentali che, in futuro, costituiranno i valori di benchmark per il confronto calcolo/esperienza.

Come complemento a questa fase di simulazione, e per verificarne la potenzialità, si è infine proceduto alla ricostruzione degli spettri neutronici nelle interfacce di materiali diversi (grafite/uranio, grafite/ferro e

grafite/vuoto) mediante tecniche di *unfolding*. Tutti gli spettri di *unfolding*, ottenuti entro lo 0,1% di errore cumulativo, risultano essere in ottimo accordo con gli spettri ottenuti dalle simulazioni con MCNPX.

Sulla base dei dati raccolti dalle simulazioni è stato possibile progettare sia i buffer di grafite che i porta campioni necessari per un'eventuale serie di esperienze. Inoltre sono stati ottimizzati i tempi di irraggiamento di ciascun set di campioni.

Linea progettuale 4: Attività di ricerca e sviluppo relative alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi e alle fenomenologie di base tipiche di un deposito definitivo di rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo di rifiuti di III categoria

Il rilancio dell'opzione nucleare in Italia aveva posto in evidenza la necessità di risolvere preventivamente il problema della gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi prodotti dalle attività nucleari pregresse. E' ben noto a tutti, infatti, che l'accettabilità di nuove centrali nucleari da parte dell'opinione pubblica è maggiore se si dimostra di aver trovato una soluzione sicura e definitiva a questo problema.

In tale ottica era stata avviata questa linea progettuale che ha permesso di definire la situazione italiana attraverso una revisione e aggiornamento del lavoro svolto in passato dai vari soggetti interessati e di avviare studi e ricerche preliminari propedeutiche alla individuazione di un eventuale sito ed alla realizzazione del deposito per rifiuti di II categoria.

Gli obiettivi principali delle attività erano:

- sviluppare e fornire al Paese le competenze e gli strumenti più aggiornati per la caratterizzazione dei rifiuti, la performance assessment, la valutazione di impatto ambientale, lo studio di scenari, le analisi territoriali, la definizione dei criteri di accettabilità dei rifiuti, l'individuazione dei sistemi di condizionamento, la radioprotezione, l'analisi di sicurezza (safety & security), ecc.;
- mettere a disposizione del Paese le competenze necessarie per l'analisi di sicurezza, la revisione di normativa tecnica, le procedure per la caratterizzazione dei rifiuti e loro categorizzazione, la ricostruzione delle infrastrutture necessarie per la caratterizzazione e la R&S, la gestione dell'inventario, ecc..

Nel corso della prima annualità sono state individuate le seguenti tematiche principali:

- supporto al processo decisionale;
- stato dell'arte su studi e ricerche in Italia ed analisi delle necessità;
- inventario nazionale dei rifiuti radioattivi e modalità di gestione futura;
- caratterizzazione dei rifiuti da conferire al sito di smaltimento e di deposito;
- analisi propedeutiche alla progettazione del deposito (analisi di scenari, analisi di sicurezza, quadro normativo e di radioprotezione, analisi territoriali, gestione delle emergenze, etc.);
- trasporto e deposito dei rifiuti;
- problematiche di security;
- comunicazione, informazione e formazione.

Queste tematiche sono state sviluppate con diverso grado di dettaglio, e di alcune se ne è proseguito l'approfondimento in questa annualità, come di seguito descritto.

LP4.A Aggiornamento dell'Inventario Nazionale dei Rifiuti Radioattivi e Modalità di Gestione Futura

Lo scopo di questo lavoro è quello di valutare criticamente le informazioni ricavate dall'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi al fine di individuare le carenze, soprattutto in termini di caratterizzazione, che possano fornire spunti per studi e programmi di ricerca e sviluppo ancora necessari per acquisire le competenze tecniche e scientifiche utili a migliorare la conoscenza sul reale stato della situazione dei rifiuti radioattivi in Italia, in modo da poter fornire un feedback all'autorità di controllo e agli esercenti stessi per poter meglio indirizzare la caratterizzazione dei rifiuti.

Operativamente i dati relativi ai rifiuti radioattivi esistenti, raccolti da ISPRA dagli esercenti, sono stati messi a disposizione dell'ENEA che ha provveduto ad elaborarli, sulla base di ipotesi di condizionamento (laddove non già condizionati), al fine di pervenire ad un inventario nazionale dei rifiuti radioattivi condizionati, cioè già idonei per il deposito di smaltimento. Inoltre l'ENEA ha elaborato una stima dei rifiuti di futura produzione da smantellamento degli impianti dismessi, basandosi sia su informazioni preliminari provenienti dagli esercenti sia su stime fatte in proprio.

Tenere aggiornato l'inventario è necessario per i seguenti motivi:

- l'inventario ISPRA, da cui deriva l'inventario ENEA, viene aggiornato e modificato ogni anno perché nuovi rifiuti vengono continuamente prodotti o perché alcuni dati vengono modificati e corretti, in special modo quelli di caratterizzazione radiologica;
- le ipotesi di condizionamento effettuate in prima istanza possono essere modificate con l'evolversi delle tecnologie e delle decisioni degli esercenti, sia in termini di processo sia in relazione al tipo di contenitore;
- con l'avvio di un eventuale Programma Nucleare in Italia, l'inventario dei rifiuti radioattivi condizionati dovrà prevedere la produzione di nuovi volumi dovuti ai nuovi impianti elettronucleari.

I dati di inventario elaborati dall'ENEA sono stati organizzati in un sistema informativo derivato da quello ISPRA, in modo da avere uno strumento più facilmente aggiornabile e dotato di maggiore flessibilità con l'obiettivo di poter estrarre agevolmente dati da sottoporre ad analisi critica per fornire input agli studi e ricerche sopra segnalati.

Si è iniziato a interagire con la SOGIN per avere dal principale esercente italiano informazioni più aggiornate sul programma di gestione dei rifiuti radioattivi e per evitare sovrapposizioni tra i rispettivi ruoli.

LP4.B Attività relative alla caratterizzazione dei rifiuti da conferire al deposito

L'attività è iniziata nel primo anno con l'elaborazione di procedure per la caratterizzazione radiologica e chimicofisica dei rifiuti radioattivi e di criteri di massima per l'accettabilità al deposito, identificando anche le tecniche distruttive e non distruttive più idonee e la migliore strumentazione disponibile sul mercato.

Dopo la definizione concettuale elaborata nella prima annualità, è stata messa a punto una descrizione più accurata dell'insieme integrato di infrastrutture, tecnologie e servizi necessari per la caratterizzazione di rifiuti radioattivi, ai fini del conferimento al deposito. Si è provveduto alla 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, in collaborazione con il CIRTEN, 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 per la quantificazione della massa di fissile, della massa di fertile nonché del contenuto totale di attinidi in contenitori di rifiuti radioattivi da 200 e 400 litri, per la caratterizzazione completa del manufatto con tecniche non distruttive e per la corretta discriminazione dei rifiuti di II e III Categoria.

A completamento delle attività relative alla caratterizzazione radiologica è stata effettuata dal CIRTEN un'analisi critica delle esistenti norme UNI relative alla caratterizzazione radiologica dei rifiuti radioattivi ai fini di una valutazione dei contenuti sulla base dei più recenti standard internazionali.

LP4.C Attività di R&S propedeutiche alla localizzazione e realizzazione del deposito

Partendo dai risultati ottenuti nel corso della prima annualità, le attività sono state finalizzate principalmente alla formazione delle competenze necessarie per l'analisi di sicurezza e i calcoli di "performance assessment" di un deposito di rifiuti radioattivi, mediante acquisizione o sviluppo dei relativi strumenti computazionali. Si è proseguito con la modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e con lo sviluppo di una metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso. Si è dato inoltre avvio all'approfondimento delle tematiche relative alla caratterizzazione geologico-ambientale dei siti.

A. Analisi e prova, con casi di studio, di strumenti computazionali di larga diffusione per"Performance Assessment" di depositi di smaltimento di rifiuti radioattivi

Nel corso della prima annualità era stata avviata una collaborazione con il Politecnico di Milano per uno studio sistematico delle informazioni esistenti a livello nazionale ed internazionale sulle metodologie per la valutazione delle prestazioni di sicurezza dei depositi. Successivamente, il Politecnico di Milano ha focalizzato la propria attività sullo sviluppo di un approccio computazionale modulare basato fondamentalmente sullo sviluppo di un modello stocastico a compartimenti per l'analisi del trasporto di radionuclidi alle differenti scale di deposito (near-field e far-field) e sulla sua successiva "ibridizzazione" con modelli deterministici per il trasporto di contaminanti nelle acque di sottosuolo. Alcuni dei risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati con l'applicazione AMBER, codice di calcolo a compartimenti di tipo deterministico. Con l'attività descritta sono stati analizzati con maggior dettaglio i meccanismi di funzionamento di detto codice, al fine di individuarne le potenzialità e le flessibilità applicative e verificare l'esistenza di eventuali limiti in situazioni particolari o critiche. L'analisi ha evidenziato che, pur essendo AMBER uno dei codici più adatti allo scopo, tali

limiti in effetti esistono e andranno approfondite nel prosieguo le modalità per superarli, utilizzando ad esempio l'integrazione con codici più specializzati nei singoli compartimenti.

B. Stato dell'arte e studio di strumenti e protocolli di analisi sitologiche e territoriali e di analisi delle conseguenze di incidenti con rilascio di radioattività all'ambiente

Le attività sono state indirizzate allo studio delle problematiche relative alla caratterizzazione geologicoambientale dei siti, che spesso appare poco esaustiva e soggetta a critiche. L'approccio prescelto per individuare il sito più idoneo deve risultare tecnicamente ineccepibile, ma anche chiaro e trasparente, per fornire l'evidenza che i criteri di selezione dell'area rispondano a precisi requisiti e soprattutto siano stati applicati in modo ottimale, per la tutela dell'ambiente e della salute pubblica. In particolare devono essere definite, in maniera dettagliata, le caratteristiche delle matrici ambientali coinvolte nella realizzazione e nell'esercizio del deposito stesso; queste costituiranno un utile elemento conoscitivo nei successivi studi finalizzati alla riduzione sostanziale dei rischi.

C. Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso

Questa attività, iniziata nel PAR-2006, e che proseguirà anche nella terza annualità, è finalizzata allo sviluppo e alla validazione di metodologie quantitative per la valutazione delle prestazioni di contenimento di un deposito ingegneristico di rifiuti radioattivi a medio-bassa attività. Il prodotto finale dell'attività deve fornire una base il cui sviluppo, oltre a fornire dati e risultati di valore scientifico e tecnico applicativo, possa contribuire a ricreare, aggiornare e/o consolidare le competenze del sistema Italia nella materia in oggetto.

Nella precedente annualità si era effettuata la sintesi e la catalogazione sistematica delle informazioni esistenti a livello nazionale ed internazionale sui rifiuti radioattivi e sulle strutture preposte al loro smaltimento in termini di metodologie per la valutazione delle prestazioni di sicurezza dei depositi.

L'attività nel secondo anno si è focalizzata sullo sviluppo di un approccio computazionale modulare basato su:

- sviluppo di un modello stocastico a compartimenti per l'analisi del trasporto di radionuclidi alle differenti scale di deposito (near-field e far-field);
- "ibridizzazione" del suddetto modello stocastico con modelli deterministici per il trasporto di contaminanti nelle acque di sottosuolo;
- investigazione di meta-modelli empirici più snelli per l'eventuale sostituzione di alcuni dei moduli per l'analisi di sicurezza, particolarmente onerosi dal punto di vista computazionale, al fine di poter effettuare in modo computazionalmente efficace la propagazione delle incertezze e le analisi di sensitività.

Inoltre, nell'ambito di una valutazione di sicurezza che sia a supporto di una più ampia "analisi di rischio" dei depositi, è necessario individuare tutti i possibili processi ed eventi in grado di determinare il rilascio di radionuclidi dal deposito, quindi prendere in esame tutti i possibili "scenari" con le relative probabilità di accadimento e descrizione delle conseguenze radiologiche attese in termini di modelli matematici di simulazione. Si è quindi provveduto ad identificare e descrivere le principali metodologie di analisi di rischio (classiche e innovative) che siano di supporto all'esecuzione di studi relativi alle valutazioni di sicurezza per depositi di rifiuti radioattivi di tipo temporaneo, superficiale e geologico.

LP4.D Attività di analisi e R&S relative allo smaltimento geologico

Sebbene lo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi ad alta attività ed a lunga vita non rientrasse inizialmente nell'oggetto della presente linea progettuale, si è ritenuto opportuno occuparsi di tale tematica in modo da sviluppare le competenze a supporto di future decisioni in merito alla gestione dei rifiuti ad alta attività e lunga vita. La proposta è di sviluppare queste competenze partecipando attivamente alle principali iniziative in corso a livello europeo ed internazionale.

In particolare, ENEA ha aderito e partecipato ai lavori del Consorzio ARIUS (Association for Regional and International Underground Storage) e associato gruppo di lavoro ERDO-WG (European RepositoryDevelopment Organisation Working Group) e alla Piattaforma Tecnologica europea sullo smaltimento geologico (IGD-TP), lanciata a fine 2009 e in procinto di definire una Strategic Research Agenda con l'obiettivo di avere un deposito geologico operativo in Europa entro il 2025.

Linea Progettuale 5: Supporto all'Autorità istituzionale di sicurezza per gli iter autorizzativi, anche al fine di elevare il grado di accettazione dei reattori di III generazione. Comparazione delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche

Alla luce di quelle che erano le dichiarazioni e determinazioni del Governo italiano nel periodo 2009-10, miranti a creare le condizioni per la realizzazione sul suolo italiano di impianti nucleari di III generazione, le attività di ricerca della presente linea erano state orientate sui reattori di terza generazione per fornire un'esauriente informazione sia sulle possibili opzioni tecnologiche (EPR, AP-1000, con apertura allo studio di altre proposte), sia sullo stato attuale e sulle necessità di sviluppo di modellistica, infrastrutture e normativa a supporto della loro comparazione, valutazione e qualifica. A tale scopo le attività sono state indirizzate ai seguenti obiettivi:

- base informativa: effettuazione di studi di comparazione delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche per la produzione di energia nucleare;
- modellistica: messa a punto di metodi e raccolta/elaborazione di informazioni sulle metodologie di calcolo più aggiornate utilizzate per lo studio della sicurezza dei più recenti reattori commerciali (III generazione di tipo evolutivo) a supporto della loro valutazione e certificazione;
- qualifica sperimentale: adeguamento tecnologico degli impianti sperimentali dedicati alla qualifica sperimentale, individuazione delle normativa di riferimento e studio e programmazione di prove di qualifica sperimentale di sistemi e componenti, a supporto dell'iter di certificazione.

LP5.A Base informativa sulla realizzazione di reattori di III generazione

Lo studio comparativo delle opzioni scientifiche e tecnologiche per la produzione di energia nucleare è stato orientato alla ricerca di informazioni aggiornate sulle proposte di maggiore interesse in Europa ed in Italia, e alla loro elaborazione in un quadro omogeneo e referenziato. L'attenzione è stata rivolta, per quanto riguarda l'elaborazione e omogeneizzazione, alle due proposte di maggiore interesse per l'Italia, in accordo con le indicazioni che si sono andate delineando durante lo studio attraverso i contatti ufficiali di rappresentanti del governo e delle maggiori realtà industriali coinvolte: EPR di Areva (Francia) e AP-1000 di Westinghouse (Stati Uniti).

Nella fase informativa lo spettro delle tecnologie esplorato è stato più ampio e ha comportato incontri con vendors, con la cui collaborazione sono state organizzate giornate di studio, su ciascuna delle seguenti tecnologie: EPR, AP-1000, ABWR e ESBWR della GE-Hitachi Nuclear Energy, mPOWER della Babcock & Wilcox, VVER-1000 della Atomenergoproekt (AEP, Federazione Russa). Inoltre una giornata di studio su argomenti trasversali alle diverse tecnologie è stata organizzata in collaborazione con la *Technical Support Organization francese: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire* (IRSN), coinvolta in attività di supporto alle autorità regolatorie o al sistema industriale per EPR e VVER (in Bulgaria).

Nella fase di elaborazione l'attenzione è stata rivolta principalmente agli aspetti - tra loro fortemente correlati - che caratterizzano e differenziano le due tecnologie di maggiore interesse, EPR e AP-1000 per:

- la filosofia di sicurezza implementata nella progettazione impiantistica;
- la sensibilità della progettazione impiantistica ai requisiti derivanti dalle caratteristiche di un sito specifico
 e di una specifica gestione dell'impianto e del suo ciclo del combustibile;
- la gestione dei flussi della catena di fornitura, in relazione anche con i requisiti di qualificazione nucleare dei sistemi e delle componenti rilevanti per la sicurezza.

I documenti sono stati elaborati in un ambito professionale di ampia esperienza nel settore della normativa e degli standard di sicurezza. Come raccolta strutturata di informazioni, essi costituiscono una premessa essenziale per l'indirizzo delle attività di ricerca e il conseguente contributo allo sviluppo delle linee guida italiane sui rapporti di sicurezza, nonché alla pianificazione della formazione e dell'organizzazione delle risorse necessarie al sistema nazionale per l'implementazione della normativa di sicurezza nucleare e per la gestione delle relazioni con le organizzazioni internazionali.

Le attività dell'obiettivo sono state condotte il collaborazione con il CIRTEN.

LP5.B Piattaforme per la modellistica

L'acquisizione e validazione di piattaforme avanzate di calcolo per lo studio dei più recenti reattori LWR commerciali (III generazione di tipo evolutivo) è un obiettivo da perseguire con un programma di attività pluriennale che tenga conto dei continui sviluppi nel settore della modellistica nucleare. Tenendo presente questo aspetto, il lavoro svolto ha seguito due linee principali:

- Analisi dell'attuale modellistica a supporto della progettazione e degli studi di sicurezza applicata in campo internazionale, con particolare attenzione alla realtà americana e francese, al fine di capire le necessità di sviluppo e acquisizione codici da mettere in programma per le annualità successive;
- Acquisizione ed installazione sulle infrastrutture di calcolo ENEA di codici e piattaforme di calcolo che permettano di effettuare analisi multi-fisica (mutua influenza delle diverse discipline: termoidraulica, neutronica, termo meccanica ecc.) e multi-scala (a livello di sistema, di componente e di zone circoscritte interessate da particolari fenomenologie).

Nella prima linea il principale risultato conseguito ha riguardato il quadro dell'attuale modellistica di tipo <u>Best Estimate</u> (BE) utilizzata per lo studio della sicurezza dei reattori evolutivi e dell'approccio seguito per la sua corretta applicazione. A questo riguardo sono stati analizzati i diversi aspetti dell'utilizzo di una metodologia BE, dai possibili campi di applicazione alle procedure seguite per la qualifica dei codici fino alle metodologie adottate per la valutazione del grado di incertezza dei risultati. In questo quadro è stata inserita una descrizione degli strumenti di calcolo attualmente disponibili in ENEA per le diverse applicazioni afferenti agli studi di sicurezza: termoidraulica, neutronica, comportamento del combustibile, PSA ed incidenti severi. Un'attenzione particolare è stata rivolta alle problematiche di modellistica per la valutazione del rischio derivante dalle installazioni nucleari.

La maggior parte dell'impegno sulla seconda linea di attività ha riguardato l'implementazione sulla rete di calcolo ENEA dei codici resi disponibili nell'ambito degli accordi CAMP (Code Assessment & Maintenance Program) e CSARP (Cooperative Severe Accident Research Program) con l'USNRC, e della piattaforma di calcolo NURISP (Nuclear Reactor Integrated Simulation Project) a cui ENEA ha avuto accesso nell'ambito dell'omonimo progetto europeo. Al primo gruppo, in particolare, appartengono i codici di sistema RELAP5, TRACE ed il codice MELCOR per lo studio degli incidenti severi. La piattaforma NURISP, basata sul software SALOME, consente di integrare codici diversi per sviluppare capacità di simulazione multi-fisica e multi-scala. In una prima fase le attività sono state concentrate sull'aspetto multi-scala ed attualmente sulla rete di supercalcolo ENEA sono stati installati i codici CFD (Computational Fluid Dynamics) NEPTUNE-CFD, TRIOU, SATURNE ed è prevista l'installazione del codice di sistema CATHARE. Nell'ambito di questa attività si è inteso anche fornire agli stakeholder italiani ed a tutti i soggetti interessati un'esauriente informazione sull'infrastruttura computazionale disponibile, sulle modalità di acquisizione dei codici più avanzati per la modellistica nucleare e sul loro utilizzo nell'ipotesi di un ritorno alla produzione di energia elettrica da fonte nucleare.

Un'ulteriore attività svolta nell'ambito dell'obiettivo ha riguardato lo sviluppo di software di simulazione per controllo/gestione di reattori LWR di III generazione di tipo evolutivo. L'utilizzo di un linguaggio "object oriented" (Modelica) ha permesso di sviluppare un software particolarmente versatile non indirizzato ad uno specifico tipo di reattore ed in grado di supportare modellistica di tipo multi-fisica e di dinamica di sistema.

LP5.C Preparazione del programma di qualifica sperimentale

Scopo dell'attività è la ricostituzione dei presupposti necessari per l'implementazione di programmi sperimentali che potranno riguardare sia la qualifica industriale di sistemi e componenti d'impianto, sia la validazione degli

strumenti di calcolo utilizzati per le verifiche di sicurezza richieste dal processo di *licensing*. Sono state sostanzialmente seguite due linee, rispettivamente dedicate al ripristino delle infrastrutture sperimentali e alla verifica della disponibilità di laboratori e di competenze in relazione alla normativa di riferimento e alle esigenze della catena di fornitura.

L'adeguamento delle infrastrutture sperimentali ha riguardato una parte dei sistemi ausiliari che, nei laboratori SIET (Piacenza), servono tutti gli impianti sperimentali tra cui l'impianto SPES-2 (Figura 144), un simulatore integrale di impianto che fu costruito per il reattore PWR Westinghouse 312 e in seguito modificato per la certificazione del reattore evolutivo AP-600. La disponibilità dello SPES-2, che ha l'importante peculiarità di montare sistemi di sicurezza passivi tipici di gran parte dei reattori di III generazione di tipo evolutivo, è ritenuta di estrema importanza per rinforzare le competenze nel campo della termoidraulica di sistema e supportare la qualifica dei codici di calcolo.

L'attività di progettazione/realizzazione di campagne di prove sperimentali significative per gli scopi precedentemente elencati, da una parte si è concretizzata nella realizzazione degli interventi necessari per il ripristino dell'impianto effettuati dalla società SIET, dall'altra ha



Figura 144. Vista parziale dell'impianto SPES-2

portato allo sviluppo da parte ENEA di un modello numerico dell'impianto SPES-2 realizzato con il codice di sistema CATHARE che supporterà la progettazione delle prove stesse.

Il risultato della verifica della disponibilità di laboratori e di competenze in ENEA è il Dossier ENEA "Qualificazione di sistemi e componenti in ambito nucleare". Inoltre, al fine di mettere in relazione tale offerta con la futura domanda, determinata dalla normativa di riferimento e dalle esigenze delle industrie che costituiranno la catena di fornitura, si è svolta una ricerca approfondita che è stata facilitata dalla partecipazione degli esperti ENEA ai gruppi di lavoro UNICEN, dei quali fa parte anche una rappresentanza significativa dei gestori di centrali e di industrie grandi e medie che nel settore nucleare sono già impegnate, con commesse all'estero, o sono interessate ad entrare.

In tale sede sono state elaborate proposte di revisione di guide tecniche: la partecipazione degli esperti ENEA ha consentito di dettagliare e verificare le esigenze che derivano dalla specificità del sito e del relativo territorio (ad esempio per quanto concerne gli eventi esterni che impongono requisiti specifici di qualificazione nucleare) e le esigenze di ricerca e sviluppo che derivano dalle innovazioni degli impianti (ad esempio l'estensione della vita di esercizio a 60 anni e le conseguenti problematiche di qualificazione).

Linea Progettuale 6: Formazione scientifica funzionale alla ripresa della opzione nucleare italiana

Nel campo della gestione delle risorse umane per il nucleare non esiste in Italia una letteratura pregressa e perciò il primo obiettivo delle attività di questa linea è stato quello di interiorizzare dati e raccomandazioni che emergono dalle esperienze internazionali. Successivamente si è avviato un censimento di risorse e competenze attualmente disponibili nel nostro Paese, in modo da poter fornire una realistica valutazione di quali aree è possibile coprire.

La ricerca ha creato anche una base di conoscenza che alimenterà il confronto tra i diversi attori del programma nucleare italiano, da quello industriale a quello accademico. Infatti, pur essendovi significative realtà (università, ricerca e industria) che hanno conservato grandi competenze nucleari, esse non hanno più un sistema di relazioni che aiuti a coordinare gli impegni in vista di un piano organico di rilancio.

Le medesima considerazioni sulla necessità di un coordinamento si applicano al tema della comunicazione. Ogni attore, nella specificità del proprio ruolo, deve contribuire a colmare un vuoto di esperienze che si è accumulato nel corso degli anni e che fa dell'Italia uno dei paesi più difficili nell'acquisizione del consenso, in analogia con tutti i paesi europei dove l'assenza del nucleare ha creato scarsa conoscenza e massiccia opposizione. La ricerca si è concentrata specificamente sulle buone pratiche, in particolare sulle iniziative su web, dove spesso si confrontano le posizioni delle giovani generazioni e in genere della parte di popolazione più sensibile all'informazione. Gli studi indicano che è difficile definire procedure standardizzate da trasferire meccanicamente; la ricerca ENEA ha cercato di individuare un'applicazione al panorama nazionale degli approcci più efficaci adottati in altri paesi.

LP6.A Analisi e valutazione delle necessità formative

Il tema della formazione ha due facce, essendovi da una parte la domanda di formazione e, dall'altra, l'offerta. Nel

presente obiettivo gli studi sono stati concentrati sul lato della domanda per definire quali sono le figure professionali necessarie, quindi quale peso attribuire a ciascuna di esse e infine come si manifesta nel tempo questa domanda. I risultati servono da riferimento per la pianificazione dell'iniziativa didattica, sia sul lato dell'alta formazione universitaria che sul lato della forma-zione professionale.

Analisi delle competenze necessarie alla realizzazione del programma nucleare italiano

Una fase preliminare di studio è consistita nel censimento delle competenze disponibili in Italia e la mappa mostrata in Figura 145 segnala quattro tipi di aree:

- aree (grigio) nelle quali non ci sono competenze e neanche, allo stato attuale, piani per acquisirle, ad esempio quelle per la fabbricazione del combustibile;
- aree (verde) nelle quali esistono risorse nazionali

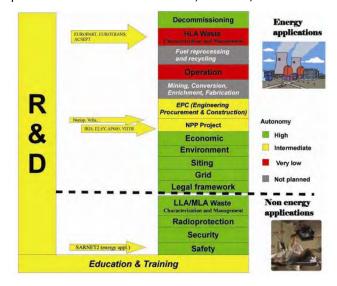


Figura 145. Mappa delle competenze nucleari in Italia

sufficienti, per quantità e qualità, ad affrontare lo sforzo previsto;

- aree (giallo) nelle quali esistono competenze nazionali che necessitano di un potenziamento quantitativo per ritenersi adeguate alla realizzazione del programma;
- aree (rosso) di competenze indispensabili ma per le quali non esiste offerta sul mercato nazionale.

Tra le righe di questa analisi si legge la storia di un paese che ha un passato nucleare e ha sviluppato delle competenze nel decommissioning, a fianco delle più tradizionali competenze nucleari in ambiti non energetici (applicazioni mediche ed industriali). Dal punto di vista quantitativo, una stima molto grossolana indica circa 2000 addetti con competenze professionali nucleari.

Questa fotografia delle risorse disponibili era stata confrontata con il programma proposto dal Governo italiano che ipotizzava la realizzazione di un parco di 8 reattori (4 reattori di tipo EPR e 4 di tipo AP 1000). Questa ipotesi di lavoro era molto simile a quella in discussione in Gran Bretagna che prevedeva la costruzione di 6 EPR e 6 AP 1000 in un arco temporale di 13 anni, 2012-2025, che è grosso modo quello ipotizzato per l'Italia. Traslando in maniera meccanica le valutazioni (rilasciate con un margine di errore stimato del 20%) effettuate dalla Cogent per lo scenario inglese, si ipotizza che per la realizzazione del programma nucleare italiano sarebbero stati necessari:

- un arco temporale di 12 anni;
- da 75.000 a 100.000 anni uomo;
- 7.000 nuovi posti di lavoro l'anno;
- 17.000 anni uomo complessivi per l'esercizio di un impianto con 2 unità reattore;
- assumendo 6 anni per la costruzione, 2200 addetti per anno per impianto, limitatamente alla preparazione del sito, alla costruzione, alla realizzazione di componenti e sistemi meccanici ed elettrici.

La distribuzione della manodopera per settore prevede una forza lavoro impegnata per il 60% alla costruzione, 15% alla produzione di componenti, 25% all'esercizio dell'impianto.

Lo spettro del livello di qualifica disaggregato per aree richiede:

- nella costruzione (compresa la parte meccanica ed elettrica): 15% laureati, 60% tecnici, 25% operai;
- nella produzione di componenti: 20-40% laureati, 30-40% tecnici, 15-35% operai;
- nell'esercizio dell'impianto: 45% laureati, 40% tecnici, 15% operai.

Superata la fase di commissioning, per l'esercizio di un impianto (con 2 reattori) si prevede una necessità da 800 a 1.000 addetti, con una incertezza determinata sia dalla specifica scelta tecnologica sia dalle normative nazionali sulla sicurezza e sul lavoro. Questi dati trovano conforto nei dati storici forniti dalle aziende elettriche nell'esercizio delle centrali esistenti.

L'impegno temporale che si estende su diverse generazioni, la dimensione quantitativa dello sforzo in fase di costruzione, la varietà delle competenze e il ruolo critico del parametro risorse umane sul lato della sicurezza, richiedono che tutti gli attori si sentano responsabili anche per quanto riguarda la formazione e si muovano in maniera coordinata all'interno di un organismo dedicato, in analogia con quanto accade nei paesi impegnati in sforzi simili.

LP6.B Corsi e stage specialistici

Acquisiti i dati sulle domanda, l'obiettivo si è sviluppato in un lavoro di ricognizione dal lato della offerta formativa al fine di raccogliere in uno studio organico e completo l'attuale capacità di formazione del sistema universitario e post universitario italiano. I risultati indicano che, a dispetto dell'assenza di impianti di produzione di energia elettrica di origine nucleare, l'università italiana ha mantenuto una capacità formativa di quasi 100 laureati l'anno, lontana dal picco dei 300 dei primi anni 80, ma suscettibile da una parte di far crescere in tempi brevi il numero di laureati in ingegneria nucleare e, dall'altro, di specializzare in ambito nucleare sia giovani appena laureati che figure senior con esperienze produttive in ambiti contigui.

LP6.C Comunicazione e formazione per sito rifiuti radioattivi

Questo tema costituisce l'elemento di maggiore continuità rispetto al PAR-2006 dove si era affrontato il tema della formazione ed informazione per i siti dei rifiuti radioattivi. Gli studi realizzati nel secondo anno hanno teso a:

 costruire una mappa delle realizzazioni su Internet dei siti informativi per i rifiuti radioattivi, sia nazionali che esteri;

- analizzare e discutere il contenuto della pagine in rete, sopratutto quelle curate dalle agenzie nucleari dei paesi con un programma nucleare consolidato, in modo da estrarne le soluzioni più diffuse nella ricerca di compromesso tra completezza e correttezza della informazione scientifica e divulgazione;
- dare conto, in maniera organica, delle ricerche e delle conclusioni del Forum of Stackholders Confidence della NEA, che è l'organismo che si occupa della informazione e costruzione del consenso per I realizzazione di impianti di stoccaggio di rifiuti radioattivi.

LP6.D Comunicazione sul tema dell'energia nucleare

Il rilancio del nucleare in Italia aveva fatto ripartire diverse iniziative di diffusione e disseminazione dell'informazione sia con la stampa di documenti che con iniziative su WEB, come ad esempio il forum creato da Enel/EDF.

ENEA, ha riunito intorno a un tavolo i suoi esperti dei vari ambiti del nucleare per chiedere uno sforzo coordinato di comunicazione che si è tradotto nella realizzazione di un insieme, coordinato e completo, di pagine WEB esplicitamente pensate per utenti Internet.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

I principali soggetti esterni coinvolti nel tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione" sono stati il CIRTEN e la SIET S.p.A. Nel seguito viene fornita una descrizione sintetica delle attività affidate ai partner con i relativi risultati.

CIRTEN – Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

L'impegno del Consorzio CIRTEN per lo sviluppo del programma di ricerca concordato e coordinato con quello dell'ENEA, comprende una serie di attività svolte presso le Università consorziate: Politecnici di Milano e Torino e le Università di Palermo, Pisa, Roma La Sapienza e Bologna.

All'interno delle *Linea Progettuale 1*, il CIRTEN ha partecipato, di concerto con ENEA. a comitati ed iniziative internazionali sul nucleare da fissione e nell'ambito dell'accordo ENEA - CEA ha prodotto, in collaborazione con ENEA, un lavoro riguardante le modifiche apportate al codice CATHARE. Il lavoro è consistito nella messa a punto di un modello termoidraulico per il metallo liquido pesante da utilizzare come fluido refrigerante in reattori di IV Generazione. Ha prodotto infine una serie di lavori legati agli studi economico-finanziari e di scenario.

Un primo lavoro descrive il codice, basato sulla piattaforma MathLab, "INtegrated model for the Competitiveness Analysis of Small-medium sized reactors" (INCAS), che consente all'utilizzatore di simulare scenari di impiego di un parco reattori country level dal punto di vista della valutazione delle strategie legate agli investimenti necessari. Il codice è stato realizzato basandosi su modelli sviluppati dal Politecnico di Milano che affrontano in dettaglio gli aspetti economici dei reattori "modulari" di tipo avanzato.

Successivamente è stata realizzata una significativa applicazione del codice INCAS; il lavoro, sviluppato presso il Politecnico di Milano, si riferisce al "Low Variant Scenario" elaborato nel 2009 da ENEA e trasferito ad IAEA nell'ambito del "Coordinate Case Studies on Competitiveness of SMR in Different Applications: Case Study Italy". Lo scenario è caratterizzato da una potenza totale installata di origine nucleare di 15 GWe all'orizzonte degli anni 2014-2030. Le tecnologie di reattore considerate in questo studio sono l'EPR francese (1600 MWe) ed il reattore IRIS (335 MWe): 6 EPR in siti con una singola unità più 4 siti con ognuno 4 moduli IRIS.

Parallelamente presso l'Università di Pisa è stato sviluppato un lavoro con lo scopo di fornire un contributo all'analisi dello scenario italiano, fornendo alcune considerazioni preliminari in vista della re-introduzione degli impianti nucleari sul territorio. Lo scopo del lavoro era l'individuazione di possibili punti critici relativi allo sviluppo dello scenario italiano, andando ad evidenziare le differenze rispetto agli scenari ipotizzabili per altri Stati dove la produzione nucleare non ha subito nessun arresto. L'applicazione è preliminare e di carattere accademico e rappresenta il punto di partenza per ulteriori analisi attualmente in corso presso l'Università di Pisa.

Nell'ambito della Linea progettuale 2, il contributo del CIRTEN ha riguardato:

- attività specifiche a supporto dello sviluppo dell'impianto sperimentale SPES3. In particolare è stato prodotto un modello multidimensionale dell'impianto per il codice TRACE;
- all'interno dell'obiettivo "Prova integrale IRIS: Selezione strumentazione speciale", una ricerca bibliografica sulla strumentazione esistente, che è servita come base per l'individuazione degli strumenti di misura da approvvigionare o da sviluppare e ha contribuito alla definizione dei criteri per la selezione della strumentazione;

- nell'obiettivo "Analisi CFD del downcomer a supporto del progetto", la realizzazione di un simulacro, in scala 1/5, presso il Centro dello Scalbatraio dell'Università dell'Università di Pisa e la validazione di codici CFD commerciali;
- nell'obiettivo "Studi teorico-sperimentali per componenti critici di reattori di piccola-media taglia di tipo
 integrato": l'esecuzione di una campagna sperimentale, finalizzata allo studio dell'instabilità che si manifesta
 nei canali paralleli dei generatori di vapore e allo studio teorico di questa problematica; la progettazione di un
 nuovo apparato sperimentale per la caratterizzazione di miscele bifase in tubi elicoidali o in soluzioni
 alternative; lo sviluppo e la validazione delle modifiche implementate nel codice RELAP5 per renderlo idoneo a
 simulare i tubi elicoidali;
- attività riguardanti l'analisi del comportamento dinamico dell'edificio degli ausiliari di un reattore a seguito di un sisma o di altri eventi esterno (impatto di un aereo, tornado);
- nel quadro dell'obiettivo "Progettazione core innovativo", lo sviluppo di modelli di nocciolo innovativi, caratterizzati da una concentrazione di boro nel circuito primario nulla. I modelli studiati differiscono in rapporto alle diverse soluzioni considerate per il controllo della reattività lungo il ciclo.

Relativamente alla *Linea progettuale 3,* nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo messe in essere da ENEA per la progettazione concettuale e termoidraulica del circuito a metallo liquido HELENA (*Heavy Liquid Metal Experimental Loop for Advanced Nuclear Applications*), sul quale realizzare la qualifica sperimentale di un prototipo di pompa centrifuga con girante ad elevata resistenza alla corrosione ed erosione (MAXTHAL), il CIRTEN, ed in particolare l'Università di Pisa, ha provveduto a fornire il necessario supporto numerico. A supporto della progettazione dell'impianto, sono state realizzate delle simulazioni numeriche di pre-test, mediante il codice di sistema RELAP5, al fine di valutare il comportamento termoidraulico dell'impianto sia in regime stazionario che durante i transitori operazionali. I risultati ottenuti hanno permesso di validare le soluzioni impiantistiche adottate e la rispondenza sulle prestazioni richieste al sistema per la caratterizzazione dei componenti prototipici.

Nell'ambito delle attività sperimentali relative alle analisi incidentali di un sistema nucleare refrigerato a piombo a seguito dell'evento di rottura del generatore di vapore, il CIRTEN ha effettuato le seguenti attività:

- realizzazione di un'analisi di post-test sui risultati sperimentali prodotti da ENEA sull'impianto LIFUS5 in configurazione di prova ELSY. L'analisi di post-test è consistita prevalentemente in simulazioni numeriche realizzate con il codice SIMMER III (2-D) e SIMMER IV (3D). I risultati ottenuti hanno permesso di ottenere una qualificata modellazione della sezione di prova attuale e di validare il codice per applicazioni di supporto alla progettazione;
- realizzazione di calcoli di pre-test mediante il codice SIMMER III (2D), a supporto della progettazione della nuova sezione di prova, della definizione del nuovo layout di impianto, e della definizione della strumentazione, ottimizzando il sistema di prova verso le attività di qualifica sperimentale del generatore di vapore a tubi a spirale piana in caso di un evento SGTR; caratterizzazione fisica della fenomenologia dell'interazione metallo liquido acqua.

All'interno delle attività relative all'obiettivo "Core LFR: Sviluppo modelli di calcolo per la termo-fluidodinamica, la neutronica e la cinetica di nocciolo", l'Università di Bologna ha messo a punto ed implementato un modello 3D del reattore raffreddato a piombo ELSY nel codice CFD ad elementi finiti FEM-LCORE sviluppato dalla stessa università nel corso della prima annualità dell'Accordo di programma. Lo scopo di questo modello è di analizzare il comportamento termo-fluido dinamico del nocciolo del reattore innovativo ELSY (GEN-IV) progettato nell'ambito di programmi di ricerca europei. L'analisi è rivolta, in particolare, alla valutazione dei campi tridimensionali di pressione, velocità e temperatura nel nocciolo, tenuto conto dei fenomeni di turbolenza che si manifestano nei volumi inferiore e superiore di ingresso e uscita del refrigerante.

In primo luogo, il codice FEM-LCORE è stato validato sulla base di risultati sperimentali relativi allo studio del comportamento termo-idraulico di una singola barra di combustibile. I risultati del codice CFD ottenuti applicando diversi modelli di turbolenza sono stati comparati, con successo, con le misure sperimentali. Successivamente il modello CFD sviluppato per il reattore ELSY è stato applicato in diverse configurazioni di nocciolo: aperto e chiuso ed in presenza di barre di controllo. In particolare, lo studio nella configurazione di progetto con nocciolo aperto è stata presa a riferimento per la comparazione con i risultati del codice SIMMER-III ai fini di una ulteriore validazione del codice FEM-LCORE per l'analisi termo-fluido dinamica di reattori a piombo.

Nell'ambito dello stesso obiettivo il Dipartimento di Ingegneria Energetica e Nucleare del Politecnico di Torino ha supportato lo sviluppo di un modello computazionale per il calcolo neutronico di un sistema innovativo refrigerato a piombo. Il modello sviluppato è stato sottoposto a verifiche mediante confronti con vari benchmark analitici e

numerici. Si è successivamente implementata una procedura per estendere il modulo computazionale a problemi dipendenti dal tempo.

L'attività di ricerca permetterà quindi la validazione di un modulo di dinamica, anche mediante l'accoppiamento con un modulo di calcolo termoidraulico. Ciò permetterà la simulazione completa del comportamento dinamico di un sistema, tenendo conto in modo consistente degli effetti di controreazione termica.

Nell'ambito dell'obiettivo "Concettualizzazione del DEMO di LFR", ENEA, il Politecnico di Milano e l'Università di Bologna hanno operato per dimostrare la fattibilità di un reattore raffreddato a piombo, mediante la realizzazione di un progetto di nocciolo per un reattore dimostrativo. Le azioni svolte hanno permesso di analizzare diverse configurazioni, giungendo ad un design dell'elemento di combustibile, delle barrette e del sistema di controllo. Il nocciolo è stato poi caratterizzato, dal punto di vista neutronico, mediante simulazioni numeriche eseguite con il codice ERANOS.

Parallelamente, è stato sviluppato un modello semplificato di dinamica di nocciolo per consentire un'analisi relativamente veloce della dinamica e della stabilità del sistema. Il modello sviluppato permette di considerare i principali feedback che controreazionano la variazione di reattività a fronte dei principali transitori operativi ed incidentali, tenendo conto della neutronica, della termoidraulica e della espansione termo-meccanica. Sono state quindi analizzate le risposte del reattore (in termini di escursione di temperatura del combustibile MOX e della guaina in acciaio ferritico-martensitico T91) ad eventi iniziatori di transitori, sia ad inizio sia a fine ciclo, implementando il modello sviluppato sulla piattaforma MATLAB/SIMULINK®.

Nell'obiettivo "Core VHTR: Progettazione set-up TAPIRO ed esperienza per interfaccia core - riflettore VHTR", le simulazioni numeriche realizzate dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Roma "La Sapienza" hanno messo in risalto le potenzialità intrinseche dell'impianto sperimentale del reattore sorgente veloce TAPIRO nella riproduzione di spettri neutronici. E' stato predisposto un benchmark per la validazione di codici e librerie da utilizzare per il calcolo di reattori tipo VHTGR. A tale scopo, e per ottimizzare l'esperienza di benchmark si sono scelti dei punti di misura nella colonna termica in cui lo spettro neutronico sia nella zona termica – epitermica, ove maggiormente sensibili sono le risonanze dei materiali fertili. I risultati ottenuti evidenziano, per queste energie, delle variazioni significative dello spettro all'interfaccia tra la grafite e l'uranio. Si sono poi realizzate simulazione sulle misure di attivazione con vari rivelatori a soglia. Saranno questi dati sperimentali che, in futuro, costituiranno i valori di benchmark per il confronto calcolo/esperienza.

A complemento dell'attività, e per verificarne la potenzialità nel processo di benchmark, si è proceduto alla ricostruzione degli spettri neutronici nelle interfacce di materiali diversi (grafite/uranio, grafite/ferro e grafite/vuoto) mediante tecniche di unfolding. Tutti gli spettri di unfolding ottenuti, risultano essere in ottimo accordo con gli spettri ottenuti dagli estimatori MCNPX durante le simulazioni. Sulla base dei dati raccolti dalle simulazioni è stato possibile progettare sia i buffer di grafite che i porta campioni necessari per un'eventuale serie di esperienze. Inoltre sono stati ottimizzati i tempi di irraggiamento di ciascun set di campioni.

Nel quadro della *Linea Progettuale 4*, il CIRTEN ha svolto attività all'interno dell'obiettivo relativi alla caratterizzazione dei rifiuti da conferire al deposito e alle attività di ricerca e sviluppo propedeutiche alla localizzazione e realizzazione del deposito. In quest'ultima attività il lavoro svolto presso il Politecnico di Milano e l'Università di Roma "La Sapienza" ha riguardato:

- la modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso;
- la descrizione delle principali metodologie di analisi di rischio (classiche e innovative) che possono essere di supporto all'esecuzione di studi relativi alle valutazioni di sicurezza per depositi di rifiuti radioattivi di tipo temporaneo, superficiale e geologico.

In questa linea progettuale il CIRTEN (Politecnico di Milano) ha inoltre effettuato un'analisi critica delle esistenti norme UNI relative alla caratterizzazione radiologica dei rifiuti radioattivi.

Nella *Linea Progettuale 5*, il contributo CIRTEN all'interno dell'obiettivo "Base informativa sulla realizzazione di reattori di III generazione" ha svolto le seguenti azioni:

- alla luce degli sviluppi della normativa accettata a livello internazionale, sono stati descritti e inquadrati sinteticamente i requisiti dell'analisi di sicurezza delle centrali nucleari ad acqua leggera, con particolare riferimento ai rapporti di sicurezza e agli standard di completezza e adeguamento degli stessi alle condizioni specifiche previste per l'installazione nel sito prescelto;
- a complemento allo studio sui reattori PWR di grossa taglia, sono stati oggetto di uno studio specifico del CIRTEN i reattori di piccola taglia, che per le loro caratteristiche economiche, impiantistiche e di ciclo del

combustibile si candidano come soluzione competitiva nei paesi meno industrializzati (ad esempio nel Nord Africa e nel Medio Oriente). Le diverse tecnologie proposte sono state messe a confronto, con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza.

Il contributo CIRTEN nell'obiettivo "Piattaforme per la modellistica" ha riguardato sia l'analisi delle necessità di modellistica a supporto degli studi di sicurezza, che l'acquisizione ed installazione di piattaforme di modellistica avanzate, in particolare:

- Il dipartimento DIEMCA dell'Università di Bologna ha analizzato un nuovo approccio integrale alla valutazione del rischio e dell'impatto ambientale basato sull'analisi cumulativa del rischio per stabilire una serie di linee guida. Lo scopo della valutazione di rischio integrato è arricchire la comprensione dei molti fattori di rischio e delle loro relazioni, al fine di meglio supportare decisioni prese per proteggere noi stessi e l'ecosistema. A questo riguardo, vengono descritte le strategie che, allo stato dell'arte e sulla base delle esperienze maturate sul campo, vanno adottate per affrontare le diverse tipologie di problemi da risolvere quali: programmazione di manutenzione protettiva, all'interno della quale rischio e impatto devono essere valutati, definizione di un processo per la gestione delle sorgenti di pericolo e delle incertezze relative; valutazione di rischi ed impatti per esposizione alle sorgenti di pericolo. Quest'analisi ha inoltre permesso di definire i requisiti per gli strumenti di calcolo adatti, che sono stati suddivisi in necessari, altamente desiderabili e discrezionali.
- la piattaforma di simulazione avanzata FISSICU (FISsione/SICUrezza) per la fluidodinamica è stata installata dal dipartimento DIENCA-UNIBO sulla rete di calcolatori CRESCO-ENEA di Portici. La piattaforma contiene codici per simulazione a diverse scale (microscala, scala intermedia e di sistema) di componenti, sistemi e facility nucleari. Per simulazioni tridimensionali dirette la piattaforma contiene i codici TRIO_U e SATURNE, per la scala intermedia si è implementato il codice NEPTUNE, mentre a livello di sistema è stata prevista l'implementazione del codice CATHARE. Il software SALOME è stato utilizzato per l'accoppiamento dei codici e la gestione di diversi strumenti di generazione mesh, come GMESH and SALOME MESH, e di visualizzazione come PARAVIEW. E' stata realizzata anche una guida sintetica per supportare l'utilizzo da parte degli utenti dei codici della piattaforma e gli strumenti di generazione mesh e visualizzazione.
- il Politecnico di Milano ha sviluppato un software per un simulatore di impianto che sia in grado di affrontare problematiche di controllo e gestione di reattori nucleari. La caratteristiche chiave di tale software sono la modularità, l'accessibilità dei diversi moduli, l'efficienza in termini di velocità di calcolo e l'affidabilità. Per raggiungere questi obiettivi, come base per lo sviluppo del simulatore, è stato utilizzato il linguaggio Modelica. Questo linguaggio è il risultato dei recenti sviluppi nel campo della modellistica object-oriented per multi-fisica e dinamica del sistema. Esso ha il vantaggio di essere open-source ed è già stato utilizzato in diversi campi industriali.

Per finire il CIRTEN ha partecipato alle attività della *Linea Progettuale 6* effettuando analisi e valutazioni delle necessità formative per una ripresa dell'opzione nucleare in Italia, in relazione alle necessità del mondo industriale e ad esperienze in altri paesi ed organismi internazionali.

Nell'ambito dell'obiettivo "Comunicazione e formazione per sito rifiuti radioattivi" il supporto CIRTEN si è sostanziato in due direzioni:

- da una parte una ricognizione analitica di tutti i siti WEB, nazionali e internazionali, che affrontano il tema dei rifiuti radioattivi al fine di costruire una mappa ragionata delle più efficaci sorgenti di informazione;
- dall'altra è stata prodotta una disamina analitica del contenuto delle pagine WEB che affrontano il tema dei rifiuti radioattivi al fine di produrre una guida a beneficio di tutti gli esperti scientifici nel loro rapporto con gli operatori della informazione.

SIET S.p.A.

SIET ha condotto una serie di attività realizzative sull'impianto SPES-3 oltre ad attività progettuali, conseguenti a quanto già effettuato nella precedente annualità del programma. Le attività svolte hanno riguardato:

- Realizzazione delia struttura di supporto per l'impianto SPES-3 e dei relativi sistemi accessori:
- Design review dell'impianto SPES-3 e follow-up del progetto IRIS. L'attività è consistita nella revisione del dossier di progetto prima di procedere all'emissione degli ordini verso terzi e nell'esecuzione delle azioni necessarie per rimuovere eventuali non-conformità progettuali, oltre al follow-up del progetto del reattore di piccola media taglia di tipo integrato e lo svolgimento delle attività correlate. Le principali attività di Design Review effettuate sono state le seguenti:
 - calcoli di sensibilità con RELAP5 sul contenimento di SPES-3 per studiare l'influenza delle strutture sull'andamento della pressione nel Dry Well;

- o riprogettazione del contenimento a 15 bar di pressione di progetto invece che a 20;
- o riprogettazione di alcune tanche per adeguamento volumi scalati 1:100;
- o modifica nodalizzazione RELAP con strutture del contenimento ridotte;
- o ridimensionamento orifizi per varie linee iniezione per una corretta scalatura della portata;
- adeguamento disegno SPES-3 su nuova struttura con programma Solide Edge secondo progetto esecutivo.

Inoltre, considerato che la progettazione esecutiva del canale centrale ha comportato la modifica sia della posizione dei bocchelli sia del lay-out delle linee di aspirazione/mandata della pompa primaria e che la pressione di progetto dei serbatoi del contenimento è stata ridotta da 20 a 15 bar per poter simulare i transitori operativi del reattore di riferimento, in aggiunta a quanto previsto si è reso necessario revisionare il progetto dello SPES-3 relativamente al piping coinvolto nelle modifiche sopra citate. I contenuti principali dell'attività sono: a) revisione delle condizioni di carico assunte per le varie linee; b) elaborati grafici con i lay-out delle linee con indicazione della posizione di valvole e supporti; c) elaborati di calcolo eseguito con codice numerico Auto-Plus con tutti i risultati; d) verifica del rispetto dei limiti di sollecitazione imposti dalla norma di riferimento europea.

Le attività di follow-up sono state le seguenti:

- partecipazione a conference-call di progetto (di norma una alla settimana) ed effettuazione di attività ad esse correlate;
- partecipazione a meetings inerenti il tema ed effettuazione di attività ad essi correlati, con lo scopo di tener conto delle decisioni e modifiche inerenti il progetto del reattore nella progettazione e realizzazione dello SPES-3, per riprodurre al meglio il comportamento del reattore in un transitorio Small Break LOCA.
- Selezione della strumentazione speciale per l'impianto SPES-3. SIET ha condotto ricerche di mercato, in ambito universitario e presso centri di ricerca, con lo scopo di approvvigionare la strumentazione speciale per le misure della portata bifase.
- Progettazione e realizzazione presso l'area sperimentale della SIET di un circuito di prova per la verifica delle prestazioni delle canne scaldanti da installare nella parte bassa del canale centrale dell'impianto SPES-3 prima di procedere all'emissione dell'ordine di approvvigionamento. In parallelo sono stati ordinati 8 prototipi di canne scaldanti da provare nel circuito. Per poter effettuare un confronto tra diversi produttori, 4 prototipi sono stati ordinati presso la ditta francese THERMOCOAX e altri 4 presso la ditta italiana ROTFIL di Torino. Le prove saranno oggetto della successiva annualità dell'Accordo di Programma.

Nel quadro della *Linea progettuale 5* il contributo SIET ha riguardato l'obiettivo "Preparazione del programma di qualifica sperimentale" ed in particolare il possibile utilizzo dei propri impianti nell'ambito della qualifica nucleare. Per fornire l'informazione necessaria alla programmazione di futuri programmi, SIET ha preparato un documento che descrive con un sufficiente grado di dettaglio dei impianti sperimentali esistenti presso la sua area sperimentale che rientrano, per caratteristiche e potenzialità, tra quelli impiegabili per la qualificazione sperimentale di componenti e sistemi di impianti nucleari del tipo LWR. Il documento elenca, inoltre, per ogni impianto sperimentale, inclusi i sistemi ausiliari necessari per il suo funzionamento, i principali interventi manutentivi che si rendono necessari sia per un ripristino delle normali condizioni di operabilità, sia per un eventuale adeguamento tecnologico.

La SIET ha individuato una serie di attività sperimentali che possono tipicamente essere incluse in un programma di qualificazione di componenti e sistemi di un impianto nucleare di tipo LWR. Le sperimentazioni considerate si limitano al campo di competenze tecniche specifiche della SIET, costituito dalle prove termo-idrauliche e termo-meccaniche con rare "escursioni" in altre tipologie di prova ad esse strettamente correlate. Nell'individuazione delle prove del programma e dei componenti/sistemi da assoggettare a qualificazione ci si è avvalsi dell'esperienza maturata sia ai tempi della qualificazione dei reattori di II generazione (anni '80) sia a quelli recenti relativi allo sviluppo dei reattori di generazione III e III+. Pertanto le prove considerate riguardano programmi già effettivamente svolti, programmi rimasti allo stato progettuale e programmi futuri di possibile effettuazione con lo scopo di offrire spunti per un futuro possibile programma per reattori LWR.

Sviluppo di tecnologie innovative per le applicazioni stazionarie cogenerative delle celle a combustibile anche con l'utilizzo di biogas e biomasse

Le celle a combustibile rappresentano, nel medio-lungo termine, una delle tecnologie più promettenti per la generazione distribuita e la cogenerazione, in virtù dell'impatto ambientale molto limitato e degli elevati rendimenti di conversione anche per impianti di piccola taglia. Allo sviluppo di questi sistemi sono dedicate risorse ingenti nei maggiori paesi industrializzati, con risultati molto promettenti che hanno portato alla realizzazione e prova di numerosi impianti dimostrativi. Il loro pieno sviluppo richiede però ancora un notevole sforzo di ricerca e dimostrazione, per raggiungere prestazioni e costi compatibili con le applicazioni commerciali.

L'ENEA opera da tempo in questo campo, sia direttamente che attraverso società controllate come FN, intervenendo su alcuni aspetti critici dello sviluppo delle diverse tecnologie, nell'ambito di rapporti di collaborazione consolidati con altre strutture di ricerca e con l'industria all'interno di progetti nazionali ed europei.

Le azioni condotte dalle aziende e dalle strutture di ricerca si collocano però in un quadro nazionale ancora carente per quanto riguarda la strategia complessiva di intervento nel settore e la definizione di priorità e risorse finanziarie per il medio termine da parte della PA centrale e delle Regioni. In tale situazione i soggetti coinvolti hanno difficoltà a far crescere le risorse impegnate in questo campo e ad utilizzare al meglio le opportunità derivanti dai programmi europei e dalle collaborazioni internazionali.

I sistemi di cogenerazione con celle a combustibile attualmente in fase di sviluppo e dimostrazione possono essere distinti tra:

- sistemi con celle ad elettrolita polimerico, con taglie dal kW a qualche centinaio di kW, con GPL, gas naturale e idrogeno come combustibili;
- sistemi con celle ad alta temperatura (celle a carbonati fusi, da qualche centinaio di kW ad alcuni MW, e celle ad ossidi solidi, da qualche kW ad alcuni MW), con gas naturale e gas da biomasse o rifiuti di varia origine come combustibili.

I problemi principali ancora da risolvere, pur nella diversità delle tecnologie, riguardano essenzialmente l'aumento dell'affidabilità e della durata (obiettivo 40000 ore, dai valori attuali di 10000-20000) e la riduzione di costi (obiettivo 1000-20000 €/kW, rispetto ai 5000-10000 attuali). Una penetrazione significativa nel mercato per i sistemi con celle polimeriche e a carbonati fusi è prevista dopo il 2015, per quelli ad ossidi solidi nel più lungo termine.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività inserite in questo tema di ricerca hanno l'obiettivo generale di sviluppare un insieme di tecnologie e processi innovativi da impiegare per la messa a punto di sistemi cogenerativi con celle a combustibile con caratteristiche competitive in termini di prestazioni, costi e durata. A tal fine sono previsti interventi che riguardano, in maniera prioritaria, lo sviluppo dei sistemi con celle a carbonati fusi (MCFC) alimentati con biogas e gas derivante da biomasse ed, in particolare, la riduzione del costo di produzione dei componenti di cella e la integrazione delle celle con sistemi di digestione anaerobica e di gassificazione delle biomasse.

In questo tema di ricerca sono inserite inoltre alcune attività di supporto ai Ministeri per le collaborazioni internazionali nel settore dell'idrogeno e delle celle a combustibile e la partecipazione dell'ENEA alle stesse.

Gli obiettivi previsti per le due linee sono riportati sinteticamente nel seguito:

A. Produzione su scala pilota di matrici per MCFC di dimensioni fino a 1 m² con la tecnologia di formatura in plastico e loro caratterizzazione, anche attraverso prove in cella

Sulla base della tecnologia di formatura in plastico messa a punto durante il primo anno, viene validata la scalabilità del processo fino alle dimensioni di 1 m², attraverso le seguenti attività:

- realizzazione di lotti di compound prototipali atti all'alimentazione dell'impianto;
- validazione del passaggio di scala e messa a punto dei parametri di processo;
- realizzazione di lotti prototipali di matrici di dimensioni fino al m² e caratterizzazione degli stessi, anche attraverso prove in monocella da 100 cm²;

 valutazioni tecnico-economiche, con verifica dei vantaggi del processo rispetto alla colatura su nastro attualmente impiegata.

In parallelo viene inoltre verificata la scalabilità del processo di produzione delle polveri di alluminato di litio in fase y, messo a punto in laboratorio nella precedente annualità.

B. Sviluppo dei processi di fabbricazione degli elettrodi in plastico, produzione degli stessi su scala pilota e loro caratterizzazione

L'applicazione alla produzione degli elettrodi (anodo e catodo) del processo di formatura in plastico, sviluppato per le matrici, potrebbe consentire, anche in questo caso, dei vantaggi rispetto alla colatura su nastro, sia in termini ambientali (assenza di solventi) che economici (elevata produttività, possibilità di recupero e riutilizzo degli sfridi). La diversità dei materiali di partenza (polveri metalliche a base nichel e nichel-cromo, rispettivamente per catodo ed anodo) e la necessità di uno step finale di sinterizzazione, non necessario per la matrice, rendono i processi da sviluppare per anodo e catodo diversi da quello della matrice, oltre che tra di loro (in termini di polimeri e in parte anche di attrezzature da utilizzare). E' quindi necessaria una analisi preliminare, che consenta di:

- valutare i più recenti sviluppi delle tecnologie utilizzabili per la formatura del granulato termoplastico (estrusione di polveri metalliche miscelate con additivi polimerici) e per la formatura del prodotto finale (estrusione in lastre o stampaggio a iniezione);
- valutare, su tale base, le criticità del processo, anche in relazione ad eventuali modifiche e integrazioni delle attrezzature disponibili;
- definire le caratteristiche dei tecnopolimeri da utilizzare, sia in relazione alla loro funzione nella fase di formatura, che alla facilità di eliminazione degli stessi nelle fasi successive.

Successivamente viene valutata, su scala pilota da laboratorio, la fattibilità del processo di formatura in plastico per l'anodo a base di nichel-cromo e il catodo a base di nichel. A tal fine viene studiato e sviluppato, per ognuno degli elettrodi, un processo che consta delle seguenti fasi:

- definizione della metodologia di preparazione del compound plastometallico (individuazione e sperimentazione delle ricette, messa a punto della miscelazione e della successiva estrusione) e produzione di quantitativi sufficienti per la sperimentazione su scala pilota;
- realizzazione di campioni "verdi" mediante pressa a iniezione e pressatura uniassiale a caldo e messa a punto dei trattamenti termici di deceratura e sinterizzazione;
- caratterizzazione fisico-strutturale-dimensionale dei componenti ottenuti dopo sinterizzazione, confronto con quelli preparati per colatura e verifica della necessità di eventuali trattamenti meccanici di rullatura;
- messa a punto del processo di ossidazione e pre-impregnazione con carbonati (solo per l'anodo);
- congelamento dei parametri di processo e realizzazione di campioni prototipali da sottoporre alla qualifica finale.

C. Alimentazione di celle a carbonati fusi con biogas: sperimentazione dei processi e progettazione di un sistema completo digestore/clean up; prove in cella con gas simulati, con componenti sia tradizionali che innovativi

A partire dai risultati ottenuti durante il primo anno, vengono sviluppati sistemi alimentati con biogas attraverso le seguenti attività:

- sperimentazione del processo di digestione anaerobica per miscele frazione organica dei rifiuti solidi urbani/reflui zootecnici, con determinazione della configurazione ottimale del reattore e dei parametri di funzionamento (temperature, composizione della miscela utilizzata, ecc.) da impiegare per procedere allo scale up:
- studio del sistema di clean-up e individuazione, attraverso prove in laboratorio, del sistema di clean up più adatto per la purificazione del biogas; prove di catalizzatori commerciali e sintesi di nuovi catalizzatori;
- progettazione di un sistema digestore / clean-up in scala laboratorio;
- prove in cella con componenti tradizionali alimentati con gas simulante quello proveniente dalla catena biodigestore / clean-up / reformer, con composizione basata su dati di letteratura; determinazione dei limiti delle impurezze accettabili per la cella;
- prove in cella degli anodi rivestiti con composti in grado di fissare lo zolfo, preparati durante il primo anno, sia con gas di composizione standard che con quello proveniente dalla catena biodigestore / clean-up / reformer.

D. Alimentazione di celle a carbonati fusi con gassificatori di biomasse: analisi dei sistemi di clean up del gas e accoppiamento di un gassificatore di tecnologia nazionale con uno stack di celle

Lo sviluppo di sistemi di gassificazione delle biomasse è in corso presso il centro ENEA della Trisaia, dove sono disponibili prototipi di gassificatori di diverse tecnologie e si sta studiando la possibilità di utilizzare il gas prodotto dagli stessi per l'alimentazione di celle a combustibile. In particolare, nell'ambito di un progetto FISR finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca è prevista la realizzazione di un impianto costituito da un gassificatore di biomasse, realizzato con tecnologia austriaca in un progetto europeo, ed uno stack da 125 kW con celle a carbonati fusi. Il presente obiettivo si propone di ampliare l'attività in corso, attraverso una valutazione delle alternative disponibili per la purificazione dei gas e la realizzazione di quanto necessario per collegare lo stack anche ad un sistema di gassificazione di tecnologia nazionale, messo a punto di recente.

In particolare:

- le diverse tecnologie disponibili per la purificazione dei gas in uscita dal gassificatore, sia a freddo che a caldo, verranno analizzate al fine di individuare quelle più adatte per l'accoppiamento con celle a carbonati fusi;
- una parte della corrente gassosa prodotta dal gassificatore a letto fluido ricircolante da 1,3 MWt, disponibile in Trisaia, verrà utilizzata per alimentare lo stack di celle; a tal fine verrà realizzato e progettato il collegamento tra lo stesso gassificatore e lo stack, acquisendo i componenti necessari (compressore, piping, valvole e sistema di regolazione, serbatoio di accumulo del gas).

E. Studio di sistemi ibridi celle ad alta temperatura/turbina; valutazione delle problematiche connesse con l'impiego delle celle a carbonati fusi come concentratori di CO₂

L'utilizzo in una turbina degli effluenti di una cella a combustibile ad alta temperatura consente di ottimizzare il sistema da un punto di vista energetico, aumentandone in maniera significativa il rendimento. L'ENEA, impegnato nell'ambito di un progetto parallelo nello studio e sperimentazione di sistemi ibridi con celle a carbonati fusi, propone, con questo obiettivo, di analizzare le problematiche connesse con l'accoppiamento di una turbina con le celle ad ossidi solidi, che funzionano a temperatura maggiore (900-1000 °C, invece di 650 °C). A tal fine vengono analizzate, anche attraverso modelli matematici, le diverse configurazioni possibili per il sistema, individuando i vantaggi e gli aspetti critici delle varie soluzioni e confrontando gli stessi con quelli dei sistemi ibridi con celle a carbonati.

Vengono inoltre ripresi gli studi effettuati da RSE S.p.A (allora CESI Ricerca) nell'ambito del progetto "GENDIS" sul possibile impiego delle celle a carbonati per la concentrazione della CO₂ presente nei fumi delle centrali termiche (la cella utilizza la CO₂ presente al catodo trasferendola all'anodo, aumentando la sua concentrazione e favorendone la separazione), con due obiettivi:

- aggiornare gli studi di sistema già effettuati da RSE agli inizi degli anni 2000, approfondendoli alla luce sia delle nuove politiche energetiche e ambientali, che delle recenti evoluzioni della tecnologia delle celle a carbonati fusi. Questa attività viene svolta nell'ambito del tema di ricerca 5.2.5.9 (Obiettivo C, Studi su sistemi non convenzionali di separazione e stoccaggio della CO₂ per le piccole/medie taglie), in stretta correlazione con le analisi, a livello di sistema, previste sul tema della CO₂;
- affrontare l'accoppiamento centrali termiche celle a carbonati fusi dal punto di vista del sistema celle, studiando le problematiche connesse con l'alimentazione dei fumi delle centrali al catodo di una cella a carbonati. Queste attività riguarderanno, in particolare, lo studio della compatibilità dei componenti di cella, sia metallici che non, con i diversi composti presenti nei fumi, anche attraverso prove sperimentali, ove necessario, in modo da valutare la complessità, e la fattibilità tecnica ed economica, dei processi di purificazione richiesti.

F. Supporto a MSE e MATTM per la partecipazione a progetti internazionali e per la definizione di programmi nazionali su idrogeno e celle a combustibile; partecipazione dell'ENEA alle collaborazioni internazionali nel settore.

In quest'ambito ENEA svolge azioni di supporto tecnico-scientifico ai Ministeri sia per la definizione di un quadro nazionale di riferimento, che guidi gli operatori coinvolti nel settore delle celle a combustibile e in quello, strettamente collegato, dell'idrogeno, sia per la partecipazione alle collaborazioni internazionali che coinvolgono i Ministeri stessi (come la International Partnership for Hydrogen Economy, IPHE, promossa dall'US DOE).

Vengono inoltre condotte attività di ricerca esplorativa su nuovi metodi di produzione di idrogeno, quali i processi fotoelettrochimici.

Proseguono inoltre le attività connesse con la presenza dell'ENEA nel Raggruppamento della Ricerca (N.ERGHY) della JTI europea su Celle a Combustibile e Idrogeno e nell'ambito degli Implementing Agreements dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) riguardanti le stesse tematiche ed in particolare, quelli su: "Avanced Fuel Cells", "Electric and Hybrid Technologies and Programmes", "Hydrogen".

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Produzione su scala pilota di matrici per MCFC di dimensioni fino a 1 m² con la tecnologia di formatura in plastico e loro caratterizzazione, anche attraverso prove in cella

Le attività su questo tema sono da considerarsi il proseguo, senza soluzione di continuità, di quelle relative al primo anno dello Accordo di Programma. Infatti, sulla base della tecnologia di formatura in plastico sviluppata in precedenza su piccola scala, questa linea prevedeva principalmente lo studio e la messa a punto del processo di produzione di matrici in γ -LiAlO $_2$ fino alle dimensioni del m^2 . In particolare le attività sono state suddivise in diverse fasi:

- ottimizzazione linea di estrusione compound;
- realizzazione lotti di compound atti all'estrusione su lastra;
- implementazioni linea di estrusione su lastra e sperimentazione;
- test in stack da dieci celle con dispositivo sviluppato in FN;
- valutazioni circa il processo di formatura in plastico di matrici rispetto a quello di colatura su nastro;
- valutazioni in merito a scale –up processo di sintesi di polveri di litio alluminato.

Le attività svolte e i risultati ottenuti vengono sintetizzati nel seguito.

A.1 Ottimizzazione del compound a base γ–alluminato di litio

Al fine di avere una migliore manipolabilità delle matrici da 0,25 mm di spessore, soprattutto nell'ottica della movimentazione di fogli da un metro quadro, sono state studiate e sperimentate ulteriori ottimizzazioni alla ricetta di compound denominata γ 13; sono state apportate modifiche non solo alla ricetta in termini di tipologia di componenti e percentuali, ma anche alle modalità di additivazione degli ingredienti stessi. Sono state testate nove mescole fino ad arrivare a quella ritenuta più interessante dal punto di vista della manipolabilità, a parità di altre caratteristiche, la γ 22. Tutti i lotti di compound ottenuti (dal γ 14 al γ 22) sono stati impiegati per realizzare campioni da sottoporre a caratterizzazione. In particolare, tutti i lotti sono stati analizzati dal punto di vista della TGA/DSC impiegando lo strumento acquisito durante la prima annualità del presente AdP.

Con i lotti di compound di cui sopra, sono stati realizzati diversi campioni di matrice, anche sperimentando spessori diversi dal tradizionale 0,25 mm. I parametri di processo sono stati via via modificati in funzione delle caratteristiche reologiche delle diverse mescole.

Tutti i campioni realizzati sono stati sottoposti a caratterizzazione in laboratorio. Ciascun campione è stato controllato dimensionalmente in laboratorio metrologico per determinarne le dimensioni e la densità geometrica al verde: la densità media ricavata è di 1,60 g/cm 3 . Si è visto, come, in funzione della tipologia di mescola adottata, anche la modalità di misura dello spessore dovesse essere valutata: con mescole tipo γ 13 il materiale è più rigido e quindi può essere misurato con un micrometro senza essere deformato (soprattutto negli spessori più elevati), mentre con mescole più morbide tipo γ 22 si è visto che era necessario impiegare un comparatore con tastatore puppitast.

Le analisi porosimetriche, effettuate con porosimetro a mercurio, su campioni decerati in forno in aria a 650 °C con cicli opportunamente studiati in funzione delle mescole, delle prove effettuate e delle analisi termogravimetriche, hanno, in generale, dato valori attorno al 55% per quanto riguarda la porosità aperta e dimensioni medie dei pori inferiori a 0,5 μ m.

I campioni di matrice sono stati verificati dal punto di vista visivo al verde mediante passaggio alla lavagna luminosa. Non sono state evidenziate difettologie. Sono state seguite quindi analisi EDAX per verificare la presenza di inquinanti e non sono stati elementi estranei. Rispetto ai campioni ottenuti per colatura su nastro, quelli ricavati con la formatura in plastico mostrano una consistenza maggiore dopo deceratura. Sono stati osservati morfologicamente al microscopio elettronico a scansione sia in superficie (come di solito viene fatto per i colati) sia in sezione. Sono state effettuate analisi su campioni di spessore diverso e messe a confronto sezioni di

campioni da 0,25 mm dopo deceratura ottenute per frattura e per taglio (Figura 146): non sono state notate differenze significative. Ciò implica che una operazione di taglio, necessaria per rifilare le lastre di dimensioni del metro quadro, non crea problemi di schiacciamento del provino e di chiusura di porosità residenti sul bordo del campione.

A.2 Ottimizzazione linea di estrusione compound

Al fine di migliorare la compoundazione e raggiungere una maggiore produttività, sono state apportate alcune modifiche allo stesso impianto di compoundazione. In particolare:

- è stata realizzata interamente in officina FN una nuova testa di estrusione a tre fori (Figura 147a) (anziché 5 come quella precedente), che consente una migliore compressione del materiale ed una minore stagnazione dello stesso in zone morte;

 Figura 146. Immagine sezione di frattura di un provino da 0,25 mm dopo deceratura (5000 X)
- è stata realizzata, sempre interamente in FN, una nuova vaschetta, per contenere l'acqua necessaria a raffreddare gli "spaghetti" di plasto-ceramica: tale vasca (Figura 147b), di dimensione tripla della precedente, si è rivelata necessaria per incrementare il raffreddamento del materiale e quindi favorire il taglio degli spaghetti nella taglierina in linea con conseguente maggiore produttività;
- sono state effettuate modifiche alla stessa taglierina in linea intervenendo sia sulle lame sia sulla regolazione della fresa.





Figura 147. Particolari della linea di estrusione

A.3 Realizzazione lotti di compound atti all'estrusione su lastra

Per poter produrre lotti di compound adeguati ad effettuare prove di estrusione significative (si parla di alcuni quintali di compound), è stato necessario ripristinare la funzionalità del turbomiscelatore industriale Caccia (Figura 148), avente capacità adeguata per la miscelazione di grossi quantitativi di materiale, e determinare i parametri di cambiamento di scala.

Dato l'alto costo del γ —alluminato di litio si è deciso di realizzare, in parallelo al compound a base litio alluminato (ordine dei 100 kg) un compound simulante (costituito dalla stessa percentuale di polimero, ma con talco come carica minerale) con il quale effettuare le prove per settare i parametri e verificare le eventuali modifiche da apportare alla linea stessa prima di inserire il prezioso litio alluminato.

Accanto al compound simulante e a quello a base di alluminato di litio, si è anche prodotto un compound di pulizia, realizzato ad hoc, in funzione delle specifiche esigenze dell'impianto. Al fine di essiccare il compound realizzato



Figura 148. Turbomiscelatore di taglia semi-industriale

per evitare problematiche durante la successiva estrusione su lastra, è stato impiegato un essiccatore acquisito alla fine del primo anno dell'Accordo di Programma; tale essiccatore è stato modificato in funzione delle esigenze specifiche (Figura 149).



Figura 149. Essiccatore e particolare dell'interno con il compound ad essiccare

A.4 Implementazioni linea di estrusione su lastra e sperimentazione

Per quanto riguarda la linea di estrusione su lastra, sono state effettuate le seguenti implementazioni:

- è stato individuato il sistema di gestione elettronica dell'estrusore Toscana (Figura 150), delle zone di temperatura della testa piana e della calandra in sincrono; il sistema è stato installato e collaudato;
- è stato completato il circuito di raffreddamento della calandra;
- sono state effettuate prove di funzionamento dell'impianto, impiegando sia polipropilene puro sia il compound simulante.

A valle di tali prove preliminari sono stati eseguiti ulteriori interventi volti ad ottimizzare l'intera linea: riscaldamento testa di estrusione mediante l'inserimento di altre resistenze piane aggiuntive per migliorare il mantenimento



Figura 150. Estrusore Toscana

della temperatura, aggiunta di ulteriore coibente al fine di minimizzare la dispersione termica, potenziamento della spinta della vite e della velocità dei rulli della calandra intervenendo, rispettivamente, sugli azionamenti del motore dell'estrusore e di quello della calandra.

Nel periodo di riferimento, a seguito della decisione del CDA FN, l'impianto è stato smontato e trasferito nella sede ENEA di Saluggia. Allo scopo sono state elaborate e messe in opera procedure per il corretto smontaggio e riallestimento della linea nel nuovo sito. Sono state quindi individuate ed impostate le modifiche da applicare ai parametri macchina per l'esecuzione della prova con il compound caricato a base di alluminato di litio. Sono state messe a punto le condizioni operative con cui operare e si è visto che è possibile ottenere delle lastre di larghezza 660-670 mm. Lo spessore dei campioni realizzati è stato di 0,45 mm. Impostando spessori più sottili si può ottenere un fattore di stiro maggiore e quindi una lastra più larga. Data la particolare natura del materiale e la

necessità di avere componenti privi di difetti, al fine di non crearne a causa di una non corretta manipolazione, si è visto come sia importante inserire un rullo o un gruppo di rulli intermedi fra la calandra ed il traino in modo che possano sostenere la lastra ed evitare che si formino delle distorsioni nel passaggio dalla calandra al traino (Figura 151)

Prelevati alcuni campioni, questi sono stati analizzati in laboratorio dal punto di vista visivo e della densità/ porosità. Si sono riscontrati gli stessi valori ottenuti con i campioni realizzati mediante pressatura uniassiale a caldo: 1,60 g/cm³ di densità verde media e porosità attorno al 55% della teorica con diametro medio in specifica.

Figura 151. Prova di passaggio tra due rulli

La sperimentazione condotta ha dimostrato la fattibilità

della realizzazione di matrici per MCFC con un impianto lastra in scala pilota e ha permesso di individuare ulteriori implementazioni da apportare alla linea al fine di migliorare la qualità del prodotto.

A.5 <u>Test di valutazione performance delle matrici presso FN in stack da dieci celle e presso ENEA nella postazione</u> testing MCFC

Al fine di provare anche la funzionalità delle matrici sono state effettuate prove in FN ed ENEA. In particolare presso FN è stato eseguito un test in stack da dieci celle. Questa parte di sperimentazione, condotta in continuità con quanto svolto nel primo anno dell'Accordo di Programma, aveva più finalità:

- verificare il comportamento delle matrici realizzate con le nuove mescole e di spessori diversi;
- verificare l'impatto delle implementazioni apportate allo stesso impianto, progettate e realizzate in collaborazione con il CESAL (Centro di Servizi per la gestione della Sede di Alessandria del Politecnico di Torino) per quanto riguarda le valutazioni delle caratteristiche elettriche del dispositivo di prova, il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino per quanto concerne lo studio di modellistica dei parametri più rilevanti (profilo di temperature, concentrazione e fluidodinamica dei gas e valutazione delle zone più attive) ed il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Genova per lo sviluppo di un processo a basso a costo per la produzione di gamma alluminato di litio e la caratterizzazione pre- e post test degli elettrodi;
- standardizzare le procedure di prova seguendo i principi guida della normativa EN 62282-3-2:2006.

In questa prova, all'interno dello stack, le matrici sono state posizionate nella configurazione a scarico aperto (senza ricircolo dei gas) riportata di seguito:

Cella 1	3 matrici da 0,25 mm		
Cella 2	1 matrice da 0,75 mm		
Cella 3	2 matrici da 0,38 mm		
Cella 4	3 matrici da 0,25 mm		
Cella 5	1 matrice da 0,75 mm		
Cella 6	2 matrici da 0,38 mm		
Cella 7	3 matrici da 0,25 mm		
Cella 8	1 matrice da 0,75 mm		
Cella 9	2 matrici da 0,38 mm		
Cella 10	3 matrici da 0,25 mm		

Il ciclo di condizionamento è sempre una fase fondamentale per il funzionamento dello stack. Per l'impostazione del ciclo sono stati considerati i risultati dell'analisi TGA delle matrici in plastico ed informazioni bibliografiche sulle principali condizioni (gas, rampa di temperatura, velocità di salita) per cicli di condizionamento di celle MCFC. Sulla base di queste considerazioni è stato impostato un ciclo che ha avuto una durata complessiva di 9 giorni. Il ciclo presentato in Tabella 14 è composto da diverse rampe di salita di temperatura e fasi di stasi in modo da ottenere una perdita controllata dei materiali plastici ed altri leganti contenuti nelle matrici.

Le impostazioni del programma di riscaldamento, del controllo di temperatura e dei gas impiegati durante questa fase sono realizzate mediante un programma costruito con il software National Instruments Labview 7.1 sviluppato appositamente per la cella MCFC.

Tabella 14. Ciclo termico testato

Ctata	Townsetons (°C)	dT/dt (°C/h)		O : (%)	
Stato	Temperatura (°C)	ar/at (C/n)	Catodo	Anodo	Ore (h)
Rampa	T amb – 200	3,5	N ₂	N ₂	50
Stasi	200		N ₂	N ₂	11
Rampa	200-300	4	N ₂	N ₂	24
Stasi	300		N ₂	N ₂	20
Rampa	300-450	5	Aria, N ₂	N ₂	30
Stasi	450		N ₂	N ₂	36
Rampa	450-520	3	N ₂	N ₂	24
Rampa	520-650	5,9	Aria, CO ₂ , N ₂	H ₂ , CO ₂ , N ₂	24
Operazione	650		Aria, CO ₂ , N ₂	H ₂ , CO ₂ , N ₂	
				Totale	219

I componenti porosi, anodo e catodo, assemblati nello stack sono stati ottenuti tramite processo tradizionale (tape casting e sinterizzazione), con caratteristiche dimensionali e chimico fisiche tipiche dello stato dell'arte per le celle MCFC. Tutti i componenti porosi dello stack sono stati realizzati in FN a partire dalle materie prime (polveri, leganti, solventi, ecc.) consolidate, con le caratteristiche descritte in Tabella 15.

Le matrici sono state ottenute tramite processo innovativo per estrusione di un compound plasto-ceramico, contenente alluminato di litio in fase gamma.

Tabella 15.	Compon	nenti stack	di 10	celle
-------------	--------	-------------	-------	-------

Componente	Materiale	Area (cm²)	Spessore (mm)	Porosità (%)	Diametro medio dei pori (μm)
Catodo	Nichel	70,88	0,50	70	~ 9,0
Anodo	Nichel – Cromo 5%	70,88	0,50	50	~ 4,5
Matrice	γ - LiAlO ₂	70,88	0,25 x 3 0,38 x 2 0,75 x 1	~ 50	≤ 0,5
Separatore	AISI 304	Interna = 70,88	0,75 / 1,00		

Superata la fase di condizionamento e start-up, sono state condotte le valutazioni delle prestazioni delle stack. Sono stati seguiti i principi guida della normativa EN 62282-3-2:2006 (Stationary fuel cell power systems - Performance test methods), con l'obiettivo di:

- valutare il comportamento delle matrici in fase di condizionamento e in fase d'operazione;
- valutare le prestazioni dello stack in esercizio, seguendo la normativa EN 62282-3-2:2006 per avviare un primo approccio ad una procedura standard;
- analizzare i componenti dopo lo smontaggio dello stack.

I dati sperimentali prodotti nella fase di valutazione delle prestazioni elettrochimiche, hanno portato a concludere che le matrici hanno dimostrato una buona funzionalità, purtroppo però, per ragioni dovute essenzialmente alla necessità di ulteriori interventi sull'hardware (la postazione di testing e lo stack) non è stato possibile confermare tale funzionalità con test elettrochimici qualitativamente validi in termini di durata e di stabilità di funzionamento della postazione.

A.6 Valutazioni del processo di formatura in plastico di matrici rispetto al tape casting

Sulla base della sperimentazione sin qui condotta, sia presso ENEA che presso FN, si può confermare che il processo di formatura in plastico di matrici sia sicuramente migliorativo dal punto di vista della produttività e della eco-compatibilità rispetto a quello tradizionale di colatura su nastro. Una volta individuati e settati i parametri (che ricordiamo sono molto diversi da quelli utilizzati per un polimero puro), si può effettuare la produzione di diverse colate in un tempo molto limitato. Attualmente, per le stesse caratteristiche degli impianti pilota presenti in FN, il "collo di bottiglia" è rappresentato dalla possibilità di realizzare in tempi altrettanto brevi il compound di alimentazione che, data la capacità dell'estrusore della linea su lastra, deve essere prodotto in quantitativi elevati. In questo senso, sarebbe opportuno, prevedere l'acquisizione di un estrusore bivite di capacità maggiore in grado di processare quantitativi più elevati di mescola rispetto a quello attualmente disponibile, in grado di produrre 20 kg/ora di compound. D'altra parte, la compoundazione rappresenta uno step fondamentale per la qualità finale del prodotto in quanto se non si parte da una ottima miscelazione non si riesce ad ottenere una lastra omogenea.

La sperimentazione condotta ha permesso di individuare ulteriori implementazioni da apportare alla linea che potranno, sicuramente, migliorarne la produttività.

A.7 <u>Valutazioni in merito a scale-up processo di sintesi di polveri di Litio Alluminato</u>

Per quanto riguarda la polvere di γ -alluminato di litio, si è proceduto, in collaborazione con l'Università di Genova, oltre che all'approfondimento delle peculiarità delle diverse tecniche prese in considerazione, ad un confronto tecnico-economico che ha portato a concludere che il metodo più interessante, per entrambi gli aspetti, è quello termico.

In FN è stata effettuata una valutazione tecnica con relativa indagine di mercato circa la tipologia di forno più adatta allo scale-up del processo da laboratorio a pilota; l'attenzione si è concentrata su forni in continua in grado di fornire produttività dell'ordine di 50 kg al giorno ed il cui costo si aggira attorno a 70000 €.

In particolare presso l'Università di Genova è stata condotta l'attività di ottimizzazione della polvere di alluminato di litio per matrici MCFC, attraverso i seguenti approcci sperimentali:

- sintesi per reazione allo stato solido di γ-alluminato e confronto con la sintesi per via umida (sol-gel);
- individuazione e messa a punto di un metodo allo stato solido per la sintesi di α -alluminato.

Sono state eseguite diverse prove di sintesi di polvere con granulometria più grossolana del tradizionale "HSA" (frazione fine) ma la fase di accrescimento dei grani si è rivelata particolarmente critica e in definitiva antieconomica.

Nella fase conclusiva del lavoro, la ricerca è stata orientata alla sintesi di α -alluminato di litio che, allo stato dell'arte, è indicato come materiale più idoneo del corrispettivo gamma all'utilizzo in sistemi MCFC con prospettive di lunga durata, per via della maggiore stabilità alle elevate temperature di esercizio.

Infine, è stata individuata una possibile soluzione per l'ottimizzazione delle matrici in α -alluminato, tramite l'inserimento di fibre rinforzanti.

B. Sviluppo dei processi di fabbricazione degli elettrodi in plastico, produzione degli stessi su scala pilota e loro caratterizzazione.

Questa linea prevede, nella sua fase iniziale, l'effettuazione di un'analisi preliminare al fine di valutare la possibilità di estendere il processo di formatura su plastico anche agli elettrodi per celle MCFC con particolare attenzione alle criticità che si dovranno affrontare rispetto alla realizzazione delle matrici.

In assenza di riferimenti in letteratura ad esperienze di formatura in plastico di elettrodi per MCFC si è deciso di basarsi sulle precedenti esperienze di compoundazione effettuate in FN su materiali metallici (non a base nichel e nichel cromo) e su carburo di silicio nonché sull'esperienza maturata nell'ambito delle matrici.

In questa fase di approccio al processo di formatura si è ritenuto opportuno concentrarsi sui materiali tradizionalmente impiegati per anodo e catodo, ossia nichel-cromo e nichel. Per quanto riguarda le caratteristiche finali degli elettrodi, si è deciso di rapportarsi a quanto presente in letteratura per ciò che concerne soprattutto la percentuale di porosità aperta, il diametro medio dei pori e lo spessore, tenendo, in questa prima fase esplorativa, come riferimento i componenti ottenuti per colatura su nastro (anche se, come già visto per le matrici, le due tecniche hanno una precisa e peculiare connotazione). Le principali criticità da affrontare sono state:

- 1. problematiche di sicurezza legate alla manipolazione delle polveri di nichel e di cromo durante il caricamento dei miscelatori per la fase di miscelazione con gli altri componenti della mescola;
- 2. la necessità di individuare un polimero (o una combinazione) compatibile con il nichel (ed il nichel-cromo) dal punto di vista chimico e di facile espulsione in deceratura;
- 3. la possibilità di rendere compatibile un polimero con il nichel, qualora questo fosse il miglior compromesso per la formatura e la deceratura;
- 4. le caratteristiche di densità elevata delle polveri metalliche rispetto a quelle di alluminato di litio in confronto alle densità dei polimeri possono creare dei fenomeni di sedimentazione e stratificazione durante la fase di stampaggio o estrusione che si possono ripercuotere sulla successiva deceratura e sinterizzazione creando difettologie;
- 5. la necessità di avere un'ottima dispersione della carica metallica all'interno del compound al fine di ottenere semilavorati omogenei che non abbiamo problematiche di ritiro differenziato una volta sottoposti a trattamento termico;
- 6. la possibilità di ottenere l'elevata porosità, soprattutto per quanto riguarda il catodo, compatibilmente con l'ottenimento di una struttura consistente dopo deceratura;
- 7. l'estrema importanza del trattamento termico di deceratura e sinterizzazione sulle caratteristiche del prodotto finito; si è pensato anche all'eventualità di prendere in considerazione, in alternativa al tradizionale trattamento termico in forno, quello mediante l'impiego di microonde, al fine di verificare una migliore evacuazione dei leganti organici.

B.1 <u>Catodo</u>

In particolare per quanto concerne il catodo, a seguito dello studio preliminare effettuato, si è deciso di condurre la sperimentazione impiegando la polvere commerciale della INCO. Tale polvere si presenta filamentosa, con diametro della "cross section" compreso tra 1-5 μ m, distribuzione granulometrica con moda nel range 30-50 μ m, area superficiale minore di 1 m²/g e densità apparente di 0,5-0,75 g/ml. In Figura 152 sono presentate due immagini ottenute al microscopio elettronico a scansione che mostrano la morfologia della suddetta polvere.

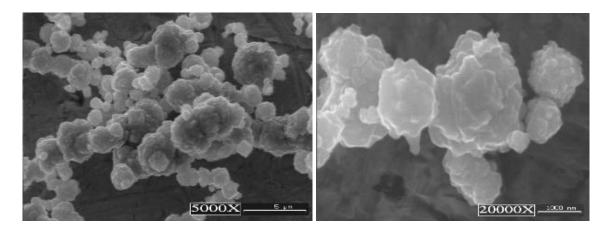


Figura 152. Morfologia al SEM della polvere di nichel

La messa a punto del processo di formatura ha richiesto un lavoro complesso basato su differenti fasi di lavorazione, dalla produzione del compound, alla fase di formatura a quella di deceratura ed infine di sinterizzazione. Ciascuna fase ha richiesto diversi passaggi prima di poter arrivare a definire i parametri di processo adatti a rispettare le specifiche del prodotto finale.

Ogni fase ha richiesto inoltre una consistente attività di analisi chimico-fisiche e morfologiche condotte sia presso FN che presso l'Università di Genova e il Politecnico di Torino. In base ai risultati ottenuti ed alle caratterizzazioni dei materiali prodotti è stato necessario rifare, come già detto, più volte lo stesso step al fine di ottenere la combinazione ottimale dei differenti parametri che controllano l'intero processo produttivo, quali il rapporto tra polvere e legante, le procedure di miscelazione, il processo di deceratura e sinterizzazione, la modalità di aggiunta degli additivi organici, l'umidità delle polveri, il raffreddamento degli "spaghetti" all'uscita degli estrusori, la temperatura di stampaggio, i polimeri e gli additivi lubrificanti. I quantitativi di polvere e di legante da miscelare sono stati impostati sulla base della percentuale di porosità propria del catodo riscontrata in letteratura, ossia 76-78%. In particolare, come punto di partenza per la sperimentazione (sia per verificare la compatibilità fra la polvere di nichel con il polipropilene e gli altri additivi organici, sia per sondare i limiti di fattibilità) sono state individuate due frazioni in peso di nichel, impiegando delle formule sviluppate ad hoc e tenendo conto che il legante, nel suo complesso, ha una densità media pari a $\rho = 0.99 \, \text{g/cm}^3$ mentre quella teorica del nicheli è $\rho = 8.9 \, \text{g/cm}^3$.

Le due frazioni in peso di nichel prese in considerazione inizialmente sono state: 71 e 63%, aventi, rispettivamente, densità teorica pari a: 2,49 g/cm³ e 2,07 g/cm³. Sono stati realizzati alcuni campioni preliminari stampando le miscele ottenute con la pressa a piani caldi.

I dati relativi alla formatura sono riportati di seguito:

Mescola	Densità compound [g/cm3]	Volume stampo [cm3]	Grammatura in stampo[g]
Ni71	2,49	6,4	19,1
Ni63	2,07	6,4	15,9
Ni50	1,63	6,4	12,5
Ni47	1,55	6,4	11,9
Ni45	1,51	6,4	11,6

I componenti stampati sono stati sottoposti a misurazione e pesati, come di può notare nella Tabella 16, si è giunti ad un valore di peso/area consono alle specifiche richieste per l'utilizzo in cella a combustibile, per cui si è pensato che le mescole Ni45, Ni47 e Ni50 potessero risultare adatte.

Tabella	16.	Valori	ottenuti d	dono s	tampaggio

Mescola	Peso [g]	S [mm]	V [mm³]	P [g/cm ³]	Peso su area [g/cm²]
Ni 71	16,2	1,16	7424	2,18	0,152
Ni 63	14,0	1,14	7296	1,92	0,134
Ni 50	11,3	1,12	7168	1,58	0,110
Ni 47,5	10,4	1,07	6848	1,52	0,106
Ni 45	9,6	1,09	6976	1,38	0,096

I componenti estratti dalla pressa sono risultati notevolmente migliori di tutti quelli prodotti precedentemente, presentando una finitura superficiale ottima, senza difettologie, uno spessore uniforme ed una certa facilità di estrazione dallo stampo.

A conclusione di questa linea di attività, si può affermare che:

- è stato sviluppato il processo di formatura di mescole per catodo sperimentando diverse miscele e polimeri appartenenti alla famiglia delle poliolefine; sono state individuate eventuali varianti polimeriche che potranno essere sperimentate per l'ottimizzazione del processo;
- sono stati messi a punto i parametri di formatura del verde, realizzando campioni tondi di diametro 170 mm con spessore nominale 0,75 mm;
- dal punto di vista dei trattamenti termici di deceratura (soprattutto) e sinterizzazione, si sono raccolti
 elementi utili per migliorare la qualità del prodotto; inoltre, si è visto come la tecnica di riscaldo tradizionale
 possa non essere la migliore nel caso di materiali con tendenza alla sedimentazione della parte metallica
 rispetto alla polimerica e che quindi possa essere più utile una modalità di tipo a microonde e/o infrarossi,
 che permette di riscaldare dal cuore del provino alla periferia e di velocizzare le tempistiche di ciclo;
- malgrado la totale assenza di letteratura in merito e quindi la necessità di testare tutto a livello sperimentale a partire da zero, le prove effettuate hanno permesso di verificare la fattibilità del processo di formatura in plastico per catodi (compatibilità della polvere di Ni con gli additivi e la metodologia di preparazione) e di raccogliere una serie di informazioni assolutamente utili per il proseguo e l'ottimizzazione del processo.

B.2 Anodo

La seconda parte dell'obiettivo prevedeva lo studio e sviluppo, in scala laboratorio, del processo di fabbricazione di anodi in plastico e la caratterizzazione dei componenti ottenuti.

Nel caso delle MCFC l'anodo è composto da una lega di nichel e cromo. Il problema principale da un punto di vista metallurgico è la difficoltà con cui si riescono ad ottenere dispersioni omogenee del cromo nella matrice metallica di nichel. Questo aspetto è uno dei principali punti di criticità nella produzione di anodi con la tecnologia di colatura su nastro e resta altrettanto problematico con l'estrusione. Il problema della dispersione si risolve con una miscelazione curata nel dettaglio. Un altro aspetto da verificare è se le modalità di esecuzione del trattamento termico influenzino o meno il comportamento del cromo e lo inducano a formare precipitati e agglomerati. Da dati di letteratura si apprende che per l'anodo è richiesta una porosità del 50–55% ed un diametro medio dei pori di

4 μm.

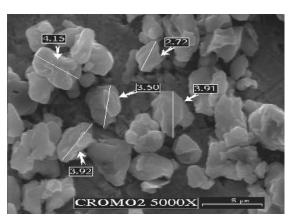


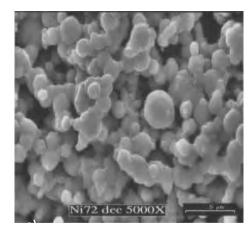
Figura 153. Morfologia al SEM della polvere di cromo

Per quanto riguarda le polveri di partenza, si è deciso di impiegare lo stesso nichel INCO, impiegato per il catodo, e di utilizzare una polvere di cromo che presenta una distribuzione granulometrica nell'intervallo 30-40 μ m e la morfologia visibile in Figura 153.

Le prove eseguite per il catodo hanno messo in evidenza che con la mescola al 71% di carica si ottiene una porosità ed un diametro medio dei pori prossimi a quelli richiesti per l'anodo. Per questo motivo sono state prodotte delle mescole, nelle quali l'unica variazione di rilievo, rispetto a quelle per il catodo, è rappresentata dall'aggiunta di un 3% in peso di cromo in sostituzione ad un pari quantitativo di nichel. Si è deciso di lavorare in un intervallo di carica solida molto ristretto poiché, grazie alle analisi e alle prove

effettuate sui catodi, è emerso che i valori ottimali sono racchiusi in questo limitato intervallo. Si è quindi deciso di

proseguire la sperimentazione impostando percentuali nell'intervallo 71-73% (ove questa percentuale rappresenta la somma di nichel e cromo). La metodologia usata per realizzare i primi campioni di catodo è stata utilizzata anche per l'anodo, in parallelo. I componenti stampati non hanno evidenziato alcun precipitato di cromo. I campioni sono stati sottoposti a deceratura e sinterizzazione (questa volta a 1045 °C in atmosfera riducente). I componenti realizzati presentano un aspetto visivo migliore rispetto ai campioni di catodo. La struttura, analizzata al microscopio elettronico a scansione, risulta più compatta. In Figura 154 si riportano due strutture a confronto dello stesso provino dopo deceratura e dopo sinterizzazione. La temperatura favorisce la saldatura fra le particelle.



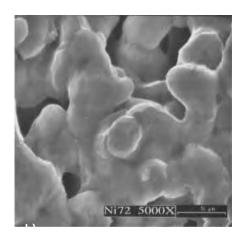


Figura 154. Campione di anodo72 (a) decerato e (b) sinterizzato

Dal punto di vista delle analisi porosimetriche e di densità sono stati riscontrati valori medi preliminari dell'ordine del 51% di porosità aperta e di diametro medio dei pori pari a $4,3~\mu m$. Non vi sono particolari differenze fra le tre percentuali di carica testate.

Sulla base di dati ottenuti sono state impostate ulteriori mescole, cercando di migliorare al massimo la miscelazione e la dispersione del cromo nel nichel.

A differenza del catodo, si è deciso di continuare con il polimero a base polipropilenica adottato precedentemente, sostituendo nella mescola un additivo organico lubrificante che aveva dato problemi nella prima parte della deceratura. Inoltre, si è curata molto la miscelazione del cromo e del nichel prima dell'incorporazione degli altri componenti e sono stati aggiunti degli additivi particolari per cercare di migliorare la compatibilità del nichel con il polimero. Le polveri di nichel e cromo sono state pre-trattate in muffola in modo da eliminare l'eventuale umidità presente e migliorare la loro scorrevolezza e reciproca miscibilità e con gli altri additivi.

Sulla base delle prove effettuate precedentemente si è deciso di mantenere la percentuale di carica solida sul 50% in peso, inserendo all'interno di questa percentuale il 3% in peso di Cr. La miscelazione è stata effettuata in turbomiscelatore Thyssen, ottenendo una buona dispersione del cromo e del nichel. Tale aspetto è stato verificato su un provino sinterizzato mediante analisi morfologica e microanalisi al microscopio elettronico a scansione.

Nella Figura 155, invece, si può notare la differenza fra due mescole in cui si ha una buona ed una ottima miscelazione. In particolare, la mescola mostrata in Figura 155b mostra un granulo polipropilenico completamente rivestita di polygra (Nij Cr)

rivestito di polvere (Ni+Cr).

La fase di estrusione dell'ultimo tipo di compound a base PP e Ni+Cr per anodo non ha presentato le problematiche incontrate per il catodo. Si è ottenuto da subito uno "spaghetto" molto omogeneo e liscio, facilmente tagliabile in linea. Anche in questo caso si è utilizzata la vasca di raffreddamento più lunga che ha consentito di avere un raffreddamento corretto e quindi un taglio netto del compound.

La sperimentazione è proceduta in parallelo

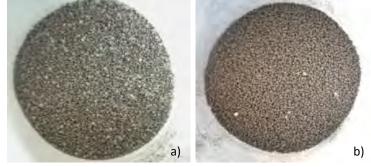


Figura 155. Mescola con buona e ottima miscelazione

a quella del catodo, seguendo lo stesso iter:

- essiccazione in muffola del compound ottenuto per eliminare l'umidità residua acquisita durante la fase di raffreddamento nel passaggio nella vasca con acqua;
- stampaggio ad iniezione con pressa Negri e Bossi NB100 con la realizzazione di semilavorati a forma di scatolino;
- pressatura a caldo con pressa a piani caldi Komage K50 dei semilavorati al fine di ottenere tondi da 170 mm di diametro e spessore medio pari a 0,75 mm;
- analisi TGA/DSC su campioni pressati;
- trattamenti termici di deceratura e sinterizzazione.

Come per il catodo, sono state effettuate diverse prove di stampaggio modificando i parametri di pressatura in termini di temperature delle zone della vite, di pressione di iniezione e di corsa di dosaggio al fine di verificare la possibilità di avere una densità nell'intervallo 1,47-1,68 g/cm³. Si è visto che, in questo caso, le condizioni ottimali per avere la massima densità erano:

temperature delle zone della vite: 220 – 210 – 170 °C

pressione di iniezione: 110 barcorsa di dosaggio: 20 mm.

Con i campioni ottenuti, sono state effettuate diverse prove di deceratura impiegando in diverse condizioni operative. Sono stati, inoltre, provati diversi supporti (piastre di molibdeno, piastre di grafite spalmate di BN, piastre di grafite senza BN) allo scopo di individuare la tipologia più adatta. Nelle varie prove sono stati inseriti in forno campioni di semilavorato (scatolini) e altri ricavati per taglio dai tondi formati con la Komage al fine di verificare l'influenza della doppia pressatura, così come per il catodo. Anche in questo caso, la doppia formatura ha fornito migliori caratteristiche al campione e quindi una migliore resa dopo i trattamenti termici. Così come per il catodo, la deceratura rappresenta una delle fasi più critiche. Anche in questo caso, viste le analisi, termogravimetriche occorre procedere con un gradiente molto lento, soprattutto nella fase fra i 260 ed i 420 °C. Per il proseguo dell'attività nel corso del III anno dell'Accordo di Programma, anche per l'anodo e con le stesse motivazioni, si ritiene utile approfondire la possibilità di impiegare la deceratura mediante microonde. come forma alternativa a questo trattamento.

I campioni sono stati poi sinterizzati testando alcuni cicli con temperatura massima di 1045 °C anche con tempi di permanenza diversi al fine di individuare le condizioni più opportune in funzione del supporto e del tipo di forno.

La caratterizzazione effettuata al microscopio elettronico a scansione evidenzia che la struttura migliore si ottiene impiegando come supporto una lastra di molibdeno. Tale struttura si avvicina a quella ottenuta per colatura su nastro come si può vedere nelle immagini riportate in Figura 156 che mette a confronto strutture realizzate con le due tecniche.

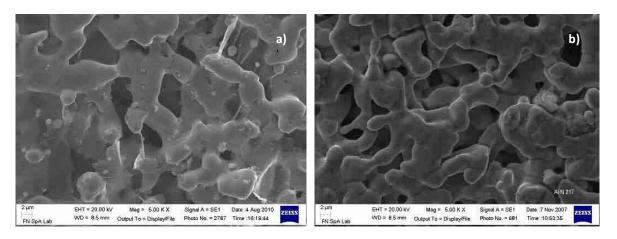


Figura 156. Morfologia di anodo in plastico (a) e anodo ottenuto per colatura su nastro (b)

Per quanto riguarda la porosità, la percentuale si attesta a valori leggermente inferiori a quelli del tape (51% contro 55%), mentre il diametro medio dei pori è leggermente aumentato rispetto alle prime prove.

In conclusione in questa linea di attività:

- è stato sviluppato il processo di formatura di compound per anodo sperimentando diverse miscele, con additivi
 e polimeri appartenenti alla famiglia delle poliolefine; sono state individuate eventuali varianti polimeriche che
 potranno essere sperimentate per l'ottimizzazione del processo; inoltre, è stata ben curata la dispersione del
 Cr in Ni a livello di miscelazione di polveri in turbomiscelatore;
- sono stati messi a punto i parametri di formatura del verde, realizzando campioni tondi di diametro 170 mm con spessore nominale 0,75 mm;
- dal punto di vista dei trattamenti termici di deceratura (soprattutto) e sinterizzazione, con la sperimentazione effettuata, si sono raccolti elementi utili per migliorare la qualità del prodotto (pur avendo già ottenuto microstrutture confrontabili con quelle di campioni realizzati via tape); come per il catodo, si ritiene utile approfondire la sperimentazione anche con tecniche di deceratura e sinterizzazione alternative (ad esempio con microonde e/o infrarossi) al fine di ridurre i tempi di ciclo;
- si è ottenuta una buona dispersione del Cr in Ni e la formazione della lega.

Le prove effettuate hanno permesso di verificare la fattibilità del processo di formatura in plastico per anodi (compatibilità delle polveri di nichel e cromo con gli additivi e la metodologia di preparazione) e di raccogliere una serie di informazioni assolutamente utili per il proseguo e l'ottimizzazione del processo.

C. Alimentazione di celle a carbonati fusi con biogas: sperimentazione dei processi e progettazione di un sistema completo digestore/clean up; prove in cella con gas simulati, con componenti sia tradizionali che innovativi

Per alimentare una cella a combustibile a carbonati fusi con biogas è necessario trasformare il metano in idrogeno attraverso un processo di reforming ed eliminare le impurezze presenti con una fase intermedia di clean up (Figura 157). Nel biogas sono infatti presenti piccole concentrazioni di sostanze che possono avvelenare sia il catalizzatore del reformer, sia gli elettrodi della cella a combustibile. Il principale inquinante presente nel biogas che può danneggiare gravemente l'anodo della MCFC è l'idrogeno solforato (H₂S). Lo zolfo è un costituente delle proteine che compongono il substrato organico del biodigestore e che vengono degradate in ambiente anaerobico con formazione di solfati convertiti infine in S²⁻, HS⁻ e H₂S.



Figura 157. Schema di utilizzo di scarti urbani o agricoli per l'alimentazione con biogas di uno stack di celle a combustibile ad alta temperatura

La riduzione della concentrazione di idrogeno solforato può essere realizzata prima di tutto ottimizzando il processo di fermentazione con lo studio di opportune condizioni di temperatura, acidità, aggiunta di additivi al digestore e un controllo accurato dei microrganismi. Successivamente si procede alla fase di clean up che rimuove la maggior parte dello zolfo ancora prodotto attraverso l'uso di letti contenenti sostanze adsorbenti quali zeoliti, carboni attivi, ferriti di zinco, o catalizzatori.

Il biogas, dopo il trattamento di clean up, contiene concentrazioni di zolfo dai ppb a pochi ppm. Lo studio dei meccanismi di avvelenamento dell'anodo può suggerire le condizioni migliori per limitare la caduta di prestazione della cella e per favorire l'eventuale rigenerazione dell'elettrodo. Un'ulteriore possibilità è lo studio e la preparazione di anodi alternativi trattati per essere refrattari all'avvelenamento o più facilmente rigenerabili sia in termini di velocità che di grado di reversibilità della reazione.

Le attività relative al presente obiettivo sono state suddivise in 4 linee, all'interno delle quali hanno collaborato con ENEA i seguenti organismi universitari:

• il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università di Roma "La Sapienza", per la sperimentazione in appoggio alla messa a punto dei processi di digestione anaerobica;

- Il Dipartimento di Energetica, TErmofluidodinamica applicatae Condizionamenti ambientali (DETEC) dell'Università Federico II di Napoli, per lo sviluppo di un modello di calcolo che partendo dai dati dell'Atlante delle biomasse sviluppato da ENEA nel corso del primo anno dell'AdP, fosse in grado di fare bilanci energetici e analisi tecnico-economiche comparate per stimare la bontà delle soluzioni sviluppate valutandole in possibili applicazioni reali da realizzare sul territorio italiano;
- il Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università di Napoli Federico II ed il Dipartimento Ingegneria Chimica ed Alimentare dell'Università di Fisciano (Salerno) per lo studio dei processi di clean up;
- il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia per le prove in monocella con gas simulati.

C.1 <u>Studio dei processi di digestione anaerobica al fine di migliorare la qualità del gas in termini di resa di biometano e di inquinanti (principalmente quelli a base di zolfo)</u>

Lo scopo principale delle attività svolte da ENEA in collaborazione con DICEA nell'ambito della presente ricerca, è consistito nella ottimizzazione del processo di produzione combinata di bio-idrogeno e bio-metano da substrati organici biodegradabili residuali, ciò al fine di consentirne un'appropriata integrazione con il processo di cogenerazione con celle a combustibile a carbonati fusi.

I substrati per la produzione di bio-idrogeno e biogas sono stati selezionati tra quelli più diffusamente presenti nel territorio nazionale ed europeo, con l'intenzione di individuare frazioni destinate a smaltimento finale e pertanto caratterizzate da un modesto valore commerciale. Sulla scorta delle precedenti attività di ricerca condotte da ENEA e dal DICEA nel settore, sono stati utilizzati ai fini della sperimentazione fanghi di depurazione delle acque reflue civili, la frazione organica dei rifiuti solidi urbani e le deiezioni suine. L'impiego di substrati organici di scarto per la produzione di vettori energetici ha il duplice obiettivo della valorizzazione energetica e della contemporanea gestione sostenibile di residui organici di origine civile, riducendone i quantitativi da avviare a discarica controllata. L'ENEA ha concentrato i suoi sforzi sull'ottimizzazione del processo di co-digestione della miscela reflui suini e FORSU, mentre l'Università si è concentrata sulla miscela fanghi da depurazione delle acque reflue civili e FORSU. Qui di seguito i risultati delle due linee

Messa a punto del processo di co-digestione di fanghi da acque reflue e FORSU

Obiettivo specifico delle attività è stato quello di individuare in modo chiaro le modalità con cui possono essere incrementate le rese di conversione in bioidrogeno e metano a partire da substrati organici complessi e le strategie progettuali e gestionali attraverso le quali si può riuscire a garantire una produzione costante nel tempo, ciò al fine di impiegare, nel trasferimento in piena scala del processo, i gas prodotti per via biologica nelle celle a combustibile.

Lo studio condotto nel primo anno di attività aveva permesso di progettare, realizzare e mettere a punto i sistemi sperimentali per la conduzione del processo di digestione anaerobica non convenzionale, per il campionamento e per la misura, nonché le metodiche sperimentali, ed ha consentito di effettuare una prima valutazione dei principali parametri di esercizio, il cui approfondimento è stato condotto nel corso del secondo anno di attività. Nel primo anno le attività hanno riguardato: 1) la messa a punto di reattori per l'esecuzione della campagna sperimentale; 2) l'analisi dettagliata delle caratteristiche dei substrati utilizzati (frazione organica dei rifiuti organici biodegradabili e reflui suinicoli); 3) l' individuazione di opportuni inoculi per l'apporto dei microrganismi idrogeno-produttori.

La ricerca si è articolata in 5 fasi:

- 1. caratterizzazione avanzata dei substrati selezionati già parzialmente caratterizzati nel corso del primo anno di attività;
- 2. esecuzione delle prove di DA non convenzionale per la produzione di idrogeno al variare dei seguenti parametri di processo: pre-trattamento termico dell'inoculo, pH del sistema, temperatura di processo (in campo mesofilo ovvero termofilo), modalità di rinnovo della miscela (nel caso di prove in semi-continuo);
- 3. esecuzione delle prove di DA per la produzione di metano utilizzando quale substrato l'effluente dallo stadio di produzione di idrogeno, al variare delle condizioni di pH e di temperatura;
- 4. esecuzione di prove di DA convenzionale su miscele con la medesima composizione delle miscele avviate a produzione di idrogeno (ma in assenza di pretrattamento dell'inoculo),;Confronto tra i diversi processi, anche alla luce dei bilanci di energia e di massa.

In Figura 158 si riporta lo schema della postazione sperimentale e una foto di un reattore.

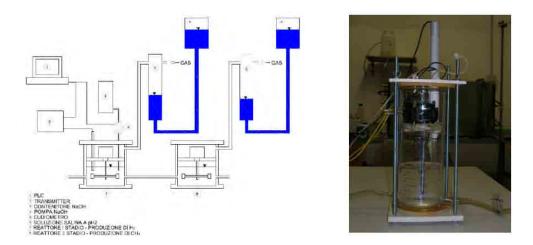


Figura 158. Schema della postazione sperimentale e immagine di un bio-reattore

Le prove di digestione sono state eseguite, prima in batch e poi in semi-continuo, su miscele costituite da 45% di FORSU e 55% di fango aerobico pretrattato

I dati sperimentali prodotti nel corso delle attività hanno consentito di ricavate importanti informazioni circa le rese e la stabilità dei processi. Qui di seguito (Figure 159 e 160) si riportano alcuni esempi di grafici ottenuti e si rimanda al rapporto tecnico redatto dal DICEA per una più completa visone ed interpretazione dei dati. Dalle figure risulta, che la produzione di biogas totale (H₂ + CO₂) è più elevata in condizioni di pH pari a 6,5, sebbene non necessariamente a volumi maggiori di biogas complessivo prodotto siano corrisposte maggiori rese di produzione di idrogeno.

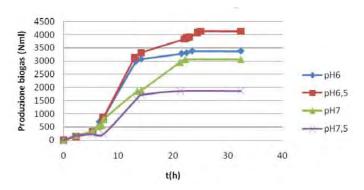


Figura 159. Produzione cumulata di biogas nelle diverse prove a pH controllato

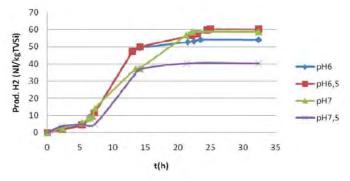


Figura 160. Produzione cumulata di idrogeno nelle diverse prove a pH controllato

Messa a punto del processo di co-digestione anaerobica reflui suini e FORSU

Il punto di partenza è stato l'utilizzo di un substrato reale piuttosto che di uno simulato, in particolare è stato utilizzato il liquame suinicolo proveniente dalla porcilaia Benini e Baldassarre sita in Anguillara Sabazia (Roma). Tale substrato presenta un contenuto in solidi che si aggira intorno al 3%, caratteristica che lo rende idoneo alla

digestione ad umido (Solidi Totali < 10%). Si è proceduto in maniera analoga sia per quanto riguarda la FORSU, che è stata infatti prelevata sempre nella zona intorno ad Anguillara, che per l'inoculo, in tutti gli esperimenti è stato utilizzato, come inoculo, il fango anaerobico proveniente dall'impianto di trattamento delle acque reflue civili di Roma Nord.

Si sono adottate modalità "ad umido", nonostante che il contenuto in solidi della FORSU si aggiri intorno al 30%, in quanto, come risulta da dati di letteratura, sembra presentare migliori rese grazie al più stretto ed omogeneo contatto tra microrganismi e sostanza organica da degradare e perché risulta essere la più diffusa negli impianti reali. Per quanto concerne il monitoraggio del processo anaerobico, vengono riportati di seguito i parametri controllati e la frequenza con cui sono state eseguite le analisi:

Para	metro	mon	itorato	

Temperatura рΗ Produzione biogas Composizione biogas

Solidi Totali e Volatili Domanda Chimica di Ossigeno

Solfati

Azoto totale ed ammoniacale

Fosforo e Potassio Acidi Grassi Volatili Alcalinità Totale

Riconoscimento comunità batteriche

Frequenza analisi

più volte al giorno ogni due giorni/in continuo più volte al giorno

ogni due giorni/all'occorrenza

più volte al giorno

ogni due giorni/all'occorrenza all'inizio ed alla fine/all'occorrenza

all'inizio ed alla fine/all'occorrenza all'inizio ed alla fine/all'occorrenza ogni due giorni/all'occorrenza ogni due giorni/all'occorrenza

ogni due giorni

A partire dai risultati prodotti nel corso del primo anno e al fine di valutare la produzione di idrogeno da liquami suinicoli, sono stati avviati numerosi test volti ad investigare l'efficacia di diversi pretrattamenti dell'inoculo, l'influenza della temperatura, dell'imposizione di un dato valore iniziale di pH, e la necessità del controllo di pH durante l'intera idrogenogenesi.

In primo luogo si è provata, come si riscontra anche in letteratura, una maggior efficacia del pretrattamento termico (tramite il quale si ottiene una selezione di batteri) rispetto alla sedimentazione (tramite cui si induce una concentrazione della biomassa microbica) dell'inoculo.

Si è quindi deciso di far sedimentare per 24 h il fango anaerobico e poi trattarlo termicamente a 100 °C per 30 minuti. Sono state così avviate prove di produzione di idrogeno da refluo suino, imponendo diversi valori di pH iniziale, in alcuni casi, mantenendo costante tale valore per l'intera durata dell'idrogenogenesi. La digestione è stata effettuata in campo mesofilo (39 °C) con pretrattamento dell'inoculo e in campo termofilo (55 °C) senza alcun pretrattamento come riportato nella tabella 17.

Tabella 17. Schema prove produzione di H₂ da liquami suinicoli

	Liquami	Inc	oculo	Diluizione	pHi	Controllo pH	Temperatura
	% (wt)	% (wt)	Tipo	(g acqua/gsubstrato)		sì/no	°C
S1	50	50	PWWS		7,0	Sì	39
S2	50	50	PWWS		6,0	Sì	39
S3	50	50	PWWS		5,5	Sì	39
S4	50	50	PWWS		7,0	No	39
S5	50	50	PWWS		5,5	No	39
Blank		100	PWWS	1	8,0	No	39
S6	50	50	WWS		7,0	No	55
S7	50	50	WWS		5,5	No	55
S1-Fe	*	*	*		7,0	Sì	39
S4-Fe	*	*	*		7,0	No	39
S6-Fe	*	*	*		7,0	No	55

I batch sono stati riempiti con 700 ml di una miscela composta da refluo suino e fango anaerobico in proporzioni 1:1, ad eccezione del bianco.

Analogamente a quanto fatto l'anno precedente è stato replicato il test migliore per la produzione di idrogeno e si sono aggiunti sali di ferro in concentrazione pari a 4,4 mmol/L (regolarmente utilizzata in agricoltura), in condizioni di pH 7 controllato e non e per le due temperature testate, 39 e 55 °C (S1-Fe, S4-Fe, S6-Fe). I primi risultati evidenziano che a 39 °C, imponendo il pHi ad un valore pari a 5,5, si ottiene una maggior produzione di idrogeno, probabilmente per due effetti: (i) la maggior solubilizzazione del substrato, (ii) una selezione più spinta nei confronti dei microrganismi idrogeno produttori (ipotesi da verificare mediante analisi microbiologiche).

Le prove condotte a 55 °C, invece, hanno raggiunto migliori prestazioni quando avviate con pH iniziale pari a 7. Questo rappresenta un risultato importante in quanto, una volta effettuato il bilancio energetico globale, con particolare attenzione a quello termico, si potrebbe scoprire una convenienza economica nel condurre la digestione in campo termofilo piuttosto che mesofilo, senza la necessità di pretrattare l'inoculo.

Sebbene le rese ottenute siano comparabili con quelle riportate in letteratura, spingere la digestione anaerobica di liquami suinicoli verso la produzione di idrogeno non sembra economicamente vantaggioso rispetto all'applicazione tradizionale.

Per quanto concerne l'aggiunta di sali di ferro ($FeCl_2$), in tutte le condizioni testate, si sono registrate forti riduzioni (75-95%) della produzione di H_2S , sia in termini di concentrazione che di volume totale. In particolare, le concentrazioni medie finali si sono mantenute tra i 400 e i 1000 ppm (contro i 3500-12400 ppm delle rispettive prove senza sali di ferro) con picchi nell'intervallo 1000-4500 ppm a fronte dei 3400-21100 ppm.

La FORSU, al contrario dei liquami suinicoli, presenta caratteristiche chimico-analitiche che la rendono un substrato ottimale per la produzione di idrogeno durante la prima fase della digestione anaerobica, accompagnata però da un'elevata produzione di idrogeno solforato. Durante l'idrogenogenesi il substrato subisce un brusco crollo di pH che, se non attentamente monitorato, rischia di inibire il processo; abbiamo quindi provato a codigerire FORSU e liquami suinicoli (Tabella 18) per verificare se la capacità tampone di quest'ultimo riuscisse ad evitare l'inibizione, operando a pH 7 e ad una temperatura di 55 °C.

	Liquami	FORSU	Inocu	lo	Diluizione
	% (wt)	% (wt)	% (wt)	Tipo	(g water/gsubstrate)
SO1	10	40	50	F.An.	0,36
SO2	25	25	50	F.An.	0,36
SO3	40	10	50	F.An.	0,36
SO4	50		50	F.An.	0,36
SO5		50	50	F.An.	0.36

Tabella 18. Schema prove di codigestione di liquami suinicoli e FORSU

Le prove effettuate hanno mostrato che la codigestione con liquami suinicoli ha un effetto positivo ma non sufficiente sia sull'idrogenogenesi che sulla metanogenesi della FORSU: sono raggiunti elevati valori di produzione sia per l'idrogeno (dai 50 agli 80 NmL/g SVs al variare della miscela, con un picco superiore ai 200 NmL/g SVs) che per il metano (800-1400 NmL/g SVs). In conclusione, da questi test preliminari possiamo dire che:

- durante la codigestione della FORSU con liquame suinicolo si raggiunge una stabilità di processo maggiore rispetto a quella ottenuta dalla semplice digestione della FORSU come unico substrato;
- l'utilizzo di un opportuno inoculo è fondamentale per evitare inibizioni del processo;
- se ben monitorato, il processo di codigestione permette di ottenere rese energetiche migliori della digestione di un singolo substrato;
- il liquame suinicolo è un substrato più idoneo alla sola produzione di metano.

Per passare dalle prove a batch a quelle in continuo è stato realizzato un sistema di reattori che permette di effettuare sia il processo anaerobico in singolo stadio per la produzione di metano da liquami suinicoli, sia quello in doppio stadio per la contestuale produzione di idrogeno e metano da liquami suinicoli e FORSU in forma continua. Con tale sistema sono state condotte prove di laboratorio volte ad ottimizzare la produzione specifica di metano, variando i principali parametri operativi del processo di digestione anaerobica quali la temperatura, il tempo di residenza ed il carico organico giornaliero. Come ultima prova, sono stati aggiunti all'alimentazione sali di ferro per indurre la precipitazione di solfato ferrico, in modo da ridurre la concentrazione di idrogeno solforato nel biogas prodotto.

Le prove sono state condotte in parallelo su sei reattori, per poter realizzare differenti condizioni operative.

Il liquame suino è stato prelevato dal pozzetto di raccolta della porcilaia in due differenti momenti della giornata: prima e dopo il lavaggio delle stalle, per analizzare la fattibilità/convenienza ad utilizzare l'una o l'altra tipologia di substrato. L'inoculo è stato utilizzato sia tal quale sia ispessito, per valutare se la maggior produzione (a parità di tempi di ritenzione) che ci si aspetterebbe nel secondo caso ne giustifichi il pretrattamento (sedimentazione per semplice gravità). Le caratteristiche dei 2 substrati e degli inoculi utilizzati sono riportati in Tabella 19. Anche in

questa campagna sperimentale sono stati monitorati i soliti parametri di stabilità del processo: temperatura, pH, acidità/alcalinità, produzione specifica di metano.

Tabella 19. Caratterizzazione dei substrati e degli inoculi usati per le prove in continuo

SUBSTRATO	ST (%tq)	SV (%ST)	SV (%tq)
Deiezioni suine + acque di lavaggio	2,1	78,3	1,6
Deiezioni suine	6,7	78,6	5,2
Inoculo			
Fango Anaerobico	1,9	59,0	1,1
F. An. Ispessito	4,3	59,7	2,6

I risultati ottenuti, di seguito riportati solo in termini di produzione specifica, suggeriscono che:

- contrariamente a quanto avvenuto nel processo batch, la termofilia (55°C) non sembra migliorare tanto la produzione di metano, per i tempi di ritenzione adottati;
- le rese ottenute a 40°C non differiscono molto da quelle ottenute a 55°C, probabilmente perché c'è un limite di temperatura oltre il quale l'aumento della velocità delle cinetiche viene contrastato da un'eccessiva specializzazione (o un impoverimento) della comunità batterica;
- l'ispessimento dell'inoculo non sembra essere determinante per la produzione di metano da liquami suinicoli:
- in tutte le prove, le concentrazioni medie di metano ottenute sono elevate (65-72%);
- la produzione di H₂S è direttamente proporzionale al contenuto in solidi del substrato ed inversamente proporzionale ai tempi di ritenzione utilizzati; essa diminuisce all'aumentare della temperatura operativa e con l'ispessimento del fango;
- l'utilizzo di Sali di Fe ha permesso di mantenere la concentrazione di H₂S al di sotto dei 50 ppm.

In questo caso abbiamo voluto variare il carico organico giornaliero (Organic Loading Rate) come riportato di seguito:

	HRT [d]	S [kg SV/m³]	OLR[kg SV/m³d]
Primo set di prove	20	16,09	0,80
Secondo set di prove	14	16,09	1,15
Terzo set di prove	20	52,57	2,63
Quarto set di prove	35	52,57	1,50

I dati ottenuti sono stati utilizzati, in collaborazione con il gruppo che si occupa del clean up, per fare un dimensionamento di massima dell'impianto da installare presso la porcilaia da cui sono stati presi i reflui (7500 capi), adottando le seguenti ipotesi:

- fattore di utilizzo impianto: 90% (circa 8000 ore);
- rendimento del reforming: 85%;
- rendimento del clean-up: 98%;
- rendimento cella a combustibile: 90% (η_{el} = 45%, η_{th} = 45%).

Il dimensionamento ottenuto in base ai risultati migliori e la produzione di energia elettrica al netto dei consumi del digestore nei diversi casi è riportato in Tabella 20.

Tabella 20. Produzione energia elettrica al netto dei consumi nei diversi casi in studio

	Primo set di prova	Secondo set di prova	Terzo set di prova	Quarto set di prova
Substrato alimentato al digestore	Substrato diluito con acque di lavaggio		Substrato privo delle Acque di lavaggio	
V _{digestore} [m ³]	2500	1750	900	1575
Processo migliore	Mesofilia 40°C, F.A. ispessito	Termofilia 55°C, F.A. tal quale	Termofilia 55°C, F.A. tal quale/mesofilia 40°C, F.A. ispessito	Mesofilia 40°C, F.A. ispessito
E _{el} [kWh/anno]	808.263	638.906	753.880	1.118.260
P _{el} MCFC [kW]	102,5	81	95,6	141,9
P _{th} ^{MCFC} [kW]	91,1	72,0	85,0	126,1

Tenuto conto che, da un primo bilancio energetico, solo nel caso di utilizzo di reflui suini non diluiti ed adottando una temperatura operativa massima di 40°C si riesce ad ottenere un bilancio termico positivo, possiamo dire che le condizioni operative ottimali sono quelle del quarto caso (OLR: 1,5 kg SV/m³ g; HRT: 35 g; T: 40 °C; V digestore: 1575 m³).

Analogamente, ma con un percorso inverso, partendo dall'obiettivo di voler installare una postazione sperimentale con una cella a combustibile a carbonati fusi da 1 kW, ipotizzando di ottenere nell'impianto pilota le stesse rese ottenute nel reattore da 1 L (0,58 Nm³/kg SV), avremmo bisogno di alimentare il sistema clean-up/reforming/cella a combustibile con 0,4 Nm³ di biogas/ora con il 66,3% di CH₄ e, quindi, avremmo necessità di movimentare giornalmente 0,3 t/g di deiezioni suine tal quali (V_{digestore} = 11 m³ circa).

o Sviluppo modello "Analisi di Impianti di Digestione Anaerobica" – AIDA

In quest'ambito sono proseguite le attività relative allo sviluppo di uno strumento di pianificazione energetica basata sull'uso delle biomasse allo scopo di rispondere al crescente interesse nel settore del recupero energetico delle biomasse. Lo strumento che si sta realizzando sarà in grado di fornire informazioni riguardanti i potenziali produttivi del settore biomasse, relativi ad un determinato ambito territoriale e sulla base di questi effettuare un'analisi energetica di filiere basate sulla digestione anaerobica in modo da evidenziare le possibilità di recupero energetico dalle biomasse-rifiuti di origine antropica, colturale, industriale ed agroalimentare.

In questo contesto l'ENEA, in collaborazione con l'Università degli Studi di Napoli Federico II, ha realizzato un servizio di supporto all'assistenza tecnica per gli operatori del sistema produttivo agricoltura e agroindustria che permette di analizzare diversi scenari aziendali e, per mezzo dell'analisi economica classica, di arrivare ad un giudizio di fattibilità sulla realizzazione di filiere energetiche di trasformazione dei rifiuti (generalmente un costo) in energia (una opportunità di guadagno/risparmio). Uno strumento siffatto risulta di interesse per gli addetti ai lavori, per gli amministratori pubblici e per i decision maker per lo sviluppo di sistemi integrati che utilizzano biomasse colturali e/o da rifiuti per produrre energia elettrica e calore.

In particolare è stato sviluppato un modello di calcolo per lo studio di scenari energetici basati sull'impiego di sistemi di produzione di biocombustibili (biogas, syngas) da biomasse/rifiuti accoppiati con sistemi di produzione di elettricità e calore, sia convenzionali (motori a combustione interna e turbine a gas) che altamente innovativi come le celle a combustibile (sistemi ad alta efficienza e a basso impatto ambientale). Le attività di questo secondo anno hanno riguardato l'aggiornamento e il miglioramento del modello preliminare di calcolo elaborato nel corso della prima annualità. Tale miglioramento è consistito nella realizzazione di una serie di sottoprogrammi per la modellizzazione delle singole unità di un sistema integrato "Waste to Energy", dalla produzione di biomassa all'effettivo utilizzo del biogas prodotto in sistemi cogenerativi, andando a valutare sia aspetti puramente tecnici ed energetici che economici.

Il modello preliminare, realizzato a valle della prima annualità di ricerca, è stato implementato mediante l'ausilio di un software proprietario FileMaker, il quale presenta dei limiti che hanno reso indispensabile una reingegnerizzazione dello stesso mediante il supporto di una tecnologia più specifica e appropriata che fa uso di un server-web.

L'obiettivo principale perseguito è stato quindi il consolidamento della struttura base originaria con lo scopo di creare uno strumento dinamico e modulare che potesse essere in grado di rendere direttamente accessibili e fruibili le informazioni raccolte nel database "Atlante delle Biomasse" (risultato della prima annualità) e in secondo momento sfruttarle come valido strumento a supporto decisionale per uno studio di fattibilità di impianti a biomasse che sia completo anche della sezione economica. E' stato concepito un database relazionale con lo scopo di memorizzare una consistente mole di dati e fornire un accesso rapido, efficace e simultaneo ad una pluralità di utenti. Questo strumento consente non solo una consultazione della base di dati tramite interrogazioni mediante query, ma consente anche di manipolare in maniera interattiva gli stessi tramite una Grafic User Interface (GUI) e di analizzarne i valori. Esso è installato su di un server web di tipo Microsoft IIS, un servizio che si occupa di fornire tramite software dedicato e su richiesta dell'utente, servizi di reporting, pagine web (successivamente visualizzabili dal browser sul PC dell'utente) e altri servizi HTTP-based. Le interfacce elaborate non sono statiche ma continuamente modificabili a seconda delle necessità dell'utente ed è proprio grazie alla loro dinamicità e adattabilità che è possibile guidare l'utente in un percorso di scelte finalizzato a sviluppare un possibile scenario di utilizzo della biomassa considerata. Un database lato server dà inoltre la possibilità di aggiornare le informazioni mediante l'immissione di nuovi dati nello stesso, offrendo quindi la possibilità di gestirlo in modo personalizzato. Maggiori dettagli sul software e l'approccio utilizzati sono riportati nel rapporto redatto del Dipartimento DETEC dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

C.2 <u>Studio dei processi di clean up al fine di portare il contenuto di inquinanti nel biogas in uscita dal DA sotto il</u> limite di tollerabilità delle celle a carbonati fusi

L'attività ha riguardato lo studio del sistema di clean-up e l'individuazione, attraverso prove in laboratorio, di quello più adatto per la purificazione del biogas, le prove di catalizzatori commerciali e la sintesi di nuovi catalizzatori. A valle della parte sperimentale si è poi proceduto alla progettazione di un sistema clean-up in scala laboratorio da accoppiare con un digestore di taglia adeguata ad alimentare uno stack MCFC da 0,5-1,0 kW.

La prima fase del progetto ha previsto un'analisi bibliografica rivolta allo studio dei principali processi di purificazione del biogas (da digestione anaerobica di reflui zootecnici) per l'alimentazione di una cella a combustibile a carbonati fusi, con lo scopo di individuare e selezionare i più idonei all'abbattimento di composti solforati presenti. La seconda fase si è occupata di studiare sperimentalmente materiali e processi per l'abbattimento dell'H₂S, con l'obiettivo di giungere ad una progettazione di massima di un desolforatore in scala da laboratorio.

Le attività sperimentali sono state condotte in parallelo da ENEA e dalle Università di Napoli "Federico II e di Fisciano, nello specifico:

- ENEA si è occupata dello studio sperimentale del processo di adsorbimento dell'H₂S su carboni attivi, in assenza di ossigeno;
- Il Dipartimento di Ingegneria Chimica ed Alimentare dell'Università di Fisciano (Salerno) ha approfondito lo studio sperimentale del processo di ossidazione dell'H₂S;
- il Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università di Napoli ha studiato il processo di adsorbimento di H₂S su diverse tipologie di materiali quali carboni attivi e zeoliti, tal quali o modificati con l'aggiunta di elementi metallici, con lo scopo di selezionare i materiali con la più elevata capacità adsorbente ed una buona stabilità a ripetuti cicli di adsorbimento-rigenerazione.

Il progetto si è avvalso inoltre della collaborazione del Politecnico di Milano, Istituto Giulio Natta, che si è occupato dell'individuazione dei catalizzatori da impiegare nei sistemi con celle a combustibile a carbonati fusi alimentati da biogas.

I dati ottenuti sperimentalmente dai vari gruppi, insieme a considerazioni tecnico-economiche (semplicità di realizzazione e gestione dell'impianto, presenza o meno di recuperi termici, ecc) hanno portato a proporre, con relativa progettazione di massima, due configurazioni possibili per il sistema di purificazione in studio.

Screening su carboni attivi commerciali nel processo di adsorbimento di H₂S

L'attività è stata condotta principalmente da ENEA con lo scopo di studiare i fenomeni del meccanismo del processo di adsorbimento dell'H₂S e di valutare l'idoneità di alcuni carboni commerciali, riportati in Tabella 21

abena 22. Garboni attivi to	inition diali			
	SV 40	SI30K	RGM-3	Carbone Acido
Ditta produttrice	SICAV	SICAV	Norit	MERCK
Tipologia	Carbone Attivo Vergine	Carbone Attivo Impregnato (KOH 10%)	Carbone Attivo con sali (Cu+2, Cr+6)	Carbone Attivo Acido
Composizione da specifica fornitore	n.d.	KOH 10%	Cu	n.d.
Composizione qualitativa (XRF)	S, Fe, Al	K, Fe, Al	Cu, Cr, Ca, Mo, Fe	Fe

Tabella 21. Carboni attivi commerciali

Lo screening iniziale ha mostrato come tutti i carboni testati hanno un'efficienza di abbattimento dell' H_2S del 100%, consentendo di ottenere correnti di gas in uscita dal letto adsorbente con contenuti di H_2S pari a 0 ppm, fino al momento in cui si raggiunge il punto di breathrough. Mentre, in termini di capacità adsorbente (definita come g H_2S/g carbone), il carbone RGM3 è risultato il migliore, con un valore massimo pari a circa 4,5%.

Il carbone con le migliori prestazioni di adsorbimento è stato successivamente testato in diverse condizioni operative e sottoposto a rigenerazione ottenendo informazioni necessarie alla successiva progettazione del sistema di purificazione.

Sintesi di nuovi materiali

In parallelo allo studio dei carboni commerciali, ENEA si è dedicata alla sintesi di nuovi materiali, con l'obiettivo di ottenerne uno che potesse garantire la rimozione di H₂S a partire da bassissime concentrazioni (1-5 ppm), che avesse funzione di trappola in caso di concentrazioni anomale transitorie e che nel contempo fosse rigenerabile al 100%. In prima battuta, sulla base di ricerche fatte in letteratura e di esperienze pregresse, si è scelto di utilizzare oro metallico finemente disperso su differenti supporti.

Partendo da queste considerazioni sono stati prodotti due materiali contenenti oro nanometrico: i test di adsorbimento condotti non hanno dato i risultati sperati, mostrando in particolare una bassa capacità di adsorbimento, inferiore a quella ottenuta con i carboni commerciali, e difficoltà di rigenerazione (l'unico metodo efficace si è dimostrato quello per via elettrochimica).

A valle dunque di tali risultati sono stati studiati nuovi materiali, in particolare si sta investigando rame, con differente granulometria, ricoperto di argento mediante electroless deposition. I primi test sperimentali (velocità spaziali 20000 h⁻¹) hanno dato buoni risultati. Anche la rigenerazione del materiale, in soluzione di NaBH₄ (20 wt%), condotta a temperatura ambiente, è avvenuta con successo. A conclusione di questa fase si è deciso di utilizzare tale materiale nel secondo stadio del processo di purificazione proposto.

o Screening di materiali commerciali vs il processo di ossidazione di H₂S

Lo stesso approccio seguito per il processo di adsorbimento è stato adottato per lo studio della reazione di ossidazione selettiva dell'H₂S, condotto principalmente dall'Università di Salerno, utilizzando come catalizzatori i materiali riportati di seguito.

Carboni attivi:

1. NORIT RGM3 carbone attivato con vapore ed impregnato con sali di Cu(II) e Cr(IV)

2. SICAV SV40 carbone vergine attivato con vapore

3. SICAV SI30K carbone impregnato con KOH (10% in peso)

4. MERCK carbone acido.

Ossidi metallici:

1. CeO₂ (Aldrich)

2. TiO₂ (Millenium)

3. Al₂O₃ (Basf, fornito da ENEA)

CuO-MnO₂ (Sud-Chemie, fornito da ENEA).

Sono stati provati anche i seguenti ossidi misti a base di ferro: $CuFe_2O_4$ (Aldrich), $CuFe_2O_4Zn$ (Aldrich), $BaFe_{12}O_{19}$ (Aldrich), $SrFe_{12}O_{19}$ (Aldrich), Fe_2NiO_3Zn (Aldrich). In aggiunta è stato utilizzato un ossido misto a base di ferro e di cromo $Cr_{1.3}Fe_{0.7}O_3$ preparato in laboratorio per coprecipitazione.

Inoltre catalizzatori a base di vanadio sono stati sintetizzati $ad\ hoc$ a partire da supporti commerciali quali, CeO₂ (Aldrich), CuFe₂O₄ (Aldrich), TiO₂ (Millenium), Al₂O₃ (Basf). Per tutti i campioni si è deciso di utilizzare un carico di vanadio pari al 2.55% in peso espresso come V₂O₅.

La reazione di ossidazione catalitica è riportata di seguito:

$$H_2S + \frac{1}{2}O_2 = S + H_2O$$

Temperatura e catalizzatore utilizzato influenzano il meccanismo e la selettività del processo.

Nello specifico le prove sperimentali sono state condotte variando la temperatura di reazione tra 50 e 250 °C ed il rapporto molare O_2/H_2S tra 0,4 e 0,5, con velocità spaziale tra 15000 e 45000 h⁻¹.

In generale è necessario sottolineare che l'ossidazione selettiva presenta una conversione tra il 90 ed il 100% che aumenta all'aumentare della temperatura. Parimenti all'aumentare della temperatura si osserva un aumento della selettività ad SO_2 . A T = 50 °C non si osserva formazione di SO_2 . Anche il rapporto O_2/H_2S influenza la selettività dell' SO_2 , che diminuisce al diminuire di detto rapporto.

Tra i numerosi materiali testati i migliori risultati sono stati ottenuti con il catalizzatore a base di V_2O_5 supportato su CeO_{2} , il quale è stato quindi selezionato per la progettazione del sistema di purificazione.

o Caratterizzazione delle proprietà adsorbenti

L'Università di Napoli si è occupata principalmente di studiare la messa a punto di tecniche e metodologie sperimentali da adoperare per la caratterizzazione di proprietà adsorbenti di materiali di impiego nei processi di desolforazione sopra descritti.

Durante la prima fase dell'attività alcune classi di materiali sono state selezionate come le più efficienti nello studio dei processi di adsorbimento ed ossidazione selettiva dell'H₂S (ossidi metallici, i carboni attivi, le zeoliti e l'allumina attivata). Tali materiali nella seconda fase del progetto sono stati caratterizzati sperimentalmente come proprietà tessiturali, chimiche di superficie e di bulk e di adsorbimento.

Dalle misure di area superficiale effettuate sui campioni in esame è emerso che i materiali dotati di maggiore area superficiale risultano essere le zeoliti e i carboni attivi. Tali materiali sono stati ritenuti pertanto idonei ad una indagine più approfondita, effettuata mediante misure di adsorbimento di acqua e idrogeno.

Inoltre a valle dei primi risultati sperimentali ed in linea con quanto emerso dallo studio bibliografico condotto nella prima fase del progetto, nuovi materiali zeolitici sono stati acquisiti e modificati (mediante scambio ionico ed impregnazione sottovuoto) per l'inserimento di gruppi Cu o ZnO, che molto bene si prestano all'adsorbimento chimico dell'H₂S. In Tabella 22 si riportano alcune delle zeoliti modificate.

Zeolite	Sale	Quantità soluzione salina	pH a Tamb prima dello scambio	pH a Tamb dopo lo scambio	
4A	Cu(NO ₃) ₂ * 2.5 H ₂ O	300cc/0.1M	4.21	4.83	
4A	Zn(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	300cc/0.1M	5.50	5.87	
13X	Cu(NO ₃) ₂ * 2.5 H ₂ O	300cc/0.1M	4.21	4.97	
13X	Zn(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O	300cc/0.1M	5.50	5.96	

Tabella 22. Zeoliti modificate

Da prove di adsorbimento di H_2O effettuate su due zeoliti (MSC354 e 13X/ZnO) è emersa la maggiore capacità adsorbente di tali materiali rispetto al carbone attivo Norit RGM3.

Progettazione del sistema di purificazione

A valle delle analisi condotte sui risultati sperimentali sono state tratte le seguenti conclusioni:

- i carboni attivi utilizzati come adsorbenti in un processo di rimozione di H₂S in assenza di ossigeno, hanno mostrato un'efficienza di rimozione dell'H₂S del 100% fino al raggiungimento del proprio punto di breakthrough;
- la capacità di adsorbimento dei vari carboni si attesta a valori intorno a pochi punti percentuali, alle diverse condizioni operative. La massima capacità adsorbente è mostrata dal carbone NORIT RGM3 (carbone attivo impregnato con sali Cu+2, Cr+6), nella rimozione di 50 ppm di H₂S da una corrente di azoto, ad una velocità spaziale pari a 1500 h⁻¹ (velocità spaziale GHSV definita come rapporto tra portata di gas da trattare e volume di materiale adsorbente);
- la velocità spaziale influenza notevolmente il processo di adsorbimento e quindi la capacità adsorbente del materiale, che comincia ad avere valori apprezzabili solo per GHSV ~ 1500 h⁻¹;
- gli ossidi metallici hanno mostrato che l'efficienza di rimozione dell'H₂S, mediante ossidazione selettiva (90÷100%) migliora all'aumentare della temperatura. Parimenti all'aumentare della temperatura si osserva un aumento della selettività ad SO₂. A T = 50°C non si osserva formazione di SO₂. Anche il rapporto O₂/H₂S influenza la selettività dell'SO₂, che diminuisce al diminuire di detto rapporto;
- il processo di adsorbimento su carboni attivi è condotto a temperatura ambiente in assenza di ossigeno. L'ossidazione selettiva dell'H₂S con ossidi metallici avviene ad alta temperatura (50÷250°C), in presenza di ossigeno.

Sulla base di quanto sopra, mantenendo l'approccio di un processo di purificazione a due stadi, si sono ipotizzate due diverse configurazioni:

Configurazione A

- primo stadio con carboni attivi commerciali, non rigenerabili;
- secondo stadio con metallo nobile supportato su carbone o materiale mesoporoso, rigenerabile.

In Figura 161 è riportato lo schema a blocchi del sistema di purificazione come configurazione A.

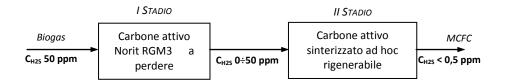


Figura 161. Configurazione A per sistema di abbattimento H₂S

Come dimostrato sperimentalmente i carboni attivi hanno un'efficienza di rimozione del 100% fino al punto di breakthrough, che viene però raggiunto abbastanza rapidamente in conseguenza della bassa capacità adsorbente del materiale stesso il che comporta un volume elevato di carbone necessario a rimuovere una definita quantità di H₂S in una corrente di gas entrante. Per cercare di ridurre il volume del carbone si può pensare di "allungarne" il suo tempo di lavoro; in particolare si è notato sperimentalmente che le curve di breakthrough, hanno una "salita" piuttosto lenta tale che il tempo necessario per passare da circa 1 ppm a 5 ppm di H₂S in uscita dal carbone è piuttosto elevato. Ipotizzando allora di non sostituire il carbone fino a quando in uscita non sono raggiunti i 5 ppm, il tempo di lavoro e quindi la capacità adsorbente del carbone aumenta. E quindi il volume di carbone necessario per rimuovere la stessa quantità di H₂S nella corrente entrante si riduce.

A questo punto però è necessario prevedere un secondo stadio che protegga la cella a combustibile rimuovendo i pochi ppm di H₂S che escono dal primo stadio, per questo verrà identificato anche come "trappola".

Il secondo stadio si ipotizza possa essere un nuovo materiale sintetizzato $ad\ hoc$ da ENEA, caratterizzato dalla presenza di un metallo nobile, in grado di adsorbire con elevata selettività anche piccolissime concentrazioni di H_2S , con un'elevata capacità di adsorbimento ed una totale rigenerabilità.

Riguardo la rigenerazione del primo stadio i dati sperimentali confermano quanto riportato in letteratura, ossia che essa per i carboni attivi è solo parziale e che peggiora ad ogni ciclo. Per tale ragione nella progettazione saranno considerati "usa e getta".

Configurazione B

- primo stadio con ossidi metallici, rigenerabili;
- secondo stadio con carbone attivo commerciale, non rigenerabile.

In Figura 162 è riportato lo schema a blocchi del sistema di purificazione come configurazione B.

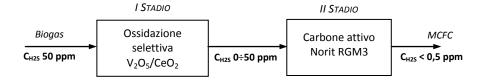


Figura 162. Configurazione B per sistema di abbattimento H₂S

I numerosi materiali provati come catalizzatori per il processo di ossidazione selettiva hanno mostrato tutti un comportamento analogo, con un'efficienza di rimozione dell' H_2S , variabile tra 90 \pm 100%, che migliora all'aumentare della temperatura. Lavorando però ad elevate temperature, aumenta la selettività ad SO_2 , quindi il contenuto di SO_2 nella corrente "purificata" dall' H_2S .

Il materiale selezionato è un catalizzatore a base di V_2O_5 supportato su CeO_2 , il quale è stato provato a diverse temperature, a diverse concentrazioni di H_2S , a diverse velocità spaziali, con diversi rapporti O_2/H_2S .

Nella configurazione proposta dunque sarà realizzato un primo stadio con ossidazione selettiva. Le condizioni operative saranno tali da minimizzare/eliminare la formazione di SO_2 . In tali condizioni l'efficienza di rimozione dell' H_2S non è del 100%. Per rimuovere allora i pochi ppm rimasti è necessario prevedere un secondo stadio che ne garantisca l'abbattimento totale. Si utilizza per questo scopo uno stadio a carboni attivi.

Le prove sperimentali condotte sul processo di ossidazione selettiva hanno dimostrato che l'efficienza di rimozione si mantiene costante al variare della velocità spaziale da 15000 a 45000 h⁻¹. Questo fa si che lavorando con GHSV pari a 45000 h⁻¹ si ottenga una notevole riduzione del volume del reattore (più di un ordine di grandezza rispetto al volume necessario per le condizioni operative del processo di adsorbimento con carboni attivi). Il volume del secondo stadio, pur essendo a carboni attivi, si manterrà comunque ridotto in virtù del fatto che la quantità di H₂S da rimuovere è davvero ridotta (< 5 ppm, contro i 50 ppm nel biogas di partenza).

Riguardo la rigenerabilità dei materiali, come già anticipato, i carboni attivi saranno considerati usa e getta. Gli ossidi metallici, data la struttura mesoporosa, hanno una minore tendenza a "saturarsi" per effetto dello zolfo elementare formatosi nella reazione. In ogni caso, la dimensione dei pori maggiore rispetto a quella dei carboni fa si che lo zolfo elementare sia meno saldamente legato e quindi, se necessario, l'ossido possa essere rigenerato.

E' necessario comunque precisare che prove di lunga durata sui catalizzatori ad ossidi metallici proposti dovranno essere condotte per verificare eventuali

tempi di avvelenamento.

In Figura 163 si riporta lo schema per il sistema di purificazione proposto per la configurazione A, sulla base dei dimensionamenti effettuati. A monte del primo desolforatore è inserito un deumidificatore per abbattere l'elevato contenuto di acqua nel biogas uscente dal digestore. Il primo stadio sarà costituito da un'unica colonna, che potrà essere sostituita durante la fermata della cella a combustibile per manutenzione ordinaria, dopo 3000 h.

E' previsto un rilevatore per la presenza di H₂S all'uscita del secondo stadio, per monitorare che il contenuto di H₂S si mantenga al di sotto del limite massimo tollerato dalla cella a combustibile.

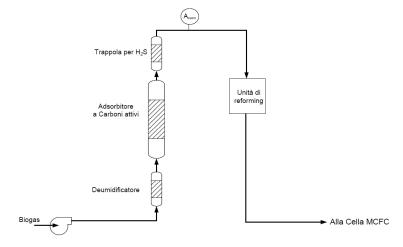


Figura 163. Schema proposto per il sistema di abbattimento H₂S, secondo la configurazione A

Nel caso della configurazione B (Figura 164) a monte del reattore è prevista un'immissione di aria/ossigeno richiesta dalla reazione di ossidazione selettiva. La miscela biogas/ossigeno è poi portata alla temperatura richiesta (max 250 °C) attraverso uno scambiatore in cui il calore può essere fornito dalla cella a carbonati fusi.

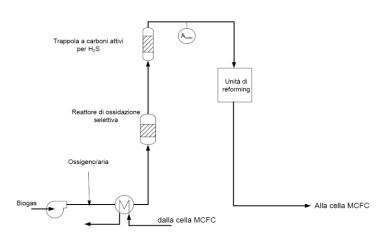


Figura 164. Schema proposto per il sistema di abbattimento H_2S , secondo la configurazione B

Il secondo stadio è una colonna a carboni attivi che lavora a T ambiente o leggermente superiore. Per raffreddare il gas in uscita dal I stadio può non essere necessario uno scambiatore, data la piccola portata. Può essere sufficiente aumentare la lunghezza della tubazione di collegamento tra i due stadi.

 $\rm E'$ previsto un rilevatore per la presenza di $\rm H_2S$ all'uscita del secondo stadio, per monitorare che il contenuto di $\rm H_2S$ si mantenga al di sotto del limite massimo tollerato dalla cella a combustibile.

Per concludere l'attività condotta durante tale anno, ha permesso di selezionare e studiare sperimentalmente due processi per la rimozione dell'H₂S da correnti di biogas, e

caratterizzare diversi materiali, commerciali e sintetizzati ad hoc, utilizzati come adsorbenti e/o catalizzatori.

In particolare le prove sperimentali hanno permesso di selezionare alcuni materiali ritenuti migliori in termini di capacità di rimozione dell'H₂S e con questi materiali sono state proposte delle configurazioni possibili per un sistema completo di purificazione e ne è stata fatta una progettazione di massima. Ovviamente prima di procedere

ad un'eventuale realizzazione del sistema sarà necessario effettuare anche delle valutazioni di tipo economico e tecnologico, in considerazione del fatto che i materiali proposti hanno costi diversi, se ne utilizza una quantità diversa, alcuni sono rigenerabili altri no, in un caso è richiesta l'aggiunta di una corrente d'aria/ossigeno, in un caso si lavora a T ambiente in un altro a T elevate.

C.3 <u>Prove in monocelle a carbonati fusi con qas simulati a diverso tenore di inquinanti al fine di verificare i limiti di tollerabilità, testare nuovi componenti, elaborare procedure di rigenerazione e modellizzare il fenomeno dell'avvelenamento</u>

La scelta delle celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC) come parte finale della catena biodigestore, clean-up, reformer, è essenzialmente dovuta alla possibilità di usare il biogas per l'alimentazione della cella nonostante l'elevato contenuto di anidride carbonica e la presenza di monossido di carbonio che viene, in questo caso, usato come combustibile. Inoltre, l'alta temperatura di funzionamento delle MCFC consente di recuperare il calore cogenerato e la sua elevata efficienza compensa il basso contenuto energetico della biomassa. La composizione media del gas derivante da deiezioni animali, dopo il processo di reforming per la conversione di metano in idrogeno e di ossido di carbonio in anidride carbonica è quella indicata in Tabella 23.

Idrogeno	30 – 40 % vol.
Anidride carbonica	20 – 30 % vol.
Acqua	20 - 30 % vol.
Metano	0.1 - 0.3 % vol.
Ossido di carbonio	5 – 10 % vol.
Zolfo e composti solforati	< 2 ppm
Ammoniaca	Tracce

Tabella 23. Composizione media del gas derivante da deiezioni animali, dopo il processo di reforming

la sperimentazione è stata suddivisa in due fasi:

- nella prima sono state eseguite prove in cella con elettrodi da 100 cm² e componenti tradizionali studiando la risposta della cella alla variazione dei gas anodici;
- nella seconda sono stati preparati e provati in cella anodi rivestiti con composti in grado di fissare lo zolfo.

Le composizioni provate sono derivate dalla simulazione di gas provenienti dalla catena biodigestore-clean upreformer, e sono state calcolate tenendo conto della variabilità della composizione del gas in ingresso all'anodo dovuta alle differenti fonti biologiche che possono alimentare il biodigestore.

Il flusso del gas catodico è stato quindi mantenuto costante mentre i gas anodici sono stati studiati in un opportuno intervallo di concentrazioni. Obiettivo della sperimentazione era quello di verificare l'influenza della contaminazione del combustibile, da parte di H₂S, sulle prestazioni di una cella. I test vertevano nella qualifica in monocella delle prestazioni elettriche in diverse condizioni operative e sulla successiva contaminazione del combustibile con diverse percentuali di H₂S (indicativamente da qualche ppm a decine di ppm). L'inserimento dell'H₂S nell'atmosfera anodica è stata effettuata mediante inserimento nella stessa di un limitato flusso di un'opportuna miscela azoto/H₂S, tale da garantire il voluto livello di contaminazione del combustibile. Per alcune prove sono state effettuate caratterizzazioni post test per stabilire gli effetti dello zolfo sui diversi componenti della cella (in particolare anodo ed elettrolita).

L'attività è stata svolta da ENEA in collaborazione con l'Università di Perugia. Quest'ultima ha svolto essenzialmente test di avvelenamento in una postazione modificata ad hoc in grado tra l'altro di caratterizzare i gas in ingresso ed in uscita, tramite un gascromatografo, in maniera da monitorare le composizioni dei gas soprattutto per quanto concerne i contaminanti. La sperimentazione condotta presso Perugia ha avuto una durata di circa 1000 ore. Le specifiche di prova sono state concordate con ENEA in maniera tale da garantire la complementarità dei test, e, quindi, la possibilità di utilizzare i dati sperimentali da loro prodotti per le valutazioni effettuate in ENEA. La cella utilizzata per il test (Figura 165) è basata su una nuova configurazione che prevede una cassa catodica modificata e l'utilizzo di un'atmosfera di copertura inerte. Tale



Figura 165. Monocella MCFC

configurazione rende trascurabili i trafilamenti permettendo quindi di testare gas anodici ad elevato utilizzo $(UH_2+CO>60\%)$ e garantisce l'OCV prossimo al teorico.

Di seguito si riportano le concentrazioni dei gas anodici e catodici di riferimento per i test.

	ANODO							CATODO	
Gas (NL/h)	N ₂	CO ₂	H ₂	со	H₂0	H₂S (ppm)	Aria	N ₂	CO ₂
Ref(+H ₂ 0)	10	1	10	-	7,05	-	35	-	16
Ref B (+H ₂ 0)	13	1	7	-	7,05	0-6	35	-	16
Biogas	-	1,188	3,432	0,484	5,896	-	77.04	26.472	9,437
CC1	-	0,55	3,13	0,3	3,81	0-8-16	73	55,8	4.9

o Test d'inquinamento con H₂S in 6 ppm

Prima di procedere all'inquinamento con 6 ppm di H_2S , sono state eseguite tre curve V-J (composizioni 'Ref B', 'Biogas' e 'CC1'). Dopo le 72 ore d'inquinamento si è mantenuta la cella in rigenerazione per una settimana, quindi sono state tegistrate ancora tre curve V-J, con gli stessi combustibili, per verificare lo stato della cella. Si è decisa un'ulteriore settimana di rigenerazione che però non ha portato miglioramenti di prestazioni. Nella figura 166 lo storico di questa seconda fase dei test Immediatamente prima della somministrazione dell'inquinante, è stato rilevato con un fit lineare la tensione media di cella ('Ref B', I = 5,5 A) lungo un arco di dieci ore: V = 0.862 V.

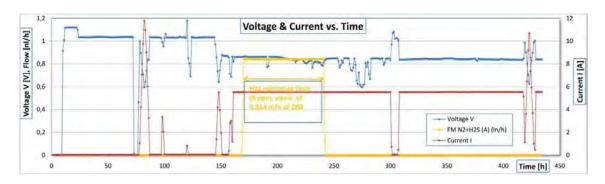


Figura 166. Storico della campagna di test d'inquinamento con 6 ppm di H₂S in 'Ref B'

Gli effetti dell'inquinante sono già ben visibili nell'intervallo delle 72 ore, con una progressiva caduta di tensione, quantificata dal fit in 0,3 mV orari. Inoltre, il valor medio del voltaggio di cella, al termine del periodo d'inquinamento, è stimato da un secondo fit in V = 0,841 V.

Un terzo fit veloce, eseguito su circa 140 ore di rigenerazione (sempre a corrente costante), mostra già preliminarmente come la rigenerazione non abbia avuto effetti misurabili e come le prestazioni continuino il loro andamento, confermando le impressioni sul comportamento del valore del voltaggio: seppur prossimo a zero, il coefficiente angolare dell'interpolazione lineare è negativo. Infine, al termine della prima settimana di rigenerazione il valore stimato (su tutta settimana) dal fit della tensione è pari a V = 0,839 V. La tabella successiva mette a confronto, su alcuni parametri fondamentali, le prestazioni della cella X304 prima e dopo le 72 ore d'inquinamento, con H₂S a 6 ppm, più la settimana di rigenerazione.

L'andamento generale di questi parametri denota un deterioramento complessivo della cella e una rigenerazione non completa. In realtà l'indicazione più forte è quella di un mancato miglioramento delle prestazioni dalla sospensione dell'inquinante, come già indicato dal fit lineare applicato durante il regime di corrente costante.

Tabella 25. Confronto delle prestazioni pre e post inquinamento

Prestazioni			Pre H₂S		Post H ₂ S					
	Caratteristiche	Valore	@ V [V]	@ J [mA/cm²]	Data	Valore	@ V [V]	@ J [mA/cm ²]	data	Δ (%)
	OCV [V]	1,031				1,024				0,72
	Max P [W]	7,18	0,652	200,00		6,69	0,670	182,35		6,82
RefB	Max J [mA/cm ²]	218	0,592		19/07/2010	201	0,610		03/08/2010	8,16
	Min ASR [Ωhm·cm²]	1,70		77,8758		1,85		73,9698		-8,30
	OCV [V]	0,908				0,900				0,81
	Max P [W]	3,70	0,615	109,30		3,18	0,632	91,46		13,96
Biogas	Max J [mA/cm ²]	109	0,615		22/07/2010	91	0,632		04/08/2010	16,32
	Min ASR [Ωhm·cm²]	2,01	-	26,1575		2,19		15,3553		-9,10
	OCV [V]	0,871				0,878				-0,84
	Max P [W]	2,48	0,618	72,86		2,31	0,574	73,25		6,56
CC1	Max J [mA/cm ²]	73	0,618		23/07/2010	73	0,574		05/08/2010	-0,54
	Min ASR [Ωhm·cm²]	2,55		5,13E-02		2,92		0*		-14,62

^{*} L'ASR stimata non ha un minimo nel range di lavoro

Anche dal confronto delle curve di polarizzazione emerge come la rigenerazione non abbia ristabilito le prestazioni pre inquinamento: sia nel caso 'Ref B' che 'Biogas' la cella non è arrivata alle stesse densità di corrente, mentre la tensione sembra proporzionale alla densità di corrente per valori medio-bassi di quest'ultima (fino a 150-170 mA/cm² per 'Ref B', circa 50 mA/cm² per le altre due composizioni, sebbene la 'CC1', mettendo più in crisi la cella, diventi più problematica da leggere); oltre tali valori la differenza di tensione cresce, accelerando la divergenza tra i valori pre e post inquinamento.

Nella potenza erogata, la variazione relativa appare uniforme in ampi tratti della curva caratteristica. In termini assoluti sono stati misurati oltre 40 mV di differenza nel punto di massima corrente, corrispondenti a circa 0,5 watt per 'Ref B', 0,3 watt per 'Biogas' e 0,15 watt per 'CC1' (le potenze assolute erogate sono proporzionali: 7 watt per 'Ref B', 3,5 watt per 'Biogas' e 2,3 per 'CC1').

Una seconda settimana di rigenerazione è seguita alla prima, in modo da verificare un'eventuale ripresa delle prestazioni sufficiente a riprendere i test così come programmati. Al termine di questa seconda settimana di rigenerazione si è constatato come ancora non ci fosse stato il recupero richiesto: un ultimo fit evidenzia un coefficiente angolare praticamente nullo ed un valore del voltaggio al termine della settimana, stimato nell'arco di questa, pari a V = 0,839, esattamente come il precedente. In queste condizioni e con oltre 1000 ore di test già in attivo, non si è ritenuto utile estendere le prove a dosi maggiori d'inquinante su 'CC1', come previsto per la seconda parte della campagna di test, poiché con miscele ad utilizzo particolarmente alto come 'CC1'non sarebbe stato possibile è possibile cogliere un riferimento valido.

Nelle prove sperimentali condotte presso i laboratori ENEA sono state utilizzate 3 monocelle con area attiva di 55 cm². I componenti di cella sono stati forniti da Ansaldo Fuel Cell. Le condizioni di esercizio delle celle, provate per un periodo di tempo che va dalle 1500 alle 2000 ore, sono le seguenti:

```
\begin{split} T &= 650^{\circ}\text{C}, \ P = 1 \ \text{atm} \\ \text{gas catodico } O_2\text{:}N_2\text{:}CO_2 &= 14.4\text{:}54.2\text{:}31.4 \ \text{vol\%}, \\ \text{gas anodico } H_2 &= 16 \div 28 \ \text{vol\%} - CO_2 &= 2 \div 10 \ \text{vol\%} - CO &= 2 \div 6 \ \text{vol\%}, \\ H_2 &S &= 2 \div 95 \ \text{ppm}, \ H_2 O &= 25 \ \text{vol\%}, \ N_2 \ \text{per la parte rimanente}. \end{split}
```

Le curve di polarizzazione sono state eseguite effettuando una scansione di corrente e registrando il potenziale corrispondente. Le misure di impedenza sono state effettuate a due elettrodi, con un analizzatore di risposta in frequenza SI 1260 ed una interfaccia elettrochimica SI 1287 Solartron. Le misure di impedenza durante erogazione di corrente della cella sono state effettuate con Booster 1470 Solartron da 20 A.

Si è studiato l'effetto della composizione del gas anodico sulle prestazioni di cella, con riferimento ai gas presenti quando la cella viene alimentata con biogas: idrogeno, anidride carbonica, ossido di carbonio, in tracce metano, idrogeno solforato e acqua. L'effetto di tali componenti sulle prestazioni di una cella a combustibile a carbonati fusi con componenti tradizionali viene riportato nel seguito.

Effetto dell'aggiunta di CO

Aggiungendo ossido di carbonio alla cella si osserva una variazione negativa della sua tensione a circuito aperto (OCV). Contrariamente a quanto accade per la CO₂, la variazione di potenziale è lenta sia all'aggiunta che

all'interruzione del flusso del gas contenente CO con un salto negativo all'aggiunta ed uno positivo dopo l'interruzione.

Si è studiato anche l'effetto dell'aggiunta di CO sulla tensione di cella a circuito aperto (OCV) con diversi rapporti H_2/CO_2 . Nella Figura 167 sono riportati i valori della tensione di cella all'aggiunta ed interruzione di un flusso di CO nel tempo con basso contenuto di CO_2 ($H_2/CO_2 = 13,4\%$), un contenuto intermedio ($H_2/CO_2 = 6,7\%$) ed un alto contenuto di CO_2 ($H_2/CO_2 = 1,7\%$). L'aggiunta di CO per alti rapporti tra idrogeno ed anidride carbonica, ha un effetto negativo sulla tensione di cella a circuito aperto. Al diminuire del rapporto e quindi all'aumentare della concentrazione di anidride carbonica, l'effetto è prima nullo e poi positivo.

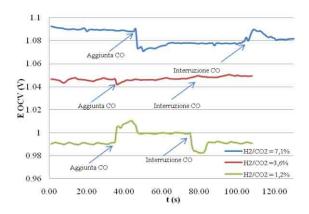


Figura 167. Tensione di cella in funzione del tempo, con diversi rapporti idrogeno/anidride carbonica prima durante e dopo aggiunta di ossido di carbonio $(H_2/CO_2 = 7,1\%, H_2/CO_2 = 3,6\%, H_2/CO_2 = 1,25\%)$

E' stato studiato inoltre l'effetto dell'aggiunta di CO all'OCV e diverse correnti di polarizzazione della cella. In Figura 168 è riportata la tensione di cella ad OCV, 100 e 160 mA/cm² prima durante e dopo aggiunta di CO. Alla tensione di circuito aperto l'effetto dell'aggiunta del monossido di carbonio è negativo e l'interruzione del flusso di CO provoca invece uno shift positivo della tensione di cella come già spiegato in precedenza. A correnti più elevate l'effetto negativo diminuisce fino ad annullarsi del tutto.

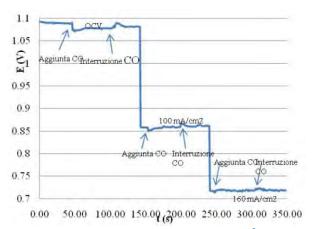


Figura 168. Tensione di cella in funzione del tempo, ad OCV, 100 e 160 mA/cm² prima durante e dopo aggiunta di CO

Dall'analisi dei dati ottenuti all'aggiunta di CO all'anodo di una cella combustibile a carbonati fusi con diverse concentrazioni di CO₂ e diverse correnti di polarizzazione, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- la reazione anodica in fase gassosa dominante all'aggiunta di CO dipende dalla concentrazione di anidride carbonica:
- o con rapporti H₂/CO₂ elevati, quindi una bassa concentrazione di anidride carbonica, prevale la reazione di Boudouard e si osserva un effetto negativo sulla tensione di cella;
- con bassi rapporti H₂/CO₂, quindi un'elevata concentrazione di anidride carbonica, prevale la reazione di wgs e l'aggiunta di CO ha un effetto positivo sulla tensione di cella;
- quando la cella è in stato di polarizzazione, la reazione di wgs prevale anche a basse concentrazioni di CO₂
 a causa dell'aumentata pressione parziale di questo gas prodotto nella reazione anodica.

o Effetto dell'aggiunta di H₂S

Bassi livelli di H_2S influiscono sulle prestazioni di cella compromettendo sia la quantità di corrente erogata che la durata della vita della cella. Nel precedente anno di questo AdP, è stato studiato il meccanismo di avvelenamento e rigenerazione dell'anodo tradizionale di nichel-cromo. La reazione di H_2S può avvenire attraverso diversi meccanismi di reazione come: assorbimento fisico e chimico, reazioni chimiche con l'elettrodo e l'elettrolita. Il meccanismo di avvelenamento dell' H_2S dipende dalle condizioni operative in cui è esercita la cella e più precisamente da: densità di corrente, composizione del gas anodico, temperatura e pressione.

Lo studio effettuato fino ad ora ha previsto il mantenimento costante di tutte le variabili eccetto quella in esame. In una cella a combustibile reale diversi parametri possono mutare contemporaneamente e quindi si è affrontato lo studio del meccanismo di avvelenamento con un metodo matematico multi variabile che tiene conto non solo dell'effetto sulla risposta, in questo caso la tensione di cella, di ciascuna variabile, ma anche delle interazioni di ogni variabile con le altre. Sperimentalmente sono stati modificati più parametri contemporaneamente ed effettuate le misure di polarizzazione. In questo modo è stato possibile definire il principale meccanismo di avvelenamento dello zolfo nelle condizioni operative di una MCFC, quantificare l'effetto delle densità di corrente, della concentrazione dell'idrogeno e dell'acido solfidrico sullo avvelenamento ed identificare l'interazione tra questi parametri. Inoltre è possibile formulare un modello multivariato per predire l'avvelenamento. Sono stati studiati gli effetti della densità di corrente da 50 mA/cm² (l'effetto dell' avvelenamento da H₂S zolfo non è significativo per valori più bassi) a 160 mA/cm² (la tensione di cella scende sotto la soglia di sicurezza di 500 mV a valori di corrente più alti). Sono stati studiati gli effetti della concentrazione di idrogeno da 33,3 vol% (a concentrazioni più basse il rapporto H2:O2 è inferiore al valore stechiometrico, quindi l'effetto sulla tensione di cella è dovuto anche alla reazione catodica) a 47,6 vol %. La concentrazione di H₂S è stata variata da 2 a 95 ppm. Grazie all'applicazione dell'analisi multi fattoriale è stato possibile calcolare l'influenza di tutti i fattori sulla variabile misurata, i risultati ottenuti con questo tipo di approccio sperimentale sono riportati nei grafici nelle Figure 169-171. In particolare si è notato che mentre sia la densità di corrente che la concentrazione di idrogeno influenzano la caduta di tensione in modo lineare, la dipendenza della caduta di tensione di cella dalla concentrazione di idrogeno solforato è quadratica.

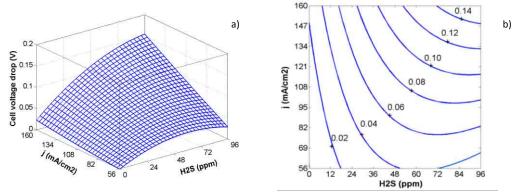


Figura 169. Grafico di superficie e contour plot per l'effetto di H₂S e della densità di corrente sulla caduta di tensione della cella. La concentrazione di idrogeno per questi grafici è stata fissata al 40.5%

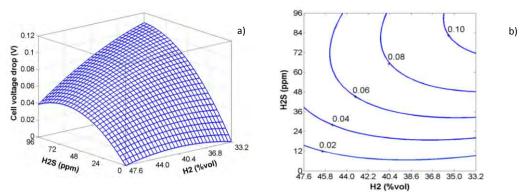


Figura 170. Grafico di superficie e contour plot per l'effetto di H₂S e H₂ sulla caduta di tensione della cella. La densità di corrente per questi grafici è stata fissata a 100 mA/cm²

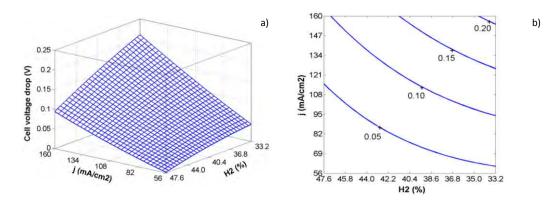


Figura 171. Grafico di superficie e contour plot per l'effetto di H₂ e densità di corrente sulla caduta di tensione della cella. La concentrazione di H₂S per questi grafici è stata fissata a 95 ppm

Dai grafici in tre dimensioni, in cui è riportata la caduta di tensione di cella in funzione della concentrazione di H₂S e della densità di corrente e della concentrazione di H₂S e H₂, della densità di corrente e della concentrazione di H₂ rispettivamente, si può dedurre che la perdita di prestazioni della cella dovuta all'H₂S aumenta all'aumentare della concentrazione di quest'ultimo e della densità di corrente. Al contrario diminuisce all'aumentare della concentrazione di idrogeno. La figura 171b conferma la mancanza di interazione tra concentrazione di idrogeno e densità di corrente in quanto le linee del contour plot sono parallele; al contrario le figure 169b e 110b mostrano l'interazione tra idrogeno solforato e densità di corrente e tra idrogeno solforato e idrogeno rispettivamente. Le curve sopra mostrate possono essere utilizzate, nelle condizioni specifiche in cui è stato calcolato il modello, per

conoscere in anticipo la caduta di tensione a cui va incontro la cella in presenza di H_2S . La bontà del modello è confermata dalla correlazione dei valori sperimentali con quelli calcolati mostrata in Figura 172.

L'analisi multifattoriale è stata poi applicata allo studio dell'effetto dell'aggiunta di CO e delle interazioni acido solfidrico-monossido di carbonio, per studiare la dipendenza della tensione di cella sia dalla concentrazione di ossido di carbonio, contenuto in quantità elevate nel gas di alimentazione della cella proveniente da biogas, sia dalla variazione del rapporto tra CO ed $\rm H_2S$.

Dall'analisi multifattoriale della variazione della composizioni dei gas anodici sono state tratte le seguenti conclusioni:

 l'effetto della presenza di ossido di carbonio sulla tensione di cella è positivo ed ha luogo essenzialmente attraverso la reazione di water gas shift;

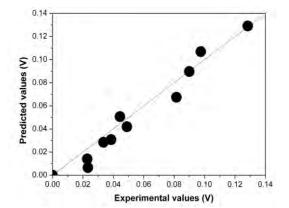


Figura 172. Confronto dei valori calcolati della caduta di tensione della cella con quelli sperimentali ottenuti

- 2. l'avvelenamento da zolfo ha luogo principalmente attraverso la reazione elettrochimica in quanto nelle condizioni operative di una cella le reazioni chimiche non sono termodinamicamente consentite a basse concentrazioni di idrogeno solforato;
- 3. ad elevate densità di corrente la reazione elettrochimica di avvelenamento dell'anodo viene permessa per il raggiungimento di potenziali che consentono la formazione di solfuri di nichel.
- 4. l'effetto negativo dell'idrogeno solforato è parzialmente mitigato dalla presenza di ossido di carbonio che reagisce per formare solfuro di carbonile ed idrogeno.
- Studio dei meccanismi di avvelenamento mediante misure di impedenza

Il meccanismo di avvelenamento di una cella a carbonati fusi da parte dell'acido solfidrico presente nel gas di alimentazione proveniente da biogas, è stato seguito anche con la spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS); quest'analisi consente di distinguere fra le diverse cause di caduta delle prestazioni della cella a combustibile e può essere utilizzata come uno strumento diagnostico.

Sono state effettuate numerose misure di impedenza durante l'esercizio della cella per investigare le diverse condizioni di funzionamento. In particolare sono stati studiati La dipendenza della misura di impedenza dai fattori

di utilizzo del gas anodico e l'effetto dell'avvelenamento da H_2S sulle misure di impedenza. Da tali misure risulta che:

- la spettroscopia di impedenza è un metodo di indagine molto efficace per valutare l'effetto della variazione dei gas di alimentazione anodica sulle prestazioni di cella;
- il diagramma di Nyquist ad OCV degli elettrodi tradizionali e di quelli ricoperti con ceria è stato simulato con un circuito equivalente che evidenzia la presenza su questi ultimi, dello strato di ricopertura capacitivo;
- la variazione dei fattori di utilizzo del gas di alimentazione anodico della cella modifica in modo evidente il secondo semiarco del diagramma di Nyquist;
- il processo di avvelenamento e rigenerazione può essere seguito nel tempo effettuando in continuo misure di impedenza sulla cella.

C.4 Preparazione e prova di nuovi componenti più resistenti agli inquinanti

Per migliorare le prestazioni dell'anodo in termini di tolleranza allo zolfo, si è progettato di modificare le caratteristiche superficiali di un anodo convenzionale di Ni-5wt% Cr ricoprendolo con un sottile strato di ossido di cerio CeO_2 . E' infatti noto che CeO_2 ha la capacità di rimuovere H_2S , soprattutto in atmosfera riducente $(H_2 - N_2)$ e ad alte temperature, secondo la seguente equazione: $2CeO_{2(s)} + H_2S_{(g)} \leftrightarrow Ce_2O_2S_{(s)} + 2H_2O_{(g)}$

L'ossido di cerio sull'anodo si comporta come un adsorbente di zolfo attraverso la formazione di ossisolfuro di cerio (Ce₂O₂S). Lo strato di ricopertura è poroso e consente comunque all'idrogeno di arrivare alla superficie dell'elettrodo per la reazione di ossidazione. La cella con anodo ricoperto, dovrebbe mostrare un'aumentata tolleranza allo zolfo ed una maggiore reversibilità del processo di avvelenamento di una cella con anodo classico alimentandolo, per tempi opportuni, con un flusso di idrogeno privo di inquinanti.

La preparazione dell'anodo ricoperto deve tenere conto della necessità di ottenere uno strato uniforme e sottile di ossido di cerio anche all'interno dei pori dell'elettrodo. Le tecniche migliori per tale processo di ricopertura sono: il metodo sol-gel, il metodo "nitrato/citrato/autocombustione", la "coprecipitazione in presenza di tensioattivo" e la peptizzazione. Le particelle del sol di cerio hanno piccole dimensioni e possono penetrare all'interno dei pori più piccoli senza provocarne l'ostruzione. Il sol di cerio (IV) depositato sull'anodo, viene asciugato e messo in cella dove, nella fase di start up, si trasforma in ossido.

Oltre agli elettrodi ricoperti con ossido di cerio sono stati preparati elettrodi ricoperti con una miscela di ceria e zirconia, dal Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata.

L'utilizzo di soluzioni solide ceria-zirconia è preferito rispetto alla ricopertura con la sola ceria, perché la superficie degli ossidi è maggiormente porosa, mostra caratteristiche redox superiori e modulabili variando il rapporto Ce/Zr. Inoltre l'aggiunta di ZrO₂ a CeO₂ aumenta la resistenza al sintering e favorisce la capacità di rigenerazione dell'anodo per l'elevata oxygen storage capacity.

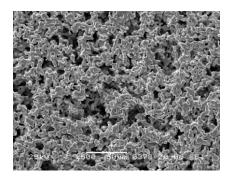
o Preparazione e caratterizzazione di anodi ricoperti con ceria

Gli anodi preparati con materiali studiati nella precedente annualità stati sottoposti a caratterizzazioni chimico fisiche ed a test in cella senza ulteriori trattamenti termici.

Per verificare l'omogeneità della ricopertura, la sua morfologia, la stechiometria dell'ossido di cerio che si forma dopo il trattamento termico a 650°C durante lo start up della cella e la conducibilità dell'elettrodo rispetto al nichel-cromo, sono state utilizzate diverse tecniche (microscopia elettronica e analisi EDS, diffrazione a raggi x, analisi termica, misure di conducibilità con la tecnica a quattro punte di Van Der Pauw).

Le indagini sono state eseguite sul campione dopo impregnazione e, ove necessario, dopo trattamento termico in forno in atmosfera riducente, sulle polveri del sol essiccate e trattate termicamente in atmosfera riducente.

Nella Figura 173 è riportata la fotografia al microscopio elettronico del substrato di nichel-cromo 5%p, preossidato a 500 e 5000 ingrandimenti senza ulteriori trattamenti termici. E' chiaramente visibile la macroporosità dell'elettrodo.



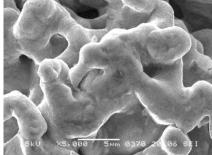


Figura 173. Anodo nichel-cromo preossidato

Dalle analisi EDX sia sulla superficie (Figura 174) che sulla cross section dell'elettrodo (Figura 175) il cerio è omogeneamente distribuito sulla superficie ed è stato anche depositato in modo uniforme attraverso tutta la sezione dell'elettrodo.

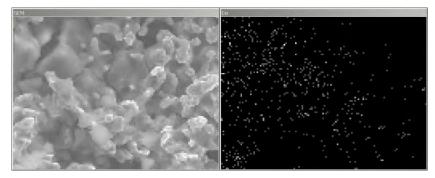


Figura 174. Substrato preossidato impregnato dei precursori dell'ossido di cerio senza trattamenti termici

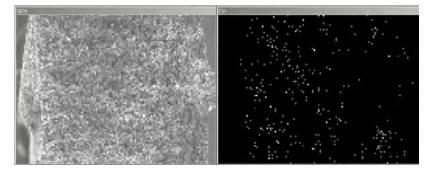
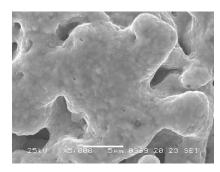


Figura 175. Anodo preossidato ricoperto con precursori di ceria (cross section)

Nella Figura 176 è riportata l'immagine SEM dell'elettrodo rivestito dopo un trattamento termico in ambiente riducente a 650 °C. Sulla superficie si può osservare la crescita di particelle di ossido di cerio. L'analisi EDX del cerio effettuata in diversi punti dell'elettrodo ha mostrato una concentrazione variabile da un minimo dello 0,6 % in peso, ad un massi o del 2,4 % in peso.



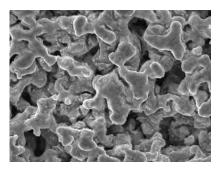


Figura 176. R III gel dopo trattamento termico a 650 °C /1h/2°C/min in atmosfera riducente

L'analisi con i raggi x ha evidenziato la presenza di solo ossido di cerio IV dovuto all'autocombustione dei nitrati, mentre l'analisi termica condotte con la temogravimetria hanno dato utili indicazioni sul materiale ma soprattutto per definire lo start up di una cella.

Sono state quindi eseguite una misure di conducibilità su campioni ricoperti con i precursori della ceria a 650 °C con la tecnica a quattro punte di Van Der Pauw per controllare che lo strato di ossido formato in superficie non aumenti troppo la resistenza dell'elettrodo. Per tutti i campioni il valore medio della resistenza del materiale rimane costante nel tempo (Figura 177), l'anodo di nichel-cromo rivestito di ceria presenta una resistenza leggermente più alta dell'anodo di nichel-cromo, ma più bassa dell'anodo di nichel-alluminio. La resistenza dell'anodo rivestito si mantiene comunque su valori accettabili per l'impiego in cella.

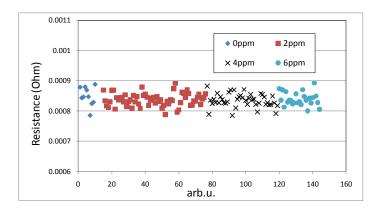


Figura 177. Andamento della resistenza elettrica in funzione del tempo a 650° C in atmosfera di N_2 + H_2 al 3% e quantità diverse di H_2 S per l'anodo di NiCr ricoperto di Ceria

L'influenza dell' H_2S sulla resistenza elettrica dell'anodo di NiCr ricoperto di ceria è stata studiata aggiungendo in successione quantità crescenti di H_2S (2, 4 e 6 ppm) e registrando le variazioni della resistenza. Come è evidente dalla Figura 178, l'aggiunta di H_2S non comporta alcuno effetto sulla resistenza elettrica del materiale.

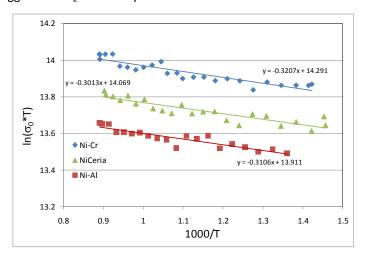


Figura 178. Grafico di Arrhenius per la conducibilità elettrica per anodi di: NiCr, NiAl e NiCr ricoperto di ceria

Preparazione e caratterizzazione di anodi ricoperti con ceria-zirconia

Accanto al metodo di ricopertura via sol gel, in collaborazione con l'Università Tor Vergata di Roma, si è deciso di sperimentare altre possibili tecniche di deposizione ed altre miscele di ricoprente. L'attività è stata indirizzata allo sviluppo di protocolli di sintesi di polveri di $Ce_xZr_{1-x}O_2$ (CZX) e all'esame di possibili protocolli di deposizione delle stesse sui substrati anodici forniti da Ansaldo. I protocolli di sintesi sono stati ottimizzati per adattarsi al metodo di deposizione ovvero "spray deposition" e "deep coating".

Spray deposition

Soluzioni solide con cristalliti nanometrici di $Ce_xZr_{1-x}O_2$ sono state sintetizzate mediante il metodo a) nitrato/citrato/autocombustione" e b) co-precipitazione in presenza di tensioattivo.. Grazie al metodo a) è stato possibile

ottenere polveri di CZO cubiche con cristalliti nanometrici. La deposizione è stata effettuata mediante filtrazione. Il coating era uniformemente distribuito sulla superficie. Di conseguenza era presente un marcato effetto "pore blocking" che poteva pregiudicare la funzionalità dell'anodo (Figura 179). L'effetto "pore blocking" è stato attribuito alla morfologia della polvere di partenza ed al metodo di deposizione.

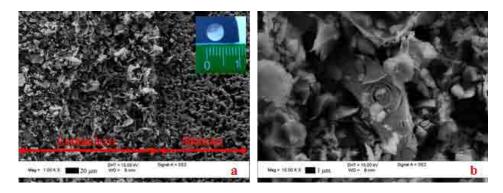


Figura 179. Immagini SEM del substrato NiCr_PX ricoperto utilizzando la sospensione alcolica di CZ50; vista superiore che mostra lo strato di CZ50 accanto al substrato poroso privo di ricopertura

Per tali motivi sono stati esaminati metodi alternativi di sintesi. E' stato quindi sviluppato un protocollo di sintesi per coprecipitazione che ha permesso di ottenere polveri monodisperse e disgregate. Inoltre è stato adottato il metodo di deposizione "spray" che permette di depositare strati di ossido di spessore controllato.

L'analisi morfologica di un tipico strato catalitico depositato mediante spray mostra come sia stato possibile depositare più strati omogenei di dimensioni micrometriche. E' stato evidenziato che la ricopertura è presente essenzialmente sulla faccia esterna del substrato metallico non coinvolgendo affatto la struttura porosa sottostante.

Deep coating

Per ottenere una ricopertura omogenea del substrato poroso è stato impiegato il metodo deep coating con precursori basati su sol o colloidi opportuni, preparati mediante metodi messi a punto in laboratorio.

I substrati anodici, una volta puliti, sono stati sottoposti a deep coating e poi ai successivi trattamenti termici. La temperatura di calcinazione, determinata mediante una precedente analisi TGA, è stata scelta in modo da evitare l'ossidazione del substrato di nichel. La caratterizzazione SEM dei campioni ha messo in luce una notevole dipendenza della morfologia del rivestimento dal tipo di precursore impiegato nel processo di deep coating. Entrambi i metodi di preparazione (colloidale e sol) portano a campioni in cui la ricopertura è omogeneamente distribuita all'interno del substrato poroso. Il loading dello strato catalitico può essere modulato variando alcuni parametri di preparazione delle sospensioni o mediante deposizioni successive.

Sono stati quindi avviati i test in cella. La cella è costituita da un catodo tradizionale ed un anodo di nichel rivestito

con ceria per studiare l'effetto della ricopertura anodica sulla tensione di cella durante l'avvelenamento. L'anodo è stato utilizzato senza alcun trattamento termico dopo la fase di ricopertura ed asciugatura. In Figura 180 sono riportate le curve di polarizzazione in funzione della concentrazione di H₂S nel gas di alimentazione anodico. Nonostante la ricopertura dell'elettrodo con ceria, l'effetto H₂S è evidente soprattutto alle alte concentrazioni.

La rigenerazione della cella viene effettuata inviando all'anodo gas privo di H_2S . Il tempo necessario al ripristino della tensione di cella è dell'ordine di poche ore, dalla Figura 181 è possibile vedere che, nel tempo, ad elevate concentrazioni dell' H_2S , le prestazioni della cella non vengono tuttavia recuperate al 100%.

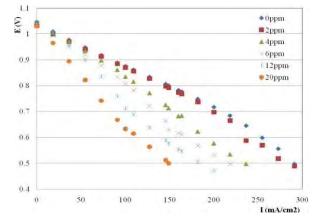


Figura 180. Curve di polarizzazione a diverse concentrazioni di H_2S

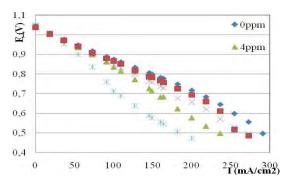


Figura 181. Curve di polarizzazione con gas anodico contenente 4 e 12 ppm di idrogeno solforato e successiva rigenerazione

La diminuzione delle prestazioni di cella nel tempo è in parte dovuta all'aumento della resistenza interna della cella legata alla perdita di carbonati. In ogni caso l'effetto della copertura con ceria non è visibile. Sulla base dei risultati sperimentali e delle analisi chimico fisiche pre e post test si è giunti alle seguenti conclusioni:

- la cella con anodo rivestito non ha mostrato rispetto ad una con anodo tradizionale, un miglioramento di prestazioni in presenza di idrogeno solforato;
- l'analisi post test ha evidenziato l'assenza dello strato di ricopertura dopo 1300 ore di esercizio della cella; la metodologia di preparazione dell'anodo rivestito con ossido di cerio deve essere quindi modificata per ottenere una maggiore adesione dello stesso. Probabilmente è necessario ottenere prima dell'inserimento in cella, la formazione da parte dei precursori, dell'ossido di cerio III-IV con un trattamento termico in ambiente fortemente riducente;
- gli anodi di nichel-cromo rivestiti di ceria/zirconia messi a punto dall'Università di Tor Vergata, al termine della preparazione subiscono un trattamento di calcinazione a 350 °C per 2 ore. Come detto, il trattamento di calcinazione è necessario per consolidare il rivestimento catalitico che si presenta aderente ed omogeneo.

D. Alimentazione di celle a combustibile a carbonati fusi con gassificatori di biomasse: analisi dei sistemi di clean up del gas e accoppiamento di un gassificatore di tecnologia nazionale con uno stack di celle

Nell'ambito delle attività relative all'accoppiamento della MCFC con impianti di gassificazione di biomasse era previsto lo sviluppo di una tecnologia basata sull'accoppiamento del gassificatore Hydrosyn con l'impianto cella a combustibile a carbonati fusi.

Il progetto Hydrosyn utilizza una tecnologia nata in ENEA, successivamente migliorata sulla base di prove sperimentali effettuate sull'impianto e brevettata nel 2008 dall'ENEA insieme con l'Università dell'Aquila. L'accoppiamento di tale impianto con la cella a combustibile a carbonati fusi da 125 kW_{el} in realizzazione nel C. R. ENEA Trisaia permetterebbe di avere una tecnologia tutta italiana per la trasformazione delle biomasse ed il suo utilizzo al fine della produzione di energia elettrica.

Il gassificatore a letto fluido utilizza una miscela di ossigeno-vapore che serve sia per la fluidizzazione del letto sia per la gassificazione. La portata nominale di biomassa (su base umida) è pari a circa 220 kg/h; quella di gas combustibile prodotto è pari a 380 Nm 3 /h in condizioni di processo (T = 850 °C e P atmosferica, a meno dei Δ P). La miscela di syngas, grazie alla particolare geometria della sezione di fluidizzazione costituita da un corpo centrale suddiviso in due camere comunicanti, in virtù della diversa fluidizzazione imposta, inizia a circolare insieme al materiale costituente il letto (sabbia o olivina). Ciò favorisce lo scambio termico e quindi l'instaurarsi di una temperatura uniforme nel reattore, aumentando l'efficienza di gassificazione e dei contenuti in tar. Il syngas così è idoneo all'utilizzo come combustibile per la MCFC.

D.1 Valutazione delle alternative disponibili per la purificazione dei gas

Allo stato attuale la sezione di clean-up ha una duplice funzione, da un lato di neutralizzare le sostanze acide formatesi nel processo di gassificazione a causa dell'ambiente riducente e della presenza di cloro e zolfo nella biomassa di partenza, quali l'acido solfidrico e l'acido cloridrico, e di abbattere il particolato presente nella corrente gassosa allo scopo di renderla idonea come corrente anodica da alimentare alla cella a combustibile a carbonati fusi, dall'altro, di evitare trascinamenti di tar che si formano durante l'intero processo.

Il syngas che lascia il gassificatore ad 850 °C contiene mediamente acido solfidrico e acido cloridrico con una concentrazione media di 250 e 100 ppm rispettivamente, in primo luogo è raffreddato a 600 °C ed è alimentato

alla sezione di declorazione; per far ciò si utilizza ossido di calce, CaO, con una dimensione media delle particelle di 40 μ m ed una temperatura compresa tra i 525 e 620 °C e pressioni di 100-200 mbar.

La declorazione viene effettuata usando calce (CaO), ottenuta tramite calcinazione di calcare (CaCO $_3$), con caratteristiche riportate nella tabella a lato. La portata alimentata di calce è di 0,63 kg/h (0,57 kg/h di CaO) ed il rapporto molare sorbente/acido(Ca/(Cl+S)) è di circa 4,3.

Densità (kg/dm)	3,35
Composizione chimica (%p)	
CaO	90 min
CO ₂	3,5 max
SiO ₂	0,05 max
S	0,05 max
H₂O	1 max
MgO	1,5max
Dimensioni (μm)	50-100

In Tabella 26 si riporta l'efficienza di rimozione dello zolfo (SR) e l'efficienza di rimozione del cloro (CR) determinate con la variazione delle concentrazioni tra l'ingresso e l'uscita dello stadio.

Tabella 26. Efficienza di rimozione delle specie acide presenti nel syngas

Tin (°C)	508
Tout (°C)	476
CaO (kg/h)	0,57
H ₂ S (ppmv)	40
HCI (ppmv)	36
SR%	84
CR%	66

A valle della fase di desolforazione e declorazione vi è la fase di abbattimento del particolato che avviene mediante un ciclone al fine di raccogliere le particelle aero disperse sfruttando la loro forza di inerzia. Mediante questo sistema si riescono a raggiungere efficienze di rimozione quasi totali del particolato.

Lo studio termodinamico condotto nella seconda annualità dell'AdP ha preso in considerazione il confronto tra l'utilizzo di sorbenti a maggiore efficienza di rimozione rispetto all'ossido di calcio per ciò che concerne l'abbattimento dell'acido solfidrico.

Di seguito si riportano le reazioni prese in esame al fine di effettuare il confronto tra i sorbenti:

$$CaO_{(s)} + H_2S_{(g)} \leftrightarrow CaS_{(s)} + H_2O_{(g)}$$
 (1)

$$CuO_{(s)} + H_2S_{(g)} \leftrightarrow CuS_{(S)} + H_2O_{(g)}$$
 (2)

I calcoli termodinamici dimostrano che sorbenti a base di Ca non sono adatti ad alte temperature, al contrario si dimostra decisamente più efficace il CuO che sotto ogni condizione considerata sembrerebbe raggiungere contenuti di H₂S dell'ordine di 1 ppm o decimi di ppm.

Nello studio è stato considerato l'effetto della CO_2 del syngas e i connessi fenomeni di carbonatazione, i quali portano ad una diminuzione della capacità del sorbente, mentre l'efficacia di sostanze sorbenti a base di CuO è dovuta ad un diverso meccanismo di assorbimento. Tuttavia, il CuO è ridotto a Cu metallico dalla elevata presenza di H_2 nel syngas e, al fine di ottimizzare la purezza del gas, andrebbe investigato l'effetto della concentrazione di H_2 e della temperatura di processo.

I risultati dei calcoli di equilibrio mostrano che CuO potrebbe essere un sorbente adatto per la rimozione di H_2S , mentre l'azione di desolforazione del CaO viene limitata a causa dell'alta concentrazione di H_2O e della concentrazione di CO_2 presente nel syngas.

L'altro aspetto che è stato considerato è quello legato alla presenza di tar nel gas di sintesi. Sono stati effettuati studi di modellistica in ambiente ChemCAD dell'impianto Hydrosyn a letto fluidizzato internamente ricircolante.

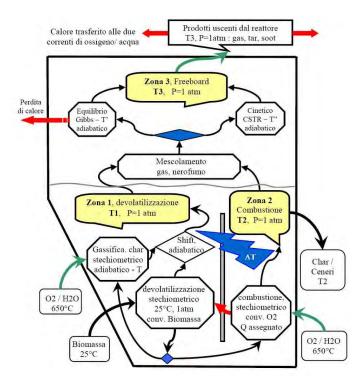
Il modello è empirico-teorico, ovvero sono stati impiegati dati sperimentali, teorie termodinamiche e cinetiche per il suo sviluppo ed è stato organizzato in più sub-modelli al fine di essere più aderente alla architettura del reattore e ai diversi processi chimici (pirolisi, combustione, gassificazione). La camera a flusso discendente più ricca in vapore, è stata simulata da sub-unità che descrivono i processi di pirolisi della biomassa e di gassificazione del char, invece la camera a flusso ascendente più ricca in ossigeno è stata simulata da una sub-unità che simula la combustione del char. Altre sub unità sono state utilizzate per simulare il free-board.

Di seguito si riporta lo schema adottato per suddividere l'impianto Hydrosin in sub-unità. In prima approssimaizione, sono state utilizzate, leggi cinetiche tradizionali del primo ordine per le reazioni di formazione dei tar simulate attraverso appositi reattori di formazione per poter descrivere il noto trend della diminuzione dei tar

all'aumentare della temperatura. Occorrono quindi almeno due serie di dati sperimentali a temperature diverse per poter determinare i parametri cinetici e rendere il modello predittivo per un particolare processo di gassificazione in questa tipologia del reattore.

La modellizzazione di scambio termico effettuata in termini di salto minimo della temperatura può ottenere la sua verifica ed il suo grado di approssimazione, dalla costruzione di un modello fluido dinamico a parametri distribuiti condotto in regime stazionario del letto fluidizzato circolante che tenga in conto dell'inerzia termica della sabbia, della geometria del gassificatore e dell'entità della circolazione.

Il risultato complessivo della modellazione numerica rappresenta la possibilità di poter prevedere la quantità e la tipologia dei tar in ciascuna condizione di processo per il doppio letto fluido ricircolante Hydrosyn.



D.2 Modello termodinamico di funzionamento del gassificatore di biomasse - celle a combustibile a carbonati fusi

In quest'ambito viene introdotto un modello di simulazione per la cella a combustibile a carbonati fusi, nell'ipotesi che venga alimentata con un gas di caratteristiche simili a quello prodotto dall'impianto di gassificazione a vapore operante presso il CR ENEA Trisaia. Mediante tale strumento è possibile eseguire alcune valutazioni preliminari sul consumo di gas tecnici necessari per la messa in esercizio dell'impianto, nonché sulle prestazioni della cella espresse mediante alcuni parametri caratteristici, quali, in particolare, il coefficiente di utilizzazione del combustibile e l'efficienza elettrica di cella.

La cella a combustibile oggetto dello studio prodotta da Ansaldo Fuel Cell ha una potenza nominale di 125 kW. La modellazione numerica parte dalla schematizzazione dei principali macro-componenti contenuti nel vessel, in particolare: combustore catalitico, scambiatore di calore a piastre, scambiatore ausiliario ad acqua e soffiante di ricircolo.

A regime lo stack opera ad una temperatura di circa 650 °C ed una pressione di 3,5 bar. Nel vessel, sono dirette dall'esterno le linee di alimentazione catodica ed anodica. Al catodo viene inviata aria (con eventuale aggiunta di CO₂) aspirata a temperatura e pressione ambiente e successivamente compressa e riscaldata, fino a raggiungere 4 bar e 400 °C.

Il pre-riscaldamento dell'aria è richiesto solo nella fase di heat up dell'impianto, mentre a regime non risulta essere necessario, grazie al ricircolo, che avviene nel vessel, della corrente in uscita dal catodo. All'anodo viene inviato il syngas da gassificazione di biomasse e, dopo essere stato adeguatamente trattato dalle varie unità di purificazione, viene compresso, pre-riscaldato ed inviato nel vessel, dove la sua temperatura viene portata a circa 650 °C, grazie allo scambio di calore con i gas in uscita dal bruciatore catalitico che avviene nello scambiatore a piastre. A questo punto tale gas è adatto ad essere alimentato all'anodo (Figura 182).

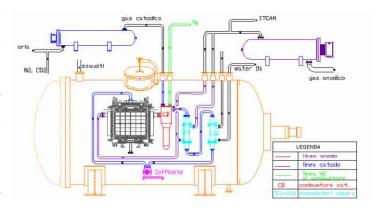


Figura 182. P&ID cella a combustile a carbonati fusi

Il modello della cella a carbonati fusi è stato realizzato mediante il codice commerciale ChemCAD, utilizzando per ciascun componente della cella l'unità più adatta tra quelle disponibili nella libreria del software. Per l'implementazione del modello sono state adottate le ipotesi semplificative di seguito elencate:

- a. schematizzazione dello stack;
- b. regime stazionario;
- c. gas perfetto;
- d. scambio termico radiativo trascurabile;
- e. catodo alimentato dagli esausti del combustore catalitico.

Il gas dopo essere stato compresso e preriscaldato, viene miscelato con il vapore tramite un mixer ed il flusso risultante viene fatto passare attraverso uno scambiatore di calore, da cui, raggiunta una opportuna temperatura, può essere inviato all'anodo. All'elettrodo avviene la reazione dell'H₂ e la reazione di shift del CO. I gas ancora caldi all'uscita dall'anodo sono inviati al combustore catalitico dove, assieme alla portata d'aria in ingresso, reagiscono per produrre calore utile all'intero processo. Il modello sviluppato è stato impiegato per verificare il comportamento del sistema cella a combustibile a carbonati fusi al variare della composizione del gas alimentato. A tale scopo sono state utilizzate portate e composizioni del biogas ottenute da quattro prove sperimentali condotte sull'impianto di gassificazione operante presso il CR. ENEA Trisaia. Tali test si caratterizzano per i diversi valori assegnati a vari parametri operativi: portata di biomassa e rapporto vapore/combustibile (Tabella 27).

Tabella 27. Caratteristiche del gas prodotto in diverse condizioni

	TEST						
	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4			
Portata biogas [kg/h]	170,6	134,5	208,3	198,5			
Temperatura processo [°C]	795,1	816,4	839,1	834,8			
Portata (secco) [kg/h]	74,1	54,9	122,1	119,4			
CO [% vol.]	19,0	20,6	23,6	25,1			
CO ₂ [% vol.]	20,6	20,8	21,6	19,3			
H ₂ [% vol.]	26,0	33,4	32,7	33,1			
CH ₄ [% vol.]	9,2	9,1	9,6	10,4			
C₂H ₆ [% vol.]	0,2	0,2	0,1	0,2			
C₃H ₈ [% vol.]	2,2	2,1	2,4	2,3			
N ₂ [% vol.]	22,8	13,9	9,9	9,6			
PCI [MJ/Nm³]	10,62	11,44	12,21	12,71			

Nella tabella vengono sintetizzati i dati salienti sulle caratteristiche del syngas prodotto nei vari test sperimentali. È possibile osservare che l'idrogeno presente nella miscela gassosa varia dal 26 fino ad oltre il 33% in volume, mentre il monossido di carbonio assume percentuali comprese tra il 19 e poco più del 25%. È inoltre importante notare come l'azoto passi da un valore di quasi il 23% nella prova 1 a meno del 10% nella prova 4, con un incremento del potere calorifico inferiore di quasi il 20%.

Sono stati quindi confrontati i consumi complessivi di idrogeno attesi nello stack nel caso di alimentazione mediante il biogas ottenuto dalle quattro prove sperimentali alla massima intensità di carico. Per le prova 3 e 4 è stato valutato anche il consumo per diverse intensità di carico.

Dalle simulazioni effettuate nei quattro casi presi in esame si ottengono i risultati riportati in Tabella 28, mentre in Figura 183 sono mostrati i valori del coefficiente di utilizzazione del combustibile e del rendimento di cella nelle diverse condizioni di prova e, quindi, di biogas alimentato all'anodo, considerate.

Tabella 28. Risultati delle simulazioni

		TEST					
	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4			
Portata biogas [kg/h]	170,6	134,5	208,3	198,5			
Temperatura cella [°C]	656,3	652,7	678,4	682,5			
Utilizzo combustibile [%]	76,4	79,5	81,3	83,4			
Rendimento cella [%]	43,0	46,3	47,4	48,7			

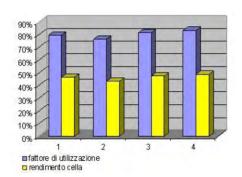


Figura 183. Variazione del fattore di utilizzazione e rendimento di cella

È stata effettuata un'indagine circa l'influenza di alcuni parametri operativi del gassificatore sulla resa della cella a combustibile, in particolare sull'effetto della temperatura di gassificazione e del rapporto vapore/biomassa sulla composizione del gas prodotto.

Si è cercato di verificare quale sia il comportamento della cella a combustibile in termini di fattore di utilizzazione del combustibile e rendimento al variare della temperatura alla quale avviene la gassificazione della biomassa. Dalle analisi condotte si è osservato che un aumento della temperatura di processo conduce ad un incremento del tenore di idrogeno nel gas, senza penalizzare il rendimento del sistema di gassificazione. Lo stesso fenomeno si verifica anche per il monossido di carbonio che, come detto precedentemente, contribuisce indirettamente alla conversione energetica in cella attraverso un'intermedia reazione di shift.

In Tabella 29 vengono sintetizzati i risultati della simulazione del processo di gassificazione al variare della temperatura tra un valore minimo di 750 °C ad un massimo di 900 °C in condizioni di pieno carico e con un rapporto vapore/biomassa pari a 0,91.

Tabella 29. Effetto della temperatura di gassificazione

Biomassa alimentata [kg/h]	105					
Rapporto vapore/biomassa [-]	0,91					
Temperatura [°C]	750 800 850 900					
H ₂	38,3	40,9	43,0	45,0		
CH₄	16,9	13,6	11,3	9,5		
со	23,1	26,7	28,6	29,3		
CO ₂	17,9	15,2	13,6	12,8		

È opportuno rilevare che aumentando la temperatura si ha anche un abbattimento sensibile dei tar, con un evidente vantaggio sulla successiva fase di purificazione, mentre non vi sono sostanziali effetti sulla produzione di composti acidi.

Utilizzando i dati di Tabella 29 nel modello della cella a combustibile si può stimare, in particolare, una crescita del rendimento di cella da poco meno del 44% per una temperatura di gassificazione di 750 °C a quasi il 48% per una temperatura di 900 °C. L'incremento del rendimento raggiunge pertanto quasi il 10%. La sua entità tuttavia non è tale da giustificare il funzionamento piuttosto oneroso che si avrebbe nell'unità di gassificazione per temperature molto elevate (superiori agli 850 °C).

Analogamente in Tabella 30 vengono riassunti i risultati forniti dal modello del gassificatore al variare del rapporto vapore/biomassa tra 0,8 e 2, mantenendo costante la temperatura di processo (800 °C).

Tabella 30. Effetto del rapporto vapore/biomassa

Temperatura [°C]	800				
Biomassa alimentata [kg/h]	100	90	80	70	60
Rapporto vapore/biomassa [-]	0,80	1,00	1,25	1,57	2,00
H ₂	40,9	42,3	43,4	44,5	45,3
CH ₄	13,6	12,8	11,9	11,0	10,5
со	26,5	25,8	24,9	24,0	22,7
CO ₂	15,3	15,8	16,1	16,7	17,3

Al crescere del rapporto vapore/biomassa, si osserva dunque un aumento del tenore di idrogeno, mentre gli altri componenti combustibili, metano e monossido di carbonio, tendono a diminuire.

Procedendo come nel caso precedente, mediante il modello della cella a combustibile è stato valutato l'effetto risultante sul rendimento di cella. Anche in questo caso si ha una crescita del rendimento, ma in misura molto più limitata rispetto alla variazione di temperatura. L'incremento del rendimento viene infatti stimato solo intorno al 3% se il rapporto vapore/biomassa aumenta da 0,8 a 2. Questo effetto modesto è dovuto al fatto che i benefici dovuti all'aumento del contenuto di idrogeno nel biogas, quando tale parametro cresce, sono quasi del tutto annullati dalla riduzione che si ha nella percentuale di monossido di carbonio. Siccome anche quest'ultimo contribuisce all'apporto di idrogeno alla cella attraverso la reazione interna di shift, la quantità di idrogeno equivalente che complessivamente reagisce in cella resta abbastanza costante, determinando una crescita del rendimento poco rilevante. Considerando, quindi, che un aumento del rapporto vapore/biomassa influisce negativamente sul rendimento globale del gassificatore, è conveniente che esso non superi un valore di 1,25, anche alla luce del limitato miglioramento del rendimento della cella ottenuto.

In definitiva tra temperatura di gassificazione e rapporto vapore/biomassa, il primo fattore ha un peso certamente maggiore sull'efficienza di cella e, pertanto, è quello sul quale andrebbero concentrati eventuali interventi atti ad ottimizzare le prestazioni dell'impianto integrato gassificatore/cella a combustibile.

D.3 Realizzazione delle modifiche per il collegamento tra il gassificatore e la cella a combustibile a carbonati fusi

Per collegare l'impianto di gassificazione allo stack di celle si sono rese necessarie una serie di implementazioni alle infrastrutture già esistenti .

Una prima fase realizzativa è stata la progettazione del piping meccanico di collegamento gassificatore-gruppo di miscelazione e gruppo di miscelazione- riscaldatore anodico.

L'utilizzo del gruppo speciale di miscelazione consente la regolazione della portata e pressione della corrente anodica alla cella a combustibile ed inoltre permette la regolazione delle composizioni delle singole specie presenti nel syngas (idrogeno, azoto, anidride carbonica, vapore) in maniera da riuscire ad effettuare test di prestazioni della cella in più ampio spettro di indagine.

Il gruppo speciale di miscelazione, è costituito da valvole per la regolazione e controllo della portata, della pressione, nonché da valvole ON/OFF e di sicurezza.

Per la fase di progettazione meccanica del piping, in particolar modo delle linee ad elevata temperatura in uscita dai riscaldatori, è stato necessario effettuare la verifica di stabilità termica delle tubazioni in acciaio, condotta mediante analisi delle sollecitazioni secondo quanto previsto dalla 31.3 ASME al fine di evidenziare (ed opportunamente compensare) i tratti che, sottoposti a differenziali termici, possono indurre notevoli dilatazioni rispetto alle massime ammissibili dalla normativa.

L'ultima fase di implementazione infrastrutturale ha riguardato il sistema DCS, esistente per l'impianto di gassificazione, per la movimentazione automatica delle valvole di regolazione, controllo e di sicurezza di nuova realizzazione e la raccolta e gestione dei principali parametri operativi di processo per l'impianto integrato gassificatore/cella a combustibile.

E. Studio di sistemi ibridi celle ad alta temperatura/turbina; valutazione delle problematiche connesse con l'impiego delle celle a carbonati fusi come concentratori di CO₂

E.1 Studio di sistemi ibridi celle ad alta temperatura/turbina

L'obiettivo di questa linea di attività è quello di effettuare un'analisi tecnico-impiantistica di sistemi ibridi/combinati Innovativi cella a combustibile/turbogas che dovrebbero consentire incrementi di alcuni punti in percentuale del già elevato rendimento elettrico dei soli sistemi a celle a combustibile. In tale ambito si è proposto di analizzare l'accoppiamento tra moduli SOFC, aventi temperature di funzionamento variabili dai 750 ai 1000 °C, e microturbine, poste a valle del modulo elettrochimico e perciò alimentate dai gas esausti in uscita dallo stesso.

L'obiettivo è stata la definizione dei parametri globali di funzionamento dell'impianto, in una o più possibili configurazioni, in modo tale da analizzare le prime problematiche connesse al funzionamento degli stessi nella configurazione ibrida derivante dall'accoppiamento dei moduli elettrochimici con le microturbine. Le analisi impiantistiche realizzate attraverso la simulazione analitica dei sistemi energetici, con la creazione di codici di calcolo dei modelli dei singoli componenti che integrano e si interfacciano completamente con il codice sorgente, hanno permesso di individuare le applicabilità delle tecnologie, le possibilità in termini di prestazioni ed eventuali problematiche. Le difficoltà che si presentano nella realizzazione di un sistema in configurazione ibrida e dello studio delle microturbine da accoppiare alle celle a combustibile, rende ancor più necessario uno studio iniziale dei fenomeni complessivi mediante l'utilizzo di un software di simulazione, potendo infatti ricavare dei dati utili per la realizzazione del sistema e degli elementi costituenti.

o Sviluppo dei modelli analitici e dei componenti

Al fine di sviluppare i modelli dei componenti ed effettuare le simulazioni dell'intero impianto è stato utilizzato il software di simulazione IPSE Pro 3.1°, realizzato dalla società austriaca SimTech (Simulation Technology).

Per redigere un modello valido e nel contempo un codice di calcolo snello e minimizzare i problemi derivanti dai calcoli (facilità di convergenza alla soluzione) i relativi fenomeni ed il processo tutto sono stati realizzati tramite appositi modelli monodimensionali, in una trattazione a parametri concentrati, realizzati nel linguaggio MDL di

IPSE Pro. Nella modellazione si sono poste in essere alcune ipotesi semplificative del funzionamento dello ctack, del reformer e del combustore catalitico.

Per definire il comportamento dei componenti da modellare sono state utilizzate le seguenti forme analitiche:

- equazione di continuità;
- equazione di conservazione dell'energia;
- eguazioni di equilibrio delle reazioni chimiche.

L'applicazione delle equazioni nella forma a parametri concentrati è stata subordinata all'attenta analisi preliminare dei componenti e dei processi e ed è stata verificata la correttezza delle ipotesi introdotte.

In particolare per quanto concerne i due componenti principali (sistema SOFC e microturbine) è stato fatto un approfondito studio sullo stato dell'arte in Italia e nel mondo al fine di poter definire al meglio un ipotetico sistema SOFC/microturbina che avesse caratteristiche quanto più vicine a sistemi reali. In questo è stata molto importante la disponibilità della società italiana SOFC Power che fornito i dati di targa dei sistemi che stanno sviluppando per applicazioni reali.

Come sistema SOFC si è preso a riferimento uno stack SOFCPower da 1 kW, realizzato con 72 celle (area attiva 50 cm²) e si sono formulate le seguenti ipotesi per il funzionamento sia della singola cella sia dello stack:

- a. la temperatura di funzionamento di ogni singola cella è costante in ogni punto ed è pari alla temperatura alla quale avvengono le reazioni chimiche;
- b. la temperatura dei gas esausti in uscita dalle celle è pari alla temperatura di funzionamento delle stesse;
- c. le uniche reazioni significative sono le reazioni redox e la reazione di shift;
- d. le reazioni di shift e redox avvengono contemporaneamente;
- e. le specie gassose hanno comportamento ideale;
- f. non vi sono scambi termici con l'ambiente esterno;
- g. le perdite dovute alle polarizzazioni di attivazione e di concentrazione (anodica e catodica) sono trascurabili;
- h. sono trascurabili gli effetti della deposizione del carbonio e l'avvelenamento del catalizzatore;
- i. la pila di celle si può schematizzare, nel suo complesso, come un'unica cella che presenta le caratteristiche globali del sistema;

Considerato lo stato dell'arte è stato deciso di studiare un sistema ibrido innovativo con moduli SOFC per una potenza totale di circa 15 kW (stack da 5 kW). È stato progettato Il layout relativo all'impianto e le simulazioni sono state effettuate introducendo i dati relativi ad un singolo stack da 5 kW e a partire, come detto, da alcuni dati forniti da SOFC-Power e dai dati di letteratura. In tal modo è stato realizzato un modello semplificato di stack SOFC

che è poi stato accoppiato con una microturbina a gas in una configurazione di sistema ibrido innovativo.

Nella configurazione adottata in questa prima fase di studio, ogni stack è alimentato da un flusso di gas ricco di idrogeno, prodotto dal reattore di steam methane reforming. Gli ulteriori elementi che compongono l'impianto sono il combustore catalitico, con il quale si riesce ad ottenere combustione la completa combustibile residuo in uscita dallo stack che il riscaldamento dell'aria inviata al catodo dello stack e degli stream che percorrono il circuito, il compressore dell'aria in ingresso, la microturbina - da circa 3 kW di potenza elettrica netta - e vari scambiatori di calore dislocati opportunamente nel layout di impianto (Figura 184).

I risultati della simulazione sono riportati di seguito e mostrano di essere in linea con le previsioni; in particolare, il rapporto tra la potenza elettrica netta generata dalla

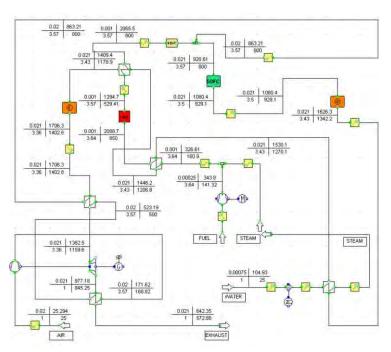


Figura 184. Layout impianto ibrido SOFC/microturbina

microturbina e la potenza elettrica generata dallo stack risulta essere pari a circa 1/3. L'efficienza elettrica dello stack, calcolata e pari al 50% circa, conferma il valore comunicato da SOFCPower mentre l'efficienza della microturbina e l'efficienza elettrica globale risultano pari al 23% e al 73% circa.

Tuttavia, le temperature molto alte del ciclo ideato rendono necessario uno studio più approfondito del layout al fine di migliorare i flussi termici e diminuire le temperature di combustione e di ingresso nella microturbina.

Risultati della simulazione e dell'ottimizzazione del sistema ibrido a carico nominale

Portate nominali in ingresso:

aria: 0,02 kg/s

combustibile: 0,00025 kg/svapore: 0,00075 kg/s

microturbina: 0,021 kg/s

Parametri di calcolo:

Fattore di utilizzazione idrogeno = 60%

Pressione operativa = 3,5 bar

Temperatura di ingresso SOFC = 800°C

Rendimento isoentropico compressore = 0,9 Rendimento isoentropico microturbina = 0,9 Rendimento meccanico compressore = 0,75 Rendimento meccanico microturbina= 0,85

Risultati SOFC nella configurazione ottimizzata

potenza elettrica 6,47 kW temperatura di uscita 929°C efficienza elettrica 50,7%

Risultati Microturbina nella configurazione ottimizzata

potenza elettrica netta 2,85 kW temperatura di ingresso 1000°C efficienza microturbina 24,8 % efficienza globale sistema 6 8,2 %

E.2 <u>Celle a combustibile a carbonati fusi per la cattura di CO₂ da gas combusti</u>

L'attività ha avuto come obiettivo generale quello di individuare le principali problematiche connesse con l'applicazione di una cella a combustibile a carbonati fusi come sistema attivo di cattura dell'anidride carbonica da gas combusti di grandi impianti emissivi e come tali soggetti alle Direttive anti-inquinamento EU-ETS (European Union- Emission Trading Systems) 2003/87/CE e successivamente 2008/101/CE. I settori industriali considerati in questo studio sono quelli degli impianti di potenza (caratterizzati da grandi volumi di emissioni gassose con concentrazioni diluite in CO_2 , < 15%) ovvero dei grandi impianti manifatturieri con produzione di CO_2 da processi di trasformazione (caratterizzati da minor volumi emissivi, emissioni concentrate in CO_2 > 15% e alta presenza di microinquinanti corrosivi).

Un concentratore MCFC (schema concettuale nella Figura 185) è talvolta definito con il termine di sistema attivo di cattura in quanto capace di operare come separatore di CO_2 e contemporaneamente produrre energia elettrica permettendo pertanto di concepire una strategia, unica nel panorama delle tecnologie di cattura, di riduzione delle emissioni attraverso un incremento della potenza elettrica installata.

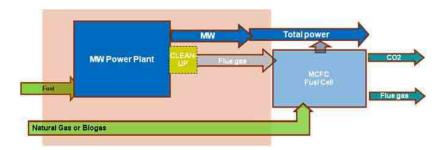


Figura 185. Schema concettuale di MCFC come retrofitting per la concentrazione di CO2 dai fumi di una centrale

Lo studio svolto si è articolato in diverse fasi: nella prima fase sono stati sviluppati ed approfonditi alcuni aspetti chimico-fisici della elettrochimica di cella, di particolare rilevanza ai fini di una corretta progettazione e dimensionamento impiantistico identificando i principali limiti della attuale tecnologia MCFC per la specifica applicazione come concentratore (problemi di fluido-dinamica, capacità di cattura, penalità energetiche, tollerabilità agli inquinanti acidi). In tale contesto, si fa cenno anche ad un uso diverso ed innovativo della tecnologia MCFC con il quale si potrebbe realizzare un sistema ibrido di cattura combinando vantaggiosamente metodologie post-combustione e di produzione di ossigeno, a ridotto consumo energetico.

Nella seconda fase sono stati stimati, anche se in modo approssimativo, i costi della cattura di CO₂ tramite concentratore MCFC, in due diversi scenari di riferimento: da impianto di potenza e da impianto manifatturiero, escludendo dall'analisi i costi aggiuntivi da prevedere per la depurazione dei gas da micro-inquinanti.

Un'altra parte dello studio ha riguardato analisi delle Direttive EU-ETS in materia di obbligo di controllo delle emissioni dai grandi impianti di combustione, dalle quali Direttive non è possibile prescindere per una corretta valutazione delle opportunità di impiego di un concentratore MCFC.

Infine, nell'ultima fase sono stati esaminati diversi scenari di emissioni da impianti produttivi in relazione alle caratteristiche di funzionamento del concentratore MCFC con alcune soluzioni possibili per la depurazione spinta dei gas combusti.

Di seguito si riportano in sintesi punti di forza e debolezza della tecnologia MCFC applicata alla cattura di CO₂.

Punti di forza	Punti deboli
Chimismo del processo Produzione aggiuntiva di elettricità Basso impatto ambientale Tecnologia sviluppata e pronta per la produzione seriale	Costi elevati di investimento (e di cattura) Bassa capacità di cattura Sensibilità alle condizioni operative Bassa tollerabilità ai micro-inquinanti Durata non soddisfacente degli impianti MCFC Riprogettazione impianti per uso specifico come concentratore

I risultati di questo studio sono riassumibili come segue:

- il costo complessivo di un sistema di cattura con concentratore a carbonati fusi in abbinamento ad impianto di potenza soggetto allo schema EU-ETS (potenza calorica > 20 MW_t) dovrebbe attestarsi, ai costi e allo stato
 - di sviluppo attuale, intorno a 85 €/t CO₂, ponendosi nella parte alta della forchetta dei valori ammissibili, secondo le linee-guida internazionali;
- l'alto costo della cattura da impianti di potenza è connesso con gli alti volumi di gas da trattare e la bassa concentrazione di CO₂ nei gas di combustione risultanti in instabilità fluido-dinamiche e perdite sensibili di efficienza elettrica, come facilmente desumibile dal seguente grafico (Figura 186) che pone in relazione voltaggio di cella con la concentrazione di CO₂ presente nel gas di alimentazione;
- la capacità massima di rimozione della CO₂ da un impianto MCFC di 1 MW è stimabile in circa 11000 tonnellate annue, in condizioni di alto rendimento elettrico. Tale valore scende proporzionalmente alla perdita di rendimento elettrico nella cella;

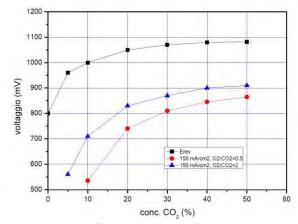


Figura 186. Effetto della CO₂ sulle prestazioni di

micro-inquinanti acidi, eventualmente presenti nei gas combusti, sono estremamente corrosivi per i materiali con cui sono fatte le celle MCFC, per cui devono essere sempre previsti processi di depurazione spinta dei gas con ulteriore aggravio dei costi e delle penalità energetiche. A scopo indicativo, la Tabella seguente riporta, in forma semplificata, i limiti normativi alle emissioni in alcuni grandi impianti di combustione con i limiti di tollerabilità di una cella MCFC, dal che si deduce la criticità del problema della rimozione dei micro-inquinanti dai gas di alimentazione della cella MCFC.

Limiti normativi alle emissioni in atmosfera (ppm)								Limiti di
Inquinante	Impianto di combustione di gas naturale	Impianto a biomassa	Impianto di combustione del carbone	Cementificio	Gas di altoforno	Industria del vetro	Industria della ceramica	tolleranza MCFC (ppm)
Ossidi di zolfo	35	200	400	600	200	500-1500	500-1500	<1
NOx	50-100	400	200	1800-3000	200	110-3000	1500	20-50
HX (X=CI,F)	assenti	10	1	assenti	30	10	35	<1
Particolato	assente	50	50	50	10	80-150	75	<100 (> 3μm)

- il costo complessivo di un sistema di cattura con concentratore a carbonati fusi in abbinamento ad impianto manifatturiero soggetto allo schema EU-ETS (potenza calorica > 50 MWt) e con gas di camino sufficientemente concentrato in CO₂ (CO₂ > 15%) dovrebbe attestarsi intorno a 32 €/t CO₂, ponendosi nella parte bassa della forchetta dei valori ammissibili, secondo le linee-guida internazionali;
- applicazioni interessanti di cattura dei gas combusti nel settore manifatturiero sono da gas di altoforno e soprattutto da gas di cementeria per via del loro alto contenuto in CO₂ e dei bassi volumi emissivi, maggiormente compatibili con le caratteristiche di funzionamento delle celle MCFC;
- in particolare, nei cementifici il processo di rimozione degli ossidi solfo contenuti nei gas di combustione potrebbe sfruttare la disponibilità in abbondanza dei cosiddetti CKD (Clinker Kiln Dust) ovvero scarti della lavorazione del clinker e che sono costituiti da polveri fini di ossidi basici (es., K₂O, CaO) caratterizzati da elevatissime capacità di assorbimento nei confronti di micro-inquinanti acidi, compresi gli ossidi di zolfo;
- da ultimo, si richiama l'attenzione sul fatto che l'elettrolisi della CO₂ in carbonati fusi, se fosse realizzabile su scala industriale, introdurrebbe un concetto nuovo di utilizzo della tecnologia a carbonati fusi per la cattura di CO₂. Elettrolizzatori MCFC potrebbero essere proposti come innovativo sistema ibrido di cattura combinando metodologie di cattura post-combustione e oxy-combustione, a costi prevedibilmente minori rispetto all' uso originariamente proposto delle celle MCFC come concentratori.

F. Supporto a MSE e MATTM per la partecipazione a progetti internazionali e per la definizione di programmi nazionali su idrogeno e celle a combustibile; partecipazione dell'ENEA alle collaborazioni internazionali nel settore

Le attività relative a questo obiettivo comprendono azioni diverse, finalizzate a chiarire le prospettive di sviluppo delle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile, con particolare riferimento alla situazione nazionale, ed a favorire i rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali nel settore. In particolare, nel periodo di riferimento:

- sono state svolte, e pubblicate, analisi dello stato attuale e delle prospettive di sviluppo delle celle a combustibile e dell'idrogeno, a supporto della PA e dei potenziali utenti, ed è stato fornito ad MSE il contributo richiesto per la preparazione del piano di ricerca energetico previsto dall'art. 38 della legge 99/09:
- sono state svolte, in collaborazione con l'Università di Sassari, attività di ricerca esplorative sui materiali da utilizzare come elettrodi in dispositivi per la produzione di idrogeno dall'acqua per via foto elettrochimica, realizzando fotoelettrodi a base di titanio nano strutturato che hanno mostrato prestazioni molto promettenti;
- ENEA ha partecipato, a supporto del MATTM, ai lavori dell'International Partnership for Hydrogen Economy (IPHE) e alle riunioni dell'Implementation and Liaison Committee dello stesso, nell'ambito del quale ricopre l'incarico di Vice-chair per la Strategic Priority 4 "Technology monitoring"; in tale veste, ha elaborato, tra l'altro, schede di analisi delle diverse tecnologie;
- ENEA ha partecipato alla definizione dei programmi europei su celle a combustibile e idrogeno, contribuendo sia ai lavori della associazione delle strutture di ricerca europee del settore (N.ERGHY), costituita per coordinare la partecipazione ai programmi 2007-2013 gestiti dalla partnership pubblico-privata Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, sia a quelli dell'EERA (European Energy Research Alliance);
- ENEA ha partecipato, in rappresentanza dell'Italia, agli Implementing Agreements dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) su Advanced Fuel Cells. Production and Utilization of Hydrogen e Hybrid and Electric Vehicles, coordinando anche i contributi delle altre strutture nazionali interessate; nell'ambito dei diversi Annessi degli Agreements e dei Comitati Esecutivi degli stessi sono state svolte azioni di scambio di informazioni sui programmi dei diversi paesi, analisi congiunte delle tecnologie e delle loro applicazioni,

ricerche di comune interesse su tematiche specifiche. Sono state organizzate in Italia alcune riunioni, sia dei Comitati Esecutivi che di alcuni Annessi.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nei capitoli precedenti si è dato un'ampia descrizione delle attività svolte dai soggetti esterni in quanto i rispettivi contributi erano integrati nell'insieme delle attività di ENEA ed i risultati da essi prodotti sono stati integrati con quelli ENEA In questa sezione verranno specificate le attività affidate ai soggetti e se ne evidenzierà in modo molto sintetico lo specifico contributo.

FN S.p.A.

Le attività svolte hanno riguardato:

- la messa a punto del processo di formatura in plastico per la realizzazione di matrici per MCFC di dimensioni fino al 1 m² e loro caratterizzazione, anche attraverso prove in cella. Le azioni principali messe in atto sono state indirizzate alla realizzazione di lotti di compound atti all'alimentazione dell'impianto, alla messa a punto dei parametri del processo di formatura, alla realizzazione di matrici di dimensioni fino al m² e caratterizzazione delle stesse, anche attraverso prove in monocella (effettuate in collaborazione con ENEA) e in piccoli stack, alle valutazioni tecnico-economiche, con verifica dei vantaggi del processo rispetto alla colatura su nastro attualmente impiegata,
- lo studio del processo di formatura in plastico applicato alla realizzazione degli elettrodi (anodi e catodi), con valutazione delle criticità dello stesso. In tale ambito sono stati valutati i più recenti sviluppi delle tecnologie utilizzabili per la formatura del granulato termoplastico (estrusione di polveri metalliche miscelate con additivi polimerici) e per la formatura del prodotto finale (estrusione in lastre o stampaggio a iniezione), sono state evidenziate le maggiori le criticità del processo, anche in relazione ad eventuali modifiche e integrazioni delle attrezzature disponibili e sono state definite le caratteristiche dei tecnopolimeri da utilizzare, sia in relazione alla loro funzione nella fase di formatura, che alla facilità di eliminazione degli stessi nelle fasi successive. In particolare è stata definita la metodologia di preparazione del compound plastometallico di cui sono stati prodotti quantitativi sufficienti per la sperimentazione in scala laboratorio, sono stati progettati e realizzati stampi ad hoc per produrre campioni "verdi" per la messa a punto dei trattamenti termici di deceratura e sinterizzazione. Sui campioni così prodotti sono state effettuate caratterizzazioni chimico-fisico-strutturali-dimensionali al fine di valutarne le caratteristiche funzionali e confrontarli con quelli preparati per colatura.

Università di Genova, Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale

Proseguendo le attività del primo anno dell'AdP, il lavoro svolto dall'Università di Genova ha riguardato la messa a punto di un metodo di sintesi che permettesse di ottenere γ -LiAlO $_2$ con caratteristiche analoghe a quelle del prodotto commerciale LSA. Parallelamente è stata messa a punto la sintesi della forma allotropica α -LiAlO $_2$, per l'ottenimento di matrici composte esclusivamente da questo precursore. Le sintesi e le caratterizzazioni sono state effettuate in collaborazione con FN.

Politecnico di Torino, Sede di Alessandria (CESAL)

Il CESAL ha collaborato con FN per le attività afferenti sia all'obiettivo A che all'obiettivo B, quindi sia nell'attività di caratterizzazione funzionale dei componenti ottenuti mediante formatura in plastico che nella standardiz-zazione delle condizioni di prova per la loro qualifica in stack.

Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica

La ricerca condotta dal gruppo di lavoro del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino (DENER), in collaborazione con FN S.p.A., ha riguardato l'analisi delle condizioni di funzionamento di uno stack costituito da 15 celle circolari e l'elaborazione di soluzioni progettuali di miglioramento delle prestazioni, sia in termini di efficienza del dispositivo sia di durata attesa. Tale attività costituisce la continuazione di quella svolta durante il primo anno e che ha avuto per oggetto principale la modellazione di una cella, sia vista come entità autonoma sia inserita all'interno di uno stack.

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Le attività svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università di Roma, hanno riguardato l'ottimizzazione del processo di produzione combinata di bio-idrogeno e bio-metano da substrati

organici biodegradabili residuali, ciò al fine di consentirne una appropriata integrazione con il processo di cogenerazione con celle a combustibile a carbonati fusi.

Sulla scorta delle precedenti attività di ricerca già condotte da ENEA e dal DICEA nell'ambito di questo tema di ricerca, sono stati utilizzati ai fini della sperimentazione, fanghi di depurazione delle acque reflue civili e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Obiettivo specifico delle attività è stato quello di individuare in modo chiaro le modalità con cui possono essere incrementate le rese di conversione in bio-idrogeno e metano a partire da substrati organici complessi e le strategie progettuali e gestionali attraverso le quali si può riuscire a garantire una produzione costante nel tempo, ciò al fine di impiegare, nel trasferimento in piena scala del processo, i gas prodotti per via biologica nelle celle a combustibile.

Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

L'Università di Perugia, di concerto con l'ENEA, ha eseguito test su monocelle a carbonati fusi fornite da Ansaldo Fuel Cells per prove di avvelenamento con zolfo.

In una prima fase è stato necessario apportare una serie di modifiche alla postazione test per renderla idonea all'alimentazione con gas contenenti H_2S ed è stato necessario completarla con gascromatografo e sistema di controllo portate gas per poter simulare diverse composizioni anodiche e poter misurare la loro composizione sia in ingresso che in uscita.

Sulla monocella sono state effettuate una serie di misure "standard" sia per validare l'apparato sperimentale (riproducibilità dei risultati) sia per avere dei dati di riferimento da poter confrontare con i dati sperimentali prodotti. Sono state simulate diverse composizioni gassose con differenti contenuti di zolfo ed in differenti condizioni di esercizio, gas anodici, gas catodici, durata della prova, durata del periodo di avvelenamento e procedura di recupero, così come concordato con ENEA.

Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Applicata e Condizionamento Ambientale (DETEC)

L'attività svolta era finalizzata allo sviluppo di metodologie e strumenti che consentissero di analizzare a fondo le potenzialità delle MCFC (prestazioni, efficienza, impatto ambientale, costi di investimento, di gestione ed i manutenzione) nel loro impiego nelle diverse catene energetiche basate su rifiuti, residui e biomasse.

Nel corso del primo anno l'attività svolta dal DETEC ha riguardato lo studio approfondito delle diverse tipologie di catene energetiche basate su biomasse e rifiuti ad elevato contenuto organico e quindi idonee al trattamento di digestione anaerobica. A valle di tale studio è stato sviluppato un modello di calcolo denominato A.I.D.A. (Analisi di impianti di digestione anaerobica) in grado di effettuare l'analisi energetica della catena "Waste to Energy" partendo da biomasse ad elevato contenuto organico e quindi idonee al processo di digestione anaerobica. Nel corso anno secondo anno si è proceduto l'aggiornamento e il miglioramento del modello.

Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Chimica

Le attività hanno riguardato la messa a punto di tecniche e metodologie sperimentali da impiegare per la caratterizzazione di proprietà adsorbenti di materiali di impiego in processi di clean-up di correnti di alimentazione di celle a combustibile a carbonati fusi.

Università di Fisciano (SA), Dipartimento di Chimica ed Alimentare

Lo scopo dell'attività affidata all'Università di Fisciano era quello di realizzare uno studio sperimentale dei processi per l'abbattimento di H₂S contenuto nel biogas proveniente dalla digestione anaerobica di reflui zootecnici per il suo invio a MCFC.

Università "Tor Vergata" di Roma, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche

L'attività svolta ha riguardato la selezione di processi di deposizione di starti protettivi su anodi per celle a combustibile a carbonati fusi forniti da ENEA al fine di aumentarne la resistenza agli inquinanti (resistenza all'avvelenamento da H₂S) e/ di renderli più facilmente rigenerabili dell'anodo tradizionale.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ing. Chimica "G. Natta.

Le attività sono state focalizzate sull'individuazione e fornitura di catalizzatori da poter impiegare da impiegare con celle a combustibile a carbonati fusi alimentati da biogas. Il catalizzatore fornito sarà inserito in un mini reformer per mettere a punto lo steam reforming del metano proveniente da biogas opportunamente depurato.

Università de L'Aquila

Le attività dell'Università de L'Aquila hanno riguardato lo sviluppo di un modello del reattore di gassificazione a letto fluido internamente ricircolante, per ottimizzare l'accoppiamento con una cella a combustibile e la messa a punto di in sistema di opportuni sistemi di "gas-cleaning" per l'abbattimento del H₂S (COS, etc.), insieme con quello di polveri, tar, e HCl.

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Meccanica e Aereonautica.

L'obiettivo della ricerca era lo sviluppo di un modello di calcolo per lo studio di sistemi ibridi basati sull'accoppiamento di turbine con celle a combustibile ad ossidi solidi.

A tale scopo è stato condotto uno studio sullo stato dell'arte sia sui sistemi ad ossidi solidi in configurazione normale sia su quelli in configurazione cosiddetta ibrida cioè in accoppiamento con le turbine. È stato altresì svolta una ricerca di mercato per individuare possibili potenziali fornitori di microturbine nel campo da 1 kW a qualche kW allo scopo di individuare i parametri e le curve caratteristiche di tali turbine in modo tale da poterle inserire nei codici di calcolo in maniera corretta.

Sulla base delle informazioni raccolte è stato sviluppato un modello numerico di simulazione che è stato poi collaudato e validato con dati di letteratura. Con tale codice si è poi proceduto all'individuazione delle possibili configurazioni ottimali per sistemi SOFC nell'ambito di qualche decina di kW.

Università di Sassari, Dipartimento di Chimica.

L'obiettivo della collaborazione era uno studio riguardante la trasformazione di energia solare in energia chimica attraverso la produzione di idrogeno mediante processi fotocatalitici in soluzioni acquose. È stato affrontato lo studio di materiali semiconduttori con proprietà fotoelettro-catalitiche. In particolare è stata posta l'attenzione su diversi aspetti quali la messa a punto di nuove procedure sintetiche, la caratterizzazione dei sistemi colloidali, le problematiche inerenti la realizzazione degli elettrodi, l'efficienza fotoelettrochimica dei sistemi così realizzati.

Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione

Il presente tema di ricerca è finalizzato alla messa a punto di una serie di dati e strumenti, quali linee guida, benchmarking di consumo energetico per determinate categorie del non residenziale, modelli di progettazione e programmi di calcolo, per la determinazione e l'ottimizzazione dei consumi energetici degli edifici con particolare riferimento al condizionamento estivo e all'interazione con l'illuminazione, al fine di facilitare il recepimento della direttiva 91/2002 CE, che prevede, tra l'altro, l'adozione di norme specifiche per il contenimento dei consumi energetici estivi, La domanda per il condizionamento va trattata analogamente a quanto previsto per il riscaldamento invernale (DLgs 192/05 e 311/06): la recente emanazione delle normative UNI TS 11300 parte I e II rende disponibile una metodologia di calcolo semistazionaria per il calcolo dei carichi termici estivi, basata su fattori di utilizzo, Tale metodologia è utile per la verifica di prestazioni (invernali ed estive) di edifici "normali", ma la progettazione di edifici di volumi superiori a 10000 m³, che facciano uso di sistemi di climatizzazione che sfruttano fenomeni dinamici, richiede l'impiego di modelli dinamici,

In particolare poiché negli edifici non residenziali il consumo per illuminazione artificiale rappresenta il 25% dei consumi elettrici, e poiché l'impiego di sistemi di illuminazione artificiale poco efficienti ha un considerevole impatto sui consumi per condizionamento estivo, è necessario mettere a punto strumenti che consentano una corretta progettazione dei sistemi di illuminazione naturale (e dei sistemi schermanti) e artificiali ad alta efficienza,

Attualmente in Italia non esiste una normativa definita che consenta il calcolo del fabbisogno energetico per il condizionamento degli edifici, Come già detto la direttiva UE 91/2002 richiede che si mettano a punto strumenti per la verifica del rendimento energetico degli edifici non solo per quanto riguarda i sistemi di riscaldamento, ma anche i sistemi di condizionamento, Il decreto 311/06 prevede l'obbligo di schermatura esterna per tutti gli edifici nuovi e per quelli da ristrutturare fino a i 1000 m² e per le ristrutturazioni, tuttavia mancano delle linee guida su come utilizzare detti schermi e sull'influenza che questi hanno sulla illuminazione naturale degli edifici,

Le metodologie di calcolo adottate al momento, consentono il dimensionamento degli impianti di climatizzazione, ma sono piuttosto approssimate per il calcolo dei consumi stagionali, Il dimensionamento viene di norma eseguito con un calcolo in stazionario, atto alla determinazione della punta di possibile richiesta (basata su dati climatici di progetto), Una determinazione dei consumi più accurata può essere fatta, attualmente, solo con l'utilizzo di codici di simulazione dinamica il cui impiego non è facilmente accessibile alla gran parte dei progettisti,

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Obiettivo finale dell'attività è mettere a disposizione del legislatore gli strumenti tecnici (parametri climatici, metodologie di calcolo, tool informatici, parametri caratteristici sui e linee guida per la progettazione di impianti a bassi consumi energetici, dell'involucro trasparente e per gli elementi schermanti) atti a rendere possibile un recepimento molto ampio della direttiva 91/2002 per quanto riguarda il contenimento dei consumi energetici per condizionamento estivo degli edifici ed il DLgs 115/08 per l'efficienza energetica nel settore dei servizi energia,

L'attività comprende le seguenti fasi:

- determinazione dei parametri climatici di riferimento su cui basare la normativa;
- sviluppo di una metodologia ed un procedimento di calcolo per l'Indice di Severità del Clima:
- definizione dei benchmark dei consumi energetici degli edifici per tipologia, destinazione d'uso e fascia climatica;
- definizione delle curve di carico termico ed elettrico tipiche per tipologia, destinazione d'uso e fascia climatica;
- sviluppo di linee guida per la progettazione di sistemi a basso consumo di energia nobile da adottare specie per quegli edifici critici dal punto di vista del carico termico estivo;
- proposta di provvedimenti di incentivazione di queste tecnologie;

 sviluppo di linee guida e sistemi di classificazione semplificata dei sistemi di illuminazione avanzati e componenti (semi)trasparenti di involucro che guidino il progettista ed il gestore dell'edificio nella scelta dei materiali, delle tecnologie e delle soluzioni più idonee.

Il programma di attività si articola in cinque obiettivi intermedi,

A. Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva

Sulla base della metodologia sviluppata nel corso del primo anno, e già applicata alla regione Lombardia, viene estesa a tutto il territorio nazionale l'elaborazione delle nuove serie di dati climatici contenute nella norma UNI 10349,

A partire dalla metodologia di calcolo dell'Indice di Severità del Clima, messa a punto nella precedente annualità viene realizzata una campagna di indagine al fine di calcolare l'Indice su tutto il territorio nazionale, Tale attività consentirà la realizzazione di una zonizzazione ai fini della determinazione dei limiti di consumo ammissibili per la climatizzazione estiva, risultando pertanto fondamentale per la corretta applicazione delle norme UNI TS 11300,

B. Modelli (Programmi, Tool, software) di calcolo

L'obiettivo prevede la verifica della applicabilità della UNI TS 11300 all'impiego per la certificazione di edifici complessi (quelli che necessitano di simulazioni dinamiche) secondo quanto previsto dal DM Linee Guida Nazionali di prossima emanazione.

Realizzazione di un tool di certificazione basato sull'impiego delle UNI TS 11300, corredato di interfaccia per l'impiego su larga scala, Upgrade del codice di calcolo DOCET finalizzato al calcolo dell'indice di prestazione energetica in conformità con le norme UNI TS 11300 - parti 1, 2 e 3 (attualmente in inchiesta pubblica) ed eventualmente alla parte 4 se si dovesse rendere disponibile in tempo utile, e alla definizione degli schemi di certificazione energetica su scala nazionale e locale,

C. Edifici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio, Applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani

Viene proseguita l'attività impostata nel corso del primo anno e che ha prodotto un set di edifici tipo ad uso ufficio, L'indagine viene allargata alle tipologie: Commerciale, Alberghiero, Scolastico, Ospedaliero, Per quanto riguarda l'edilizia scolastica è prevista una collaborazione con il Ministero dell'Istruzione per la realizzazione di un osservatorio sull'edilizia scolastica,

L'attività di calcolo dei benchmark viene svolta mediante campagne di monitoraggio, e attraverso campagne di simulazione dinamica condotte sugli edifici tipo identificati nel corso del primo anno e all'inizio del secondo anno di attività. Il singolo edificio viene sottoposto ad una attività di monitoraggio in modo da ottimizzare i sistemi disponibili e monitorare un numero sufficiente di edifici nei mesi di interesse per le stagione invernale ed estiva,

Viene infine realizzato uno studio con la definizione di indici di applicabilità e di potenzialità (risparmi ottenibili rispetto a componenti convenzionali, frazione solare etc,) di componenti di impianto innovative,

L'attività risponde alle disposizioni introdotte con il Dlgs 115/08 in materia di monitoraggio dei consumi degli edifici,

D. Caratterizzazione dei componenti di involucro per il controllo solare e l'illuminazione naturale degli edifici,

Viene proseguita l'attività sperimentale e di calcolo atta a caratterizzare i materiali semitrasparenti di facciata, per un' ccurata valutazione delle prestazioni energetiche ed illuminotecniche degli edifici, L'attività viene ampliata includendo 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,

E. Partecipazione all'Implementing Agreement Energy Conservation in Building and Community Systems della

La partecipazione ai gruppi di lavoro (Annex) dell'Implementing Agreement Energy Conservation in Building and Community Systems della Agenzia Internazionale dell'Energia consente di essere inseriti in attività di ricerca sviluppate ai massimi livelli internazionali, I gruppi di lavoro dell'ECBCS sviluppano i temi definiti nei vari annex, dopo un severo controllo delle finalità, degli obiettivi e dei deliverables da produrre, attuato dai membri del comitato esecutivo, I prodotti dei vari annex sono in genere linee guida e/o tools informatici per la progettazione,

database di sistemi e componenti etc, La partecipazione a questi gruppi di lavoro consente di indirizzare lo sviluppo di detti strumenti alle effettive necessità della realtà tecnologica ed economica italiana, oltre a facilitare un efficace raccordo con i massimi esperti nel campo dell'efficienza energetica negli edifici a livello internazionale, ENEA rappresenta l'Italia nell'Implementing Agreement su mandato del MSE dal 1992, è membro del comitato esecutivo e coordina la partecipazione di Università ed enti di ricerca italiani ai seguenti Annex, ai quali spesso partecipa direttamente:

- Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings (Politecnico di Torino)
- Annex 45 Energy efficient Future Electric Lighting for Buildings (ENEA, Università di Roma La Sapienza)
- Annex 46 Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings -EnERGo (Politecnico di Milano)
- Annex 48 Heat Pumping and Reversible Air Conditioning (Politecnico di Torino)
- Annex 49 Low Exergy sustainable buildings (Politecnico di Milano, Università Di padona, Università di Venezia IUAV)
- Annex 52 Net Zero Energy Buildings (ENEA, Università di Padova)
- Annex 53 Benchmark (Politecnico di Torino, Università di Roma La Sapienza, Politecnico di Milano).

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva

Questa attività ha consentito la creazione dell'anno caratteristico per le province italiane delle regioni del centro nord (Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Lombardia, Piemonte, Toscana, Trentino Alto Adige, Valle D'Aosta, Veneto). Le stazioni selezionate sono 57 ubicate in prossimità dei rispettivi capoluoghi di provincia e sono rappresentative delle caratteristiche climatiche di questi.

La normativa europea in cui è descritto il procedimento per la costruzione dell'anno caratteristico è la EN ISO 15927-4. I dati utilizzati nel calcolo, in accordo con la normativa, sono stati misurati secondo i metodi specificati nella "WMO Guide No. 8". Il lavoro svolto ha dimostrato la concreta fattibilità di disporre di anni climatici tipo per tutte le province e per l'intero territorio nazionale. È quindi possibile preparare un atlante dei dati climatici che diverrebbe sicuramente un riferimento di notevole importanza per ricercatori, progettisti e decisori pubblici.

E' proseguita l'attività per la definizione dell'indice di severità climatica per la stagione estiva. E' stata sviluppata da ENEA la metodologia, per la definizione di tale indice, e svolte delle analisi, tramite simulazioni con codici di calcolo dinamici, per una prima verifica applicativa e proposta di classificazione del territorio nazionale utile per la certificazione energetica degli edifici.

L'attività per l'aggiornamento dei dati climatici è stata svolta dal Comitato Termotecnico Italiano, quella sull'indice di severità climatica dall'ENEA.

A.1 Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane

Negli ultimi decenni, il miglioramento dello stile di vita della società ha determinato un aumento del tempo trascorso all'interno di spazi confinati. Questo rende necessario, da un lato un livello più alto di comfort globale in ambienti interni, e, dall'altra, richiede valutazioni più dettagliate dell'efficienza dei requisiti energetici degli edifici, i quali, certamente, influenzano in modo rilevante le condizioni di benessere degli occupanti.

Così come enunciato nella Direttiva Europea 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia, l'energia impiegata nel settore residenziale e terziario composto per la maggior parte da edifici, rappresenta oltre il 40% del consumo finale d'energia della comunità. Essendo questo un settore in espansione, i suoi consumi di energia e quindi le sue emissioni di biossido di carbonio sono destinate ad aumentare.

Ai sensi della direttiva 89/106/CEE del Consiglio Europeo (21 dicembre 1988), l'edificio ed i relativi impianti di riscaldamento, condizionamento ed aereazione devono essere progettati e realizzati in modo da richiedere, in esercizio, un basso consumo d'energia, tenuto conto delle condizioni climatiche del luogo e nel rispetto del benessere degli occupanti.

Le misure per l'ulteriore miglioramento del rendimento energetico degli edifici dovrebbero considerare le condizioni climatiche locali, nonché dell'ambiente termico interno e dell'efficacia sotto il profilo del costi. Ciò rende indispensabile un calcolo più dettagliato del comportamento energetico e termico degli edifici, un'accurata

previsione delle prestazioni a lungo termine degli edifici per quanto riguarda tutti i sistemi, quali quelli di produzione di energia elettrica da pannelli solari fotovoltaici, energia termica da pannelli solari termici, riscaldamento e raffreddamento attivo e passivo.

Questo tipo di previsione dipende fortemente dalle caratteristiche climatiche a lungo termine. È quindi necessaria la disponibilità di strumenti per valutare e simulare il comportamento termico degli edifici. Durante gli ultimi anni c'è stato lo sviluppo e la rapida diffusione sul mercato di pacchetti software in grado di simulare le prestazioni termiche degli edifici. Questi strumenti di simulazione necessitano di una raccolta completa di dati relativi a radiazione solare, temperatura dell'aria, velocità del vento, etc. ossia di quei dati meteorologici che influenzano direttamente il comportamento energetico degli edifici. Spesso l'accesso ai dati meteorologici risulta difficoltoso, infatti non sempre questi sono disponibili.

Nel presente studio, le stazioni selezionate sono 57 ubicate in prossimità dei rispettivi capoluoghi di provincia e sono rappresentative delle caratteristiche climatiche di questi. È stata sempre operata una procedura di validazione dei dati.

La quantità di dati grezzi disponibili per la costruzione degli anno tipo varia da provincia a provincia poiché non è stato sempre possibile avere a disposizione serie storiche lunghe almeno 10 anni.

Nel rapporto completo, disponibile nella sezione Ricerca di Sistema Elettrico presente sul sito ENEA, sono presenti le tabelle, per ogni regione oggetto di studio, con i dai riferiti alle coordinate geografiche di tutte le stazioni, il numero di anni utilizzati per l'elaborazione dell'anno tipo, il numero e la percentuale di validità dei dati orari per i tre parametri principali (temperatura, radiazione solare e umidità relativa) e del parametro secondario velocità del vento. Nel capitolo "Risultati di dettaglio" vi è la raccolta degli anni tipo per provincia realizzati con l'applicazione della procedura adottata.

Lo studio si propone quindi di avviare il processo di aggiornamento di tali dati, assicurando, nel contempo, il collegamento con i gruppi di lavoro CEN (Comitato Europeo di Normazione) preposti.

In sintesi i temi affrontati sono legati all'applicazione di una metodologia per l'elaborazione dei dati climatici. Lo scopo finale è quindi fornire dei dati d'ingresso per:

- 1. la progettazione degli impianti per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici. Nello specifico, il lavoro svolto fornisce una linea guida per determinare alcuni dei dati necessari per il calcolo del fabbisogno di energia, per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici secondo quanto previsto dalle norme UNITS 11300 parte 1,2 e 3;
- 2. la verifica termoigrometrica secondo la UNI EN ISO 13788:2003;
- 3. il calcolo del carico termico invernale di progetto secondo UNI EN 12831:2006;
- 4. il calcolo del carico termico estivo di progetto secondo UNI EN 15255:2008
- 5. il calcolo della temperatura interna estiva in assenza di impianto di climatizzazione secondo le UNI EN ISO 13791:2004, UNI EN ISO 13792:2005 e UNI 10375.

L'obiettivo principale dello studio è la costruzione "dell'anno tipo" e l'aggiornamento della norma UNI 10349 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici". Tutto ciò, al fine di fornire elementi utili anche per la definizione di zone climatiche estive nel territorio, tenendo conto di quanto prescritto dalla normativa in merito alla determinazione dei dati climatici sulla base di dati meteorologici EN ISO 15927–4 "Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling".

E' stato fatto un confronto tra i gradi giorno calcolati partendo dai dati dell'anno caratteristico e quelli riportati nel DPR 412/1993. Il procedimento di elaborazione dell'anno tipo è basato sulla norma EN ISO 15927- 4, che riporta un metodo per selezionare i valori orari dell'anno tipo dai dati meteorologici. Scopo finale è stato quello di valutare il fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici.

È importante disporre di serie annuali di dati meteorologici, rappresentative dei valori medi, che consentano di fissare le condizioni al contorno. È altrettanto consigliabile disporre di raccolte di dati annuali da utilizzare nello studio del comportamento medio a lungo termine degli edifici. Il comportamento di un edificio non dipende soltanto dai valori medi dei parametri meteorologici, ma considera anche la distribuzione di frequenza di ogni parametro e la correlazione tra i parametri stessi. Per questo motivo, nella selezione di un anno caratteristico, è bene utilizzare lunghi periodi di dati (almeno 10 anni, ma preferibilmente di più) e scegliere i dati che più si avvicinano alla distribuzione di frequenza del lungo periodo.

Intervalli prolungati (di parecchi mesi) con temperature estremamente fredde o calde, non vengono considerati nella costruzione dell'anno tipo.

I dati climatici contenuti nell' "anno tipo" trovano molteplici applicazioni come:

- il calcolo per le certificazioni di consumo energetico e di prestazione energetica in accordo con le direttive sulle prestazioni energetiche degli edifici;
- il calcolo dell'energia media consumata e delle emissioni medie di anidride carbonica;
- la progettazione di sistemi ad energia solare;
- il calcolo del numero di gradi giorno di riscaldamento secondo il metodo indicato nella norma EN ISO 15927-6.

Nello studio vengono definiti ed illustrati i principi per la costruzione dell'anno tipo e la procedura seguita per la validazione dei dati (rif. WMO Guide N.8). L'anno tipo consiste in 12 mesi caratteristici scelti da un database di dati meteorologici di un periodo di almeno 10 anni. I mesi sono stati scelti da anni diversi del periodo di cui si dispongono i dati meteorologici e poi uniti insieme per formare l'anno tipo (correggendo i punti di transizione tra un mese e l'altro).

L'anno caratteristico deve rappresentare i valori medi dei più importanti parametri climatici. La maggior parte del lavoro, nel costruire un anno caratteristico, consiste quindi nel manipolare una grandissima quantità di dati che devono essere verificati: è necessario individuare valori non realistici e valori mancanti. Questi ultimi dati dovrebbero essere generati con interpolazione lineare o stimati, mentre improvvise ed innaturali discordanze tra dati, o valori singolari ed insoliti, devono essere esaminati e corretti.

La norma 15927-4 non determina chiaramente un valore massimo accettabile di dati mancanti in un mese né un metodo preciso di interpolazione. Nell'eventualità in cui i dati mancanti siano troppi, è opportuno escludere quel particolare mese dall'elaborazione.

Nello studio, il calcolo per la definizione dell'anno meteorologico caratteristico è stato eseguito secondo l'algoritmo contenuto nella norma UNI EN ISO 15927-4. Questa norma specifica un metodo per ricavare i valori orari dell'anno tipo dei dati meteorologici necessari per valutare il fabbisogno medio annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, costruendo un anno meteorologico di riferimento da una serie storica lunga sufficentemente lunga.

dati meteorologici in questione sono elaborati in maniera diversa dalla semplice statistica descrittiva, operata a fini puramente meteorologici e lo scopo è la definizione di una serie di record completi; pertanto occorre porre particolare attenzione al controllo della qualità e alla validità dei dati. In merito a questo è necessario sottolineare che la presenza di lacune temporali va gestita interpolando i valori dove il lasso di tempo scoperto è di poche ore o scartando i periodi più lunghi ai fini dell'elaborazione.

L'anno di riferimento deve contenere un numero di record pari alle ore di un anno (8760) per i seguenti parametri:

- temperatura dell'aria [°C]
- radiazione solare [W/m²]
- umidità relativa [%]
- velocità del vento [m/s].

I primi tre sono considerati parametri chiave per il calcolo dell'energia necessaria al riscaldamento ed al condizionamento degli edifici; il vento è utilizzato come parametro secondario.

La procedura di ricostruzione dell'anno meteorologico di riferimento prevede la selezione di dati orari relativi a mesi estratti da un record pluriennale e la loro unione con una procedura di "smoothing".

La procedura seguita è realizzata in due fasi:

- la selezione del mese che meno si scosta dai corrispondenti, su tutta la serie storica;
- I'adattamento di inizio e fine mese al fine di ottenere una transizione graduale tra un mese ed il successivo.

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto completo in cui sono illustrati i parametri presi in considerazione per la definizione dell'anno di riferimento e sono riportate schede e dati relativi alle singole regioni.

In sintesi il presente studio riporta i risultati degli anni tipo climatici delle province delle seguenti regioni italiane: Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Lombardia, Piemonte, Toscana, Trentino Alto Adige, Valle D'Aosta e Veneto. Sono state selezionate 57 stazioni metereologiche ubicate in prossimità dei rispettivi capoluoghi di provincia, rappresentative delle caratteristiche climatiche di questi. Sono inoltre incluse le province della regione Lombardia, aggiornate rispetto alla ricerca eseguita nel corso della precedente annualità.

In tutti i casi è stata operata una procedura di validazione dei dati grezzi acquisiti dalle stazioni per un sistematico controllo di qualità. I criteri utilizzati per la validazione dei dati sono basati su analisi statistiche relative alla

congruenza temporale e spaziale del dato nell'insieme dei valori misurati. Queste analisi hanno, a volte, evidenziato errori di una certa entità consentendo di individuare possibili divergenze rispetto all'atteso. Perciò hanno necessitato di ulteriori verifiche per decidere la bontà o meno del dato stesso.

Di seguito, si riporta, una tabella riassuntiva che mostra la distribuzione di frequenza relativa dei dati orari validi, per i parametri d'interesse, concernente le 57 stazioni meteorologiche utilizzate nello studio. Dall'analisi si evince che la maggior parte di dati orari sono di buona qualità, in particolare il 49,12% di dati riguardanti il parametro temperatura si colloca nell'intervallo 95,1-100 % di dati orari validi. Il parametro più sensibile è invece la radiazione solare.

Tabella 31. Distribuzione delle frequenze relative, per classe di validità, dei dati orari, per i parametri di temperatura, radiazione solare, umidità relativa e velocità del vento

Classi di dati validi	Temperatura	Radiazione solare	Umidità relativa	Velocità del vento
40,1% -45%	0.00%	1.75%	0.00%	0.00%
45,1% - 50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50,1% - 55%	0.00%	1.75%	0.00%	0.00%
55,1% - 60%	0.00%	1.75%	0.00%	1.75%
61,1% - 65%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
65,1% - 70%	0.00%	0.00%	1,75%	0.00%
70,1% - 75%	0.00%	3.51%	1,75%	0.00%
75,1% - 80%	5.26%	3.51%	3.51%	1.75%
80,1% - 85%	1.75%	3.51%	3.51%	7.02%
85,1%-90%	19.30%	22.81%	17.54%	26,32%
90,1%-95%	24.56%	24.56%	24.56%	21,05%
95,1%-100%	49.12%	36.84%	47.37%	42.11%
Totale	100.00%	100.00%	100,00%	100,00%

La quantità di dati orari grezzi disponibili, per la costruzione degli anno tipo, varia da provincia a provincia, non è stato sempre possibile avere a disposizione serie storiche lunghe almeno 10 anni. Molte regioni hanno iniziato a monitorare gli attributi climatici dei loro territori in anni recenti. Attualmente, tutte le regioni hanno provveduto a dotarsi di strumentazioni idonee per poter osservare le caratteristiche climatiche dei loro territori.

La quantità di dati non validi varia da provincia a provincia, a tal proposito sono state predisposte, per ogni regione, delle tabelle che contengono queste informazioni.

Lo studio svolto dal CTI mira a colmare alcune delle lacune esistenti nella normativa tecnica e nei documenti tecnici pre-normativi per quanto concerne i dati riguardanti il comportamento termico degli edifici, con particolare attenzione al periodo estivo, nelle varie zone del territorio nazionale e per le varie destinazioni d'uso nei comparti terziario ed abitativo.

La carenza maggiore attualmente è costituita dall'assenza di dati climatici aggiornati di riferimento per i calcoli, in quanto, a livello nazionale, nessuno fornisce tali informazioni.

La disponibilità dei dati orari contenuti nell'anno caratteristico darà la possibilità a progettisti ed operatori di simulare il comportamento del sistema edificio – impianto in regime dinamico. Si potrà, ad esempio, evidenziare il contenimento dei consumi ottenibile, sia in inverno che in estate, in relazione a diverse strutture murarie, tenendo conto nel calcolo anche del comportamento dinamico dell'involucro e del ruolo dell'inerzia termica.

La predisposizione dell'anno caratteristico ha reso anche possibile il calcolo dei gradi giorno. Il confronto dei gradi giorno, tra quelli calcolati nel presente studio, e quelli riportati nel DPR 26 agosto 1993, n. 412 (G. U. n.96 del 14/10/1993) ha mostrato delle disuguaglianze.

Tale decreto per definire le zone climatiche ha introdotto un'unità di misura fittizia, il "grado-giorno"; per grado-giorno di una località intende la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura degli ambienti interni (convenzionalmente fissata a 20 °C) e la temperatura media esterna giornaliera.

Non è direttamente possibile effettuare il confronto del dato grado giorno calcolato da una serie di un anno caratteristico con quella riportata nel DPR 412/1993 a causa dell'utilizzo di approcci differenti, per i seguenti motivi:

 il dato grado giorno del DPR 412/1993 deriva dall'elaborazione di un "anno medio", che è diverso da un "anno rappresentativo", perché, in breve, tende a smussare i picchi di transizione tra un mese e l'altro ed è

pertanto normale che il valore di grado giorno di un anno medio sia inferiore a quello di un anno caratteristico;

- l'anno caratteristico è costruito esaminando l'insieme di 4 parametri, il DPR 412/1993 ne considera solamente uno, la temperatura. Nella costruzione dell'anno caratteristico non è detto che questa sia sempre il parametro guida;
- il dato grado giorno nel DPR 412/1993 è riferito alla "generica città", non è caratteristico del territorio provinciale come invece vuole essere la finalità dell'anno caratteristico. Su quest'ultimo sarebbe possibile applicare dei fattori correttivi per riportare il dato ad ogni comune della provincia, ma per fare questo è necessario avere prima tutta la copertura del territorio, in maniera da poter applicare lo stesso algoritmo, tarato in maniera omogenea ovunque, su ogni comune.

Concludendo, per ora, non è possibile effettuare un confronto diretto tra i valori riportati nel presente studio e quelli del DPR 412/1993; tali valori possono essere per ora, utilizzati solo a scopo informativo. Per un calcolo perfezionato dei gradi giorno è indispensabile aver la copertura totale di tutto il territorio nazionale.

A.2 <u>Prima applicazione dell'indice di severità climatica "All Weather" per la definizione delle zone climatiche per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione estiva degli edifici</u>

Il recepimento in Italia della Direttiva Europea 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia, attraverso l'emanazione del Dlgs.192/05 e del successivo Dlgs.311/06, prevede la certificazione energetica in edilizia. La certificazione si traduce, tra l'altro, nella valutazione di un parametro, il fabbisogno di energia primaria specifico della costruzione, e nella successiva assegnazione, in funzione del valore di tale parametro, della costruzione a una classe di efficienza energetica. Al momento sono stati fissati i limiti al fabbisogno solo per quanto riguarda la climatizzazione invernale.

Il territorio nazionale è stato suddiviso, infatti, in zone climatiche invernali in conformità ad un indice di severità climatica definito dai gradi-giorno invernali e sono stati individuati i valori limite del fabbisogno energetico su tale base. La diffusione dei sistemi di condizionamento estivi, con il conseguente aumento dei consumi energetici, rende necessario procedere, anche in tal caso, alla definizione di zone climatiche estive contraddistinte da un indice di severità climatica estivo. La definizione di questo indice estivo presenta maggiori difficoltà rispetto al corrispondente indice invernale giacché le variabili climatiche di cui tenere conto sono più numerose e più complesse da valutare. In un precedente lavoro è stata proposta una definizione operativa di questo indice, utile per la classificazione del territorio nazionale in zone climatiche estive e per la determinazione dei valori limite del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva.

La definizione proposta comprende anche il caso invernale e consente quindi una uniformità nella classificazione indipendentemente dal periodo climatico dell'anno. Per una descrizione dettagliate delle attività svolte si rimanda al rapporto completo, disponibile sul sito ENEA, in cui tra l'altro vengono esposti i risultati di una prima applicazione dell'indice di severità climatica al caso estivo e si propone una conseguente classificazione del territorio italiano.

Nello studio sono state richiamate le proprietà che dovrebbero essere possedute da un indice di severità climatica che, tenendo conto sia delle variabili climatiche macroscopiche (temperatura e umidità dell'aria, irraggiamento) di un sito sia delle caratteristiche costruttive di un edificio, fosse utile per la classificazione del territorio ai fini della regolamentazione dei consumi energetici per la climatizzazione dell'edificio stesso. A fronte di un'impossibilità teorica di costruzione di un indice siffatto, si è individuata e proposta una possibile soluzione ingegneristica al problema definendo un corrispondente indice pratico utile allo scopo. È stata sviluppata la struttura di questo indice pratico di severità climatica, individuandone altresì i limiti e i modi per ottenerlo, ed è stato possibile uniformare il trattamento del periodo estivo rispetto a quello invernale.

La prima fase applicativa è realizzata con un esperimento numerico che ha previsto l'impiego di un codice di calcolo dinamico, applicato ad alcuni edifici tipici del parco edilizio nazionale, per la stima dell'energia di climatizzazione estiva in condizioni di trasmittanza, massa e orientamento diverse.

La procedura per la determinazione dell'indice di severità climatica estiva è stata applicata su un campione di 20 località scelte per coprire la popolazione di 101 località (capoluoghi di provincia) delle quali c'era la disponibilità di dati climatici riconosciuti dalla normativa vigente. É stato dimostrato che il campione scelto era statisticamente rappresentativo e, anzi, con maggior varianza rispetto a quello della popolazione.

I risultati dell'esperimento numerico sono stati utilizzati per classificare le 101 località sulla base dell'indice di severità climatica estivo (Figura 187). Questa prima fase applicativa ha suggerito il proseguimento del lavoro estendendo la procedura anche al caso invernale oltre che alcuni sviluppi dal punto di vista metodologico.

B. Modelli (Programmi, Tool, software) di calcolo

Le attività inerenti il tema dell'efficienza energetica degli edifici, delle norme e degli strumenti di calcolo, nazionale e nei Paesi della UE, sono in una fase di studio e sviluppo.

La normativa, anche a seguito dell'emanazione del DLgs 115/08 di recepimento della direttiva 32/2006/CE e della direttiva 31/2010/CE, è in un periodo di continui sviluppi e aggiornamenti, che determinano situazioni difficili da seguire alla luce di quanto le Regioni stanno legiferando. Per dare una concretezza alle attività si è impostato il lavoro facendo riferimento allo stato dell'arte seguendo due fasi di attività:

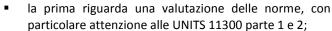


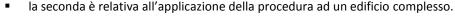


Figura 187. Indice di severità climatica: classe

0.025 - 0.175 0.175 - 0.276

0.276 0.358

0.358 - 0.430 0.430 - 0.500 > 0.500



L'attività è svolta, dal Politecnico di Torino, ha riguardato lo studio ed l'applicazione dei modelli e programmi di calcolo per la certificazione energetica degli edifici basati sull'applicazione delle UNI/TS 11300 e la sua validazione per la certificazione di edifici complessi, utilizzando come principale strumento di indagine il codice di simulazione dinamica EnergyPlus.

Il lavoro svolto ha previsto:

- per l'attività di supporto scientifico allo sviluppo di un tool di certificazione:
 - 1. definizione di un flow-chart per l'applicazione della UNI/TS 11300 (parti 1, 2 e 3)
 - 2. messa a punto del foglio di calcolo per l'applicazione della UNI/TS 11300
 - 3. stesura di linee guida per l'utilizzo del tool di certificazione
 - 4. regole per il reperimento e la formalizzazione dei dati di input
 - 5. regole per l'utilizzo di dati precalcolati
 - 6. definizione delle condizioni al contorno.
- per l'attività di validazione della UNI/TS 11300:
 - 1. definizione dei casi studio
 - 2. simulazioni dei casi studio con il codice di calcolo EnergyPlus
 - 3. applicazione della UNI/TS 11300 ai casi studio
 - 4. analisi di sensibilità sulle deviazioni dei risultati finali e intermedi del calcolo per verificare la robustezza del metodo semplificato
 - 5. analisi di aspetti particolari del calcolo: ad. es. effetto dell'ombreggiamento, parametri dinamici, scambio termico verso il terreno, ponti termici, impianti di climatizzazione non convenzionali.

Applicazione della UNI/TS 11300

Un requisito essenziale per l'adozione delle misure previste dalla Direttiva Europea 2002/91 sul rendimento energetico degli edifici (EPBD) è l'esistenza di uno schema generale che definisca la metodologia di calcolo della prestazione energetica globale degli edifici. A tal fine la Commissione Europea ha dato mandato al CEN (ente normatore europeo) perché mettesse a punto:

- una metodologia di calcolo condivisa della prestazione energetica degli edifici;
- metodi di valutazione adattabili alla certificazione energetica;
- linee guida generali per l'ispezione di caldaie, impianti di riscaldamento e di condizionamento dell'aria.

La normativa europea di recente pubblicazione comprende oltre 40 norme tecniche, pubblicate dal CEN e recepite dall'UNI, con una classificazione che tiene conto delle diverse calcolazioni da sviluppare.

Come riportato nella UNI EN ISO 15603, la valutazione energetica di un edificio può essere effettuata secondo diverse procedure. Si distinguono la valutazione d'esercizio (operational rating), basata sulla lettura dei consumi reali, e la valutazione di calcolo (calculated rating), la quale può ancora essere classificata in base alle condizioni al contorno. La metodologia più appropriata di valutazione energetica dipende dal tipo di applicazione. Secondo la normativa tecnica il calcolo della prestazione energetica dell'edificio si struttura in tre livelli (Figura 188):

- calcolo dei fabbisogni termici netti di energia per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio (UNI EN ISO 13790 e norme collegate);
- calcolo dell'energia erogata agli impianti di riscaldamento e raffrescamento, ventilazione, condizionamento, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione artificiale;
- calcolo degli indicatori di prestazione energetica globale, espressa in termini di energia primaria, emissioni di CO₂, etc. (UNI EN 15603).

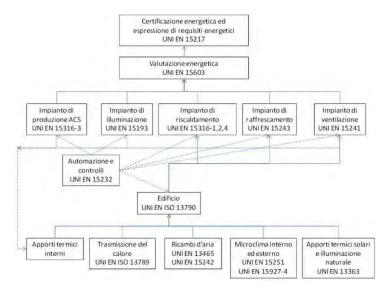


Figura 188. Schema della normativa tecnica europea per il calcolo della prestazione energetica degli edifici

Nella sua complessa struttura, la normativa europea descrive diversi metodi di calcolo alternativi e definisce, per ciascun metodo, una serie di valori di default dei parametri di calcolo. Ai singoli paesi si consente di scegliere il metodo ritenuto più adatto e di definire su base nazionale i valori di alcuni parametri, per meglio adattare l'applicazione del metodo alle condizioni climatiche e alle tipologie costruttive ed impiantistiche locali.

In tale contesto, l'UNI e il CTI hanno messo a punto una serie di norme nazionali (UNI/TS 11300), finalizzate all'applicazione delle nome europee in Italia, con particolare riferimento alle procedure di verifica e valutazione previste dalla legislazione energetica nazionale (Figura 189). Il pacchetto delle norme UNI/TS 11300 "Prestazioni energetiche degli edifici" è suddiviso in quattro parti.

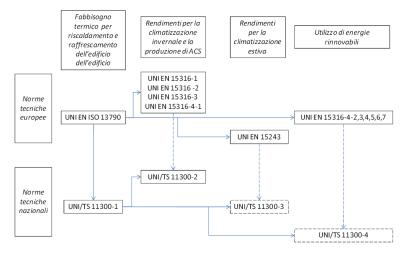


Figura 189. Relazione tra la normativa tecnica europea e quella italiana per il calcolo del fabbisogno di energia per la climatizzazione degli edifici

Nel rapporto completo vengono riportate in dettaglio la procedura di calcolo delle UNI TS 11300 con l'elencazione delle principali formule applicative ed un flow-chart per l'applicazione delle norme UNI TS 11300 parti 1, 2 e 3.

Messa a punto del foglio di calcolo per l'applicazione della UNI/TS 11300

Il foglio di calcolo messo a punto, permette il calcolo dei fabbisogni di energia termica e per la climatizzazione invernale degli edifici I dati che descrivono i singoli componenti edilizi riguardano gli elementi trasparenti, gli elementi opachi confinanti con l'esterno, quelli non confinanti con l'esterno, i ponti termici ed i dati climatici comprendono i valori medi mensili della temperatura esterna e dell'irradianza solare globale su piano orizzontale. Il calcolo degli apporti solari distingue tra elementi trasparenti ed elementi opachi e il calcolo dei fabbisogni dell'energia termica è previsto per ciascuna zona climatica.

o Linee guida per l'utilizzo del tool di certificazione

È stata esaminata la procedura da seguire per la certificazione energetica di un edificio ed i compiti che il certificatore deve ottemperare per la redazione dell'Attestato di Certificazione Energetica (ACE). Vengono esaminate, le modalità per reperire e formalizzare i dati di input relativi all'edificio, documentare i dati geometrici, dimensionali, termo-fisici ed impiantistici, impiegati come input del calcolo energetico, avvalendosi di rilievi svolti in forma grafica e/o fotografica, nonché della documentazione di progetto, previa opportuna verifica di conformità con quanto realizzato. In particolare in caso di edifici esistenti, la metodologia di calcolo è definita "standard" ed è basata sul rilievo dell'edificio, la valutazione della prestazione energetica è svolta a partire dai dati di ingresso ricavati da indagini svolte direttamente sull'edificio esistente seguendo le procedure descritte nelle Linee Guida Nazionali per la Certificazione energetica degli edifici.

Inoltre vengono individuate le modalità ed i documenti ed i dati necessari tramite i quali il certificatore deve redigere l'ACE con le opportunamente verifiche.

Sia per gli edifici di nuova costruzione, sia per quelli esistenti, i dati necessari per il calcolo del fabbisogno di energia per la climatizzazione possono essere differenziati a seconda che si riferiscano all'edificio, all'impianto termico, all'utenza o al clima.

Utilizzo di dati precalcolati

Per valutazioni effettuate su edifici esistenti, in assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, la norma prevede l'adozione di opportune semplificazioni nel calcolo e nella definizione dei dati d'ingresso. Le semplificazioni operate nella definizione dei dati d'ingresso rappresentano la principale causa di deviazione tra i risultati dei diversi strumenti di calcolo o, a parità di strumento di calcolo, dei diversi soggetti che li applicano.

La normativa tecnica fornisce una serie di semplificazioni rivolte principalmente alla certificazione energetica degli edifici esistenti, da adottarsi in assenza di dati di progetto attendibili.

Alcune semplificazioni riguardano l'uso di dati precalcolati per la caratterizzazione di singoli componenti, da adottarsi quando non si disponga di dati documentati e non si possano effettuare, anche per motivazioni di ordine economico, indagini sperimentali di approfondimento. Un quadro di sintesi dei dati precalcolati è rappresentato in Tabella 32.

Tabella 32. Dati precalcolati per la caratterizzazione del singolo componente

Componente	Parametro	Variabili	Riferimento nonnativo
Componenti opachi	Trasmittanza termica	Tipologia costruttiva, spessore	UNI/TS 11300-1 - app. A
dell'involucro	Fattore di assorbimento solare	Colore	UNI/TS 11300-1 - par. 14.2
	Trasmittanza di energia solare totale di vetri	Tipologia	UNI/TS 11300-1 - par. 14.3.1
Componenti trasparenti	Fattore di riduzione della trasmittanza solare di schermature mobili	Tipologia	UNI/TS 11300-1 - par. 14.3.3
dell'involucro	Trasmittanza termica di vetri, telai e chiusure oscuranti	Tipologia	UNI/TS 11300-1 - app. C
	Fattore telaio (1 - F _F)	-	UNI/TS 11300-1 - par. 14.3.2
Ponti termici	Trasmittanza termica lineare	Tipologia di ponte termico, posizione dell'isolante	UNI EN ISO 14683
Sistema di distribuzione	Trasmittanza termica lineare	Diametro della tubazione, grado di isolamento	UNI/TS 11300-2 - par. A.5.6

A completare il quadro della Tabella 32 si ricorda anche l'ampio numero di valori default definiti dalla UNI/TS 11300-2 in appendice B ai fini della determinazione analitica del rendimento di generazione.

Una seconda famiglia di dati precalcolati sono quelli finalizzati, non già alla caratterizzazione del singolo componente, ma alla modellazione semplificata di un fenomeno fisico che riguarda un intero gruppo di componenti. In questo caso l'utilizzo di valori precalcolati consente di evitare una descrizione analitica dei vari componenti che costituiscono la parte del sistema edificio-impianto considerata. In tabella 33 si riportano le principali semplificazioni previste dalle norme UNI/TS 11300.

Tabella 33. Utilizzo di dati precalcolati per la modellazione semplificata del sistema edificio impianto

Sistema	Descrizione della semplificazione	Variabili	Riferimento normativo
Edificio	Determinazione semplificata del volume netto	Destinazione d'uso, spessore medio delle pareti estreme, presenza di partizioni	UNI/TS 11300-1 - par. 12.3
	Determinazione semplificata della superficie netta di pavimento	Spessore medio delle pareti esterne	UNI/TS 11300-1 - par. 13.3
Contesto esterno	Ombreggiatura di elementi esterni	Angolo medio sull'orizzonte, mese, orientamento	UNI/TS 11300-1 - app. D
	Determinazione forfetaria dell'effetto dei ponti termici	Tipo di struttura edilizia	UNI/TS 11300-1 - par. 11.1.3
Involucro edilizio	Fattore di correzione precalcolato dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato	Tipo di ambiente confinante	UNI/TS 11300-1 - par. 11.2
	Fattore di correzione precalcolato dello scambio termico tra ambiente climatizzato e terreno	Tipo di elemento	UNI/TS 11300-1 - par. 11.3
Struttura edilizia	Valori precalcolati della capacità termica interna	Numero di piani, caratteristiche di intonaci, pareti esterne e pavimenti	UNI/TS 11300-1 - par. 15.2
Sistema di distribuzione	Rendimenti di distribuzione	Numero di piani, percorso e grado di isolamento delle tubazioni	UNI/TS 11300-2 - par. 6.6.3.1
Sistema di generazione	Rendimenti di generazione	Tipo e posizione del generatore, sovradimensionamento, altezza del camino, temperatura del fluido termovettore	UNI/TS 11300-2 - par. 6.6.5.1 UNI/TS 11300-2 - par. 6.6.5.2

Condizioni al contorno

Rientrano tra i dati da reperire riferiti alle condizioni al contorno, sia quelli riferiti all'utenza, sia la contestualizzazione dell'intervento.

I dati sull'utenza comprendono:

- le modalità di occupazione dell'edificio (profilo giornaliero, settimanale e mensile di occupazione; attività svolte; apparecchiature presenti; apporti interni di calore);
- le modalità di gestione delle chiusure oscuranti e delle schermature mobili delle finestre;
- le modalità di ventilazione (ventilazione naturale o meccanica; tipo di regolazione della portata; portata di ventilazione);
- le modalità di gestione dell'impianto termico (durata del periodo di riscaldamento; profilo giornaliero e settimanale di funzionamento; temperatura di set-point; temperatura di set-back.

I dati climatici comprendono i valori medi mensili della temperatura esterna e dell'irradianza solare sui diversi componenti dell'involucro edilizio.

Per le valutazioni energetiche che hanno come finalità la verifica dei requisiti di legge e la certificazione energetica, risulta necessario fare riferimento a un'utenza convenzionale e ad un clima di riferimento, in modo da depurare il risultato dall'effetto dello specifico comportamento dell'utenza o da particolari condizioni climatiche. La UNI/TS 11300 definisce tali condizioni al contorno "standard". A tal fine, per quanto riguarda i dati climatici la richiama la norma UNI 10349 (valori di temperatura e irradianza solare medi mensili) e il D.P.R. 412/1993 (gradi giorno). Con riferimento alle condizioni termiche degli edifici o delle unità immobiliari adiacenti, la UNI/TS 11300-1 impone una temperatura di 20 °C in inverno e di 26 °C in estate. Per quanto riguarda, le modalità di gestione del sistema edificio-impianto, definisce invece un'utenza convenzionale, come sinteticamente schematizzato in tabella 34.

Tabella 34. Utenza convenzionale (secondo la UNI/TS 11300-1)

Elemento	Dato	Criterio	Variabili	Riferimento normativo
Occupante	Apporti interni di calore	Valore tabulato	Destinazione d'uso	UNI/TS 11300-1 - par. 13.1.1
	Gestione delle chiusure oscuranti	Chiusura notturna (12 h)	-	UNI/TS 11300-1 - par. 11.1.2
	Gestione delle schermature mobili	Chiusura con valori di irradianza solare maggiori di 300 W/m²	Latitudine Orientamento Mese	UNI/TS 11300-1 - par. 14.3.4
	Portata di ventilazione naturale	Valore tabulato	Destinazione d'uso	UNI/TS 11300-1 - par. 12.1.1
Impianto di ventilazione	Portata di ventilazione	q _{ve,des} · k k = fattore di contemporaneità	Portata di progetto	UNI/TS 11300-1 - par. 12.1.1
meccanica	Ventilazione notturna	Azionamento notturno (23:00-7:00)	Portata di progetto	UNI/TS 11300-1 - par. 12.2
Impianto termico	Periodo di riscaldamento	Valore tabulato	Zona climatica	UNI/TS 11300-1 - par.10.1.1
	Profilo di funzionamento impianto	Continuo		UNI/TS 11300-1 - par .15.3.1
	Temperatura interna di regolazione	Valore tabulato	Destinazione d'uso	UNI/TS 11300-1 - par.8.1

Validazione della norma UNI/TS 11300

Il modello di simulazione dinamica utilizzato l'EnergyPlus è un codice di simulazione a struttura modulare, realizzato negli Stati Uniti dal Department of Energy a partire dal 2001 che effettua il calcolo termico relativo a ciascun zona dell'edificio secondo il modello del bilancio termico dell'aria interna.

Uno degli spetti principali della simulazione dinamica con Energy plus è rappresentata dalla possibilità di poter simulare e integrare tutti gli spetti principali del sistema edifico-impianto: dai carichi termici in ambiente, all'impianto di climatizzazione, al sistema di generazione.

Il codice integra la simulazione dell'edifico con quella dell'impianto, consentendo in questo modo di trasferire l'informazione relativa al carico che l'impianto è effettivamente in grado di bilanciare al fine di determinare le condizioni di temperatura dell'aria in ambiente secondo un processo di tipo iterativo.

Si è proceduto pertanto secondo successive iterazioni tra la richiesta di energia da parte dell'edifico e l'offerta di energia da parte dell'impianto: si stima dapprima il carico termico dell'edifico fissando una temperatura interna di set-point; si assume questo carico pari alla potenza termica richiesta all'impianto, e successivamente si simula il funzionamento reale dell'impianto di climatizzazione stimando l'effettiva potenza termica che esso è capace di erogare per ogni istante temporale; a partire da questa potenza termica viene determinata l'effettiva temperatura della zona termica approssimando la derivata temporale della temperatura dell'aria, nel termine che rappresenta la variazione dell'energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine.

Un procedura di tale natura è necessaria a stimare le reali condizioni di funzionamento dell'impianto ai carichi parziali, per cui la temperatura e la portata del fluido vettore sono funzione della temperatura della zona termica da climatizzare.

Nel rapporto completo vengono decritti i dati di ingresso richiesti dal codice. Vengono, quindi, rappresentati e dettagliati i casi studio esaminati che si riferiscono ad un edificio a torre adibita ad uso terziario, facente parte di un progetto più ampio che prevede annessa una seconda palazzina a torre, di dimensioni in pianta ed altezza ridotte, adibita ad uso residenziale di 24 piani e un edificio ad uso residenziale e terziario corredati da schede tecniche dei dati fisici e prestazionali dei componenti edilizi di ciascun edificio e dei dati climatici della località. I risultati della simulazione sono stati poi confrontati con quelli ottenuti con l'utilizzo di un sistema di calcolo semplificato.

Una sostanziale differenza tra la modellazione con EnergyPlus ed il calcolo semplificato risiede nella valutazione dei ponti termici: mentre tali dispersioni termiche per trasmissione sono contemplate nel modello semplificato, adottando una trasmittanza termica lineica ricavabile dalla norma UNI EN ISO 14683:2008 (dati precalcolati) per la lunghezza del ponte termico, una valutazione con EnergyPlus non permette di simulare la presenza di ponti termici, se non adottando l'espediente di ipotizzare i medesimi come una sottosuperficie da associare al componente nel quale è presente l'effettivo ponte termico, e caratterizzare tale sottosuperficie attraverso un coefficiente di dispersione termica pari a quello dell'effettivo ponte termico, e medesime caratteristiche termiche dinamiche del componente opaco associato.

Edifici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio. Applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani

L'attività è finalizzata alla definizione di indici e livelli di consumo di edifici del non residenziale per diverse destinazioni d'uso quali: scuole, alberghi, uffici, centri commerciali ed ospedali, ad integrazione di quanto fatto nella precedente annualità. Questo studio ha consentito di ampliare il quadro di riferimento e di disporre di dati su settori poco conosciuti e carenti di informazioni.

L'attività, attraverso studi mirati alla ottimizzazione del sistema edificio-impianto, si pone anche l'obiettivo di fornire al legislatore elementi di valutazione oggettivi in sede di redazione delle norme che implementino le direttive europee, in tema di usi finali dell'energia, quale la 31/2010/CE, ed indirizzino le scelte programmatiche e strategiche per il raggiungimento degli obiettivi sul risparmio energetico e la riduzione delle emissioni dei gas serra.

Il prodotto dell'attività è stato quello di fornire un inquadramento sulla situazione legislativa, in tema di efficienza energetica, a livello europeo e nazionale definire indici e livelli di consumo (benchmark) attuali, distinti per:

- diverse destinazioni d'uso (scuole, alberghi, uffici, grandi magazzini e residenziale);
- le varie tipologie edilizie;
- le diverse condizioni climatiche;
- le condizioni d'impiego.

Questo consentirà una più puntuale implementazione, a livello nazionale, della normativa europea (tra cui la direttiva 91/2002/CE, 31/20210/CE e della direttiva 32/2006/CE) riguardante le prestazioni energetiche degli edifici e il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio impianto in modo particolare per i consumi elettrici e la valutazione dei livelli di efficienza energetica ottenibili in funzione della fattibilità delle soluzioni tecnologiche.

E' stato inoltre redatto anche uno studio finalizzato alla definizione di una metodologia che consente di determinare le caratteristiche strutturali ed impiantistiche di "edifici tipo" al fine di condurre una valutazione di fattibilità degli interventi di riqualificazione energetica, in funzione di diverse ipotesi di intervento, sia di tipo strutturale che impiantistico. Questo studio potrà essere utilizzato dal legislatore per determinare azioni e provvedimenti di intervento più significativi per il contenimento dei consumi energetici degli edifici esistenti.

Lo sviluppo di modelli di valutazione del sistema elettrico nazionale, che preveda l'integrazione dei sistemi edificio/impianto, è finalizzata anche alla promozione di azioni per la applicazione di nuove tecnologie per la cotrigenerazione e la generazione distribuita di energia. Dallo studio sono emersi una serie di considerazioni, quali:

- le forti differenze nei consumi per gli edifici costruiti prima dell'entrata in vigore della legge 373/76 e quelli realizzati dopo l'applicazione di legge, negli alberghi tale differenza è di circa il 50%;
- la necessità di definire più indicatori per le diverse destinazioni d'uso, per gli alberghi, le scuole e gli uffici l'indicatore potrebbe essere il kWh/m², per gli ospedali si dovrebbe definire un indicatore specifico che, ad esempio, tenga conto del volume del reparto, della funzione e del numero posti letto, per i grandi magazzini il kWh/m³ risponde bene come indicatore;
- l'incidenza molto significativa sui consumi dei nuovi limiti di trasmittanza dell'involucro prescritti dal D.lgs.
 192/05 e s.;
- per il periodo invernale, riscaldamento, le migliori prestazioni si raggiungono tramite l'aumento dell'isolamento termico delle pareti opache e trasparenti e l'utilizzo del recupero del calore dall'aria di ventilazione;
- per il periodo estivo, raffrescamento, i potenziali di risparmio più elevati sono dati dall'introduzione della ventilazione notturna e dalle misure di controllo solare.

Alle attività dell'obiettivo hanno partecipato il Politecnico di Milano, l'Università di Roma La Sapienza, l'Università di Roma Tre, il Politecnico di Torino e l'Università di Padova, il CRESME

C.1 <u>Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso alberghiero, applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani</u>

Gli obiettivi per i quali è servito costruire una apposita metodologia sono stati sostanzialmente due: il primo, quello di dare una dimensione quantitativa al patrimonio di edilizia alberghiera presente in Italia, e la sua dislocazione territoriale. Il secondo era quello di affiancare alla misurazione quantitativa la caratterizzazione qualitativa di tali fabbricati, in funzione soprattutto delle informazioni necessarie a stimare il fabbisogno energetico e i tipi e le modalità di interventi manutentivi necessari all'efficientamento energetico.

Il patrimonio edilizio ad uso ricettivo-alberghiero non è trattato statisticamente in forma organica da alcuna fonte. Alcuni produttori statistici istituzionali rilevano frammenti di informazione di carattere quantitativo (in date diverse, con modalità di rilevazione differenti, a scopi differenti). L'attività condotta dal CRESME per pervenire alla quantificazione del fenomeno è stata:

- 1. la ricognizione in sede Sistan;
- 2. l'esame dei modelli di rilevazione e le note metodologiche;
- 3. l'acquisizione delle banche dati, comprese le informazioni non divulgate;
- 4. l'analisi di congruità e di coerenza fra le diverse misurazioni;
- 5. la stima finale sulla base delle qualità statistiche dei diversi documenti.

Per lo studio sono state utilizzate le seguenti banche dati:

- Il Censimento ISTAT sulla popolazione e le abitazioni (2001) numero di edifici ad uso alberghiero: il modello di rilevazione prevede il censimento degli edifici destinati ad uso alberghiero ma, tuttavia, il dato non viene pubblicato se non in forma aggregata con le diverse destinazioni diverse dal residenziale (commercio, industria, magazzino, ecc.). Sono stati acquisiti i dati a livello provinciale disaggregato e comunale in forma aggregata (causa gli obblighi di segretezza dei dati sensibili);
- Censimento ISTAT dell'industria commercio, artigianato e istituzioni (2001) superficie degli spazi impiegati dal settore commercio per uso alberghiero: queste informazioni approssimano la necessità di spazi in relazione al tipo di attività esercitata dai diversi tessuti del terziario. Queste informazioni sono risultate propedeutiche per il disegno campionario e l'individuazione dei soggetti da intervistare.
- Agenzia del Territorio, Banca dati catastale numero unità immobiliari urbane ad uso alberghi: esso riguarda tutte le unità immobiliari D2, anche quelle riconducibili ad una sola stanza e presenti in edifici destinati ad altro uso. A differenza dei Censimenti, tuttavia, essa è aggiornata al 2007.
- Rilevazione dell'attività edilizia ISTAT numero edifici ad uso alberghiero nei permessi per edificare rilasciati fra il 2000 e il 2007: il dato, che non è diffuso pubblicamente è stato acquisito, esso riguarda unicamente il flusso di nuove realizzazioni edilizie. Ha permesso però di aggiornare il dato del 2001.

Per le indagini è stato poi predisposto un apposito questionario da utilizzare per la raccolta dei dati. Le interviste sono state effettuate dal 30 aprile al 15 giugno 2010 con metodo CATI (Computer Assisted Telephone Interviewing). Nel complesso sono stati effettuati 2180 contatti telefonici: 735 interviste hanno prodotto informazioni parziali (questionario non completato), 1031 interviste sono state completate in ogni dettaglio.

Nel seguito si riporta una breve sintesi degli esiti dell'indagine.

Le quantità

Nel 2009 sul territorio nazionale sono presenti 25845 edifici ad esclusivo o prevalente uso alberghiero. Il 30% di questi edifici è concentrato nelle

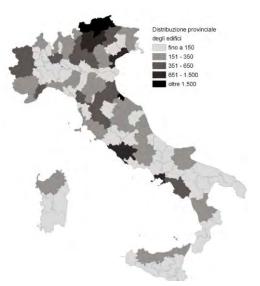


Figura 190. Distribuzione provinciale degli edifici alberghieri nel 2009

province di Rimini, Bolzano, Venezia, Napoli, Trento e Roma. Il 50% è si distribuisce nelle prime 17 province. Inoltre, il 30% è realizzato nei comuni di piccola dimensione demografica (fino a 5000 abitanti) e il 64% nei comuni fino a 20000 abitanti.

Tabella 35. Numero edifici uso alberghiero per epoca di costruzione

	Numero	%
prima del 1919	5589	21,6
Dal 1920 al 1945	1892	7,3
Dal 1946 al 1961	4291	16,6
Dal 1962 al 1971	5925	22,9
Dal 1972 al 1981	3524	13,6
Dal 1982 al 1991	2060	8,0
Dal 1992 al 2001	1263	4,9
Dal 2002 al 2008	1302	5,0
TOTALE	25845	100,0%

Elaborazioni Cresme per ENEA - 2010

Negli ultimi 8 anni, il flusso medio annuo di edifici di nuova realizzazione è consistente: pari a circa l'1,4% dell'esistente. Poco più di un edificio su cinque è stato realizzato in epoca anteriore al 1919, negli ultimi vent'anni si registra una diminuzione delle realizzazioni (Tabella 35).

Nel rapporto completo sono riportate una serie di figure che illustrano la distribuzione degli edifici in base a differenti parametri e di cui si riporta a titolo esemplificativo quella sulla distribuzione provinciale (Figura 190).

o Le caratteristiche dimensionali e strutturali degli edifici

I 25845 edifici sviluppano una superficie complessiva di 48,6 milioni di m³ e una volumetria pari a oltre 140 milioni. La quota maggiore di fabbricati è di medio-grandi dimensioni: quasi il 60% supera i 1000 m². Tuttavia il 43% delle superfici e delle volumetrie (circa 61milioni di m³) sono espresse dal 13% degli edifici alberghieri: 3300 edifici di grande dimensione (oltre 3000 m²). Questi ultimi sono prevalentemente concentrati nelle regioni settentrionali del Paese.

Il 91% degli edifici è completamente utilizzato e l'1,4% è in fase di ristrutturazione. Il 56% è completamente isolato sui quattro lati, il 26,3% è contiguo su due o più lati con altri fabbricati. Il 66% degli immobili è realizzato con la struttura in cemento armato e tamponature in muratura e il 31% è costituito da muratura portante. Il 67% si sviluppa su un numero di livelli da 3 a 5. Il 10% è oltre i 5 piani. Oltre la metà (54%) è dotato di piano interrato. Il 37% ha il piano terra aperto.

o I serramenti e gli elementi ombreggianti

Ogni stanza d'albergo ha mediamente una o due finestre (rispettivamente il 59% e il 38%). Il telaio è prevalentemente in legno (47,6%) seguito dall'alluminio (31,6%) e dal PVC (14,1%). Il 77,6% delle finestre montano il doppio vetro, il 4,7% il triplo vetro. La superficie delle camere è prevalentemente compresa fra 11 e 20 m².

Per quanto riguarda i sistemi ombreggianti, il 23,5% possiede aggetti esterni fissi (15%) e/o mobili (8,4%); il 73% è dotato di schermi esterni (persiane, avvolgibili).

Gli impianti

Il combustibile maggiormente impiegato è il gas (64%) seguito dal gasolio (23,5%) e dall'elettricità (11%). I sistemi di emissione dell'aria e/o di riscaldamento sono prevalentemente radiatori (56%) split (43%); fan-coil (29%) e bocchette d'aria a soffitto (17%).

I tipi di generatore di calore o di trattamento d'aria installato sono soprattutto caldaia (il 64%) e condizionatore fisso (il 51%, quasi sempre associato a pompa di calore). Il 7,6% impiega il cogeneratore e il 17,2% l'unità trattamento aria (UTA).

Ogni camera ha il sistema di regolazione della temperatura nel 70% dei casi. Il 15,4% impiega fonti rinnovabili, in particolare solare termico (68%).

Le aree geografiche e gli edifici tipo

Aree settentrionali

- Quasi 2/3 (il 65%) degli edifici alberghieri (14.781) è collocato nelle regioni settentrionali. Circa 21150 nella sola provincia di Rimini; 1983 nella provincia di Bolzano; superano gli 800 edifici ciascuna delle province di Venezia, Napoli e Trento; Roma ne conta 799.
- L'82% degli immobili (12075) ricade nella zona climatica E. Le altre zone climatiche contano appena 2706 edifici.
- Nella zona prevalente, il maggior numero di edifici (8710) è stato realizzato prima degli anni '70, ulteriori 1832 fabbricati sono sorti dopo il 1981. Circa 1500 appartengono al decennio '70-'80.
- Il 60 % degli edifici è isolato, con una quota in crescita nei periodi più recenti.
- Il sistema costruttivo è per il 64% in cemento armato e muratura, ben il 32% è stato dichiarato essere in muratura portante; l'1,5% in cemento armato (c.a) e vetro. Diversa la distribuzione se si guarda all'epoca di costruzione: prima degli anni'70 il 40% era in muratura portante; negli ultimi anni una diversa attenzione si è spostata verso il c.a. e vetro, c.a. e pannelli prefabbricati come tamponature e acciaio e vetro (il totale di questo aggregato è pari al 10.9%).
- Le dimensioni unitarie risultano in crescita nei periodi più recenti: negli ultimi vent'anni l'80% è più grande di 1000 mq (rappresentavano il 52% gli edifici realizzati prima del 1970);
- Oltre la metà (58%), sempre dei manufatti realizzati prima del '70, ha una sola finestra per stanza con infissi in legno per il 54% dei casi (il 25% sono in alluminio) ma la maggior parte possiede i doppi (77.4%) o tripli vetri (6,4%). La maggior parte è dotata di schermi esterni (persiane, avvolgibili, ecc.).
- Moltissimi gli impianti di riscaldamento alimentati a gas (il 70%) minore è l'impiego di gasolio (21%) e le tubature sono interne alle pareti.

- L'emissione dell'aria avviene sia attraverso radiatori (60%) che split (40%); Il fan-coil viene impiegato dal 28% degli alberghi, mentre le bocchette d'aria a soffitto rappresentano il 18%.
- L'89% degli alberghi presenta degli accorgimenti per il risparmio energetico. In particolare le lampade a basso consumo (96%); il sistema di temporizzazione dell'illuminazione esterna (55%); il controllo e la disattivazione degli impianti (36%).
- Il 14% degli alberghi ha impianti ad energia di fonte rinnovabile, il 12,5% dei fabbricati costruiti prima del '70.

Aree centrali

- Nelle regioni centrali sono ubicati oltre 5300 edifici. Nella sola provincia di Roma ce ne sono 800, a Perugia 473, a Siena 447, a Firenze, 437.
- Il 75% (3971 edifici) ricade nella zona climatica D, il 20% (1069) in zona E.
- Nella zona prevalente D, 2843 edifici sono stati realizzati prima degli anni '70, ulteriori 576 fabbricati sono sorti dopo il 1981. Circa 550 appartengono al decennio '70-'80.
- Circa la metà degli edifici è isolato, la quota cresce negli edifici costruiti dopo il 1980 (62%).
- Il sistema costruttivo nella zona D è per il 58% in cemento armato e muratura, il 36% in muratura portante; pochi gli edifici realizzati con tipologie costruttive differenti (circa il 5% sono realizzate con l'impiego di pannelli prefabbricati in calcestruzzo o vetro o acciaio);
- In zona climatica D, il 56% degli edifici realizzati prima del 1970 registra dimensioni maggiori di 1000 m² e sono sviluppati prevalentemente su quattro piani con ascensore.
- Il 60%, sempre dei manufatti realizzati prima del '70, ha una sola finestra per stanza, il 39% ne ha due. La metà degli infissi sono in legno (il 33% sono in alluminio e il 14% sono in PVC o misto). Molto superiore il numero dei doppi o tripli vetri (81%) rispetto ai singoli. La maggior parte è dotata di schermi interni (tendaggi o veneziane) ed esterni.
- Gli impianti di riscaldamento più numerosi sono alimentati a gas (il 71%) minore è l'impiego di gasolio (14%) e persiste una quota elevata di elettricità (13%). Le tubature sono interne alle pareti.
- L'emissione dell'aria avviene sia attraverso radiatori (50%), fan-coil (42%) e termoconvettori (11%). Il 50% ha un sistema di condizionamento fisso tipo split.
- Il 5.3% dei fabbricati costruiti prima del '70 è dotato di impianti a fonti rinnovabili. La stessa percentuale cresce negli immobili più recenti fino al 14%.

Aree meridionali

- Il Mezzogiorno conta 5745 edifici (il 22%). Supera gli 800 fabbricati, la sola provincia di Napoli (854) seguita da Salerno (426) e da Messina (411) Tutte le altre contano meno di 400 alberghi ciascuna.
- Il 51% (2916 fabbricati) è collocato in comuni ricadenti nella zona climatica C; il 23% (poco più di 1300) in zona D; il 19% (1080) in zona B.
- Nella zona prevalente C, circa 1550 edifici sono stati realizzati prima degli anni '70, ulteriori 824 fabbricati sono sorti dopo il 1981. Circa 540 appartengono al decennio '70-'80. La medesima distribuzione si osserva nelle altre zone climatiche.
- Il 48% edifici meno recenti è isolato, con una quota in crescita negli anni '70 (71%) e in decrescita dopo il 1980 (dopo il 1980 la quota degli isolati scende al 59%).
- Il sistema costruttivo nella zona C è per il 71% in cemento armato e muratura solo nelle realizzazioni più recenti, si registra un 3.1% in c.a. e vetro o acquaio e muratura.
- 1/3 degli edifici realizzati prima del 1970 registra dimensioni maggiori di 1000 m².
- Negli ultimi trent'anni la quota di edifici di dimensioni maggiori (oltre 1000 m²) supera il 70%.
- Il 65%, sempre dei manufatti realizzati prima del '70, ha una sola finestra per stanza, il 34% ne ha due. Gli infissi prevalenti sono in alluminio (48%, il 40% è in legno). Poco superiore il numero dei doppi o tripli vetri (83%) rispetto ai singoli. La maggior parte è dotata di schermi interni (88%, tendaggi) ed esterni (64% persiane e avvolgibili).
- Gli impianti di riscaldamento più numerosi sono alimentati a gas (il 55%) minore è l'impiego di gasolio (20%).
 Le tubature sono interne alle pareti.
- L'emissione dell'aria avviene sia attraverso radiatori (27%), fan-coil (32%) e termoconvettori (13%) Il sistema di condizionamento impiega soprattutto il condizionatore fisso tipo split (il 54%).

• Il numero di fabbricati dotato di impianti a fonti rinnovabili rappresenta il 24%, fra gli edifici realizzati più recentemente tale quota sale al 32%.

Nel rapporto completo sono riportate le tabelle descrittive per gli edifici ad uso alberghi suddivisi per regioni e zone geografiche e le tabelle con i risultati dell'indagini.

C.2 <u>Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico, applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani</u>

Il CRESME ha condotto un'analisi statistica dello stesso tipo di quella sopra descritta per caratterizzare il patrimonio edilizio adibito ad uso scolastico e la sua dislocazione territoriale.

Le quantità

Nel 2008 sono esistenti sul territorio nazionale 51904 edifici ad esclusivo o prevalente uso scolastico. Il 30% degli edifici è concentrato nelle prime 10 province (le prime tre sono Roma, Milano e Napoli). Oltre la metà (51%) si distribuisce nelle prime 24 province. Circa il 29% si trova in comuni di piccola dimensione demografica (fino a 5000 abitanti), e altrettanti nei comuni di dimensione medio-piccola.

Negli ultimi 7 anni, il flusso medio di edifici di nuova realizzazione è stato di 2068 fabbricati, pari al 4% dell'esistente. Un edificio su dieci è stato realizzato in epoca anteriore al 1919, gli ultimi vent'anni registrano un aumento delle realizzazioni rispetto ai periodi precedenti.

Tabella 36. Numero edifici uso scolastico per epoca di costruzione

	Numero	%
prima del 1919	5118	9,9
Dal 1920 al 1945	4827	9,3
Dal 1946 al 1961	11225	21,6
Dal 1962 al 1971	11353	21,9
Dal 1972 al 1981	10328	19,9
Dal 1982 al 1991	4654	9,0
Dal 1992 al 2001	2331	4,5
Dal 2002 al 2008	2068	4,0
TOTALE	51904	100,0%

Elaborazioni Cresme per ENEA - 2010

Anche in questo caso nel rapporto completo sono riportate una serie di

figure che illustrano la distribuzione degli edifici in base a differenti parametri. La provincia con la superficie coperta ad uso scolastico più consistente è Milano (circa l'8% del totale nazionale), seguita da Roma (circa il 6%) e da Napoli (circa il 5%). Seguono le province di Torino (4%), Bari (3%), Brescia (2%), Bologna e Palermo (rispettivamente pari a 1,8% del totale nazionale).

La distribuzione in termini di rapporto con la superficie territoriale vede ai primi posti province di dimensioni ridotte. Al primo posto c'è Napoli con 3620 m² ogni km² di territorio seguita da Milano con 3215 m²/km² e da Trieste con 2214 m²/km². La provincia di Roma è solo al quinto posto con 907 m²/km², dopo quella di Varese (944 m²/km²).

In rapporto agli abitanti la ripartizione si modifica ulteriormente, facendo registrare la maggiore concentrazione di superficie a Brescia, con 244 m² ogni 100 abitanti, seguita da Siena (222 m²), Trento (200 m²), Trieste (194 m²), Nuoro (193 m²) e Milano (172 m²). Rispetto alle provincie a maggiore concentrazione di edifici e superficie Napoli fa registrare 139 m² e Roma 131 m².

Le caratteristiche dimensionali e strutturali degli edifici

La superficie coperta dagli edifici scolastici è pari a 73,2 milioni di m^2 pari ad una volumetria di 256,4 milioni di m^2 . La quota maggiore di edifici (39%) ha dimensione compresa tra 1000 e 3000 m^2 , con una superficie media di 1819 m^2 . Il 43% circa degli edifici si divide tra 3 classi di superfici: il 16% ha una superfice compresa tra 751 a 1000 m^2 (media 899 m^2), il 14% tra 501 e 750 m^2 (media 631 m^2) e il 13% tra 351 e 500 m^2 (media 435 m^2).

Oltre il 50% della volumetria (circa 130 milioni di m^3) appartiene agli edifici di dimensioni medio-grandi (tra 1000 e 3000 m^2), mentre il 27% (69,5 milioni di m^3) riguarda gli edifici di grandi (superiore a 3000 m^2).

Le scuole collocate all'interno di un unico edificio sono l'83% e il restante 17% sono complessi di edifici. Il 77% dei fabbricati è completamente isolato, il 13% è contiguo su due o più lati con altri fabbricati e il 10% è contiguo su un unico lato. La grande maggioranza degli edifici è totalmente utilizzato (pari all'87%, circa 45380 edifici) e l'11% lo è soltanto parzialmente. L'1,7% degli edifici è in fase di ristrutturazione parziale o totale.

Dal punto di vista costruttivo, si ha una netta prevalenza di strutture miste in cemento armato e muratura che rappresentano il 67% del totale, a cui seguono la muratura portante in pietra e mattoni (15%), e la muratura portante in laterizio (14%). Soltanto il 2% degli edifici ha una struttura portante in cemento armato e pannelli prefabbricati.

Il 12% degli edifici scolastici non risponde alle normative antisismiche, il 24% non è certo e soltanto il 63% degli edifici è rispondente. Rispetto all'agibilità statica il 71% delle strutture ha un certificato di agibilità, il 6% non ha

certificato e il 23% non sa. Nella grande maggioranza degli edifici non è presente amianto (92%), il 5% dei casi non si è certi mentre nel 3% degli edifici è presente amianto.

Oltre il 51% degli edifici scolastici si sviluppa per 2 piani fuori terra e quasi il 55% delle strutture non ha elevatori meccanici. In media si hanno 1,6 scale interne ogni edificio, 1,2 scale esterne e 1,4 scale di sicurezza. La quasi totalità degli edifici (97%) ha un piano interrato e il 32% ha il piano terra aperto.

La maggior parte dei fabbricati (77%) ha una parte della struttura dedicata all'amministrazione (segreteria, direzione, sala professori) mentre è contenuta la quota di strutture che hanno spazi per l'attività sportiva (61% delle strutture ha una palestra coperta, 1% campi sportivi al coperto e soltanto lo 0,4% una piscina). I laboratori sono presenti nel 82% dei fabbricati, le biblioteche nel 66% e le sale convegni (aula magna) soltanto nel 41%. Spazi per la mensa scolastica sono presenti nel 61% delle strutture. Il parcheggio (coperto/scoperto) è presente nel 37% delle strutture. Spesso questi spazi vengono utilizzati anche oltre l'orario scolastico.

o I serramenti e gli elementi ombreggianti

Il 12% degli edifici ha aule con una sola finestra mentre il 88% ha due o più finestre (rispettivamente 50% e 38%). Il telaio è prevalentemente in alluminio (63,8%) seguito dal legno (22,7%), dall'acciaio (5,2%) e dal PVC (6,3%). Il 68% delle finestre montano il doppio vetro, il 2,4% il triplo vetro.

Il 22% delle finestre ha una superficie compresa fra 2,5 e 3,5 m 2 e il 19% fra 3,5 e 5 m 2 il 38% delle finestre ha dimensione compresa tra 1 e 2,5 m 2 . Nel 55% degli edifici il rapporto tra superficie vetrata e superficie dell'aula supera il 20%, nel 36,8% degli edifici è compreso tra 12 e 20% e nell'8,1% è inferiore al 12%.

Soltanto il 6% degli edifici possiede aggetti esterni fissi e/o mobili mentre il 51% è dotato di schermi esterni (persiane, avvolgibili) e il 53% di schermi interni (tende, veneziane).

o Gli impianti

Il 97% degli edifici ha un impianto di riscaldamento di tipo tradizionale e soltanto il 2,5% ha una UTA. Il combustibile maggiormente impiegato è il gas (73%) seguito dal gasolio e olio combustibile (24%). I tubi del circuito di distribuzione sono prevalentemente in traccia (87%).

Il sistema di emissione dell'aria è costituito essenzialmente da radiatori (93%) con una minima percentuale di fancoil (4,4%) e di pannelli radianti (3,2%). Il 61% degli edifici possiede un unico sisma di regolazione della temperatura per l'intero edificio e soltanto il 12% ne ha uno in ogni stanza, mentre l'8% ne dispone uno in ogni piano. Nel 79% degli edifici non è presente l'impianto di condizionamento, nel 19% degli edifici è presente ma separato dal generatore principale e nel 2% è integrato nel generatore principale. Gran parte degli impianti di condizionamento sono fissi - split - (85%) e soltanto il 2% sono mobili, l'11% degli edifici utilizza pompe di calore e soltanto il 2% ha installato delle UTA.

o Le aree geografiche e gli edifici tipo

Aree settentrionali

- Poco meno della metà degli edifici scolastici (24126) è collocato nelle regioni settentrionali. Nella sola provincia di Milano ricadono 2672 edifici; nella provincia di Torino ricadono 1835 edifici; nella provincia di Brescia 1011 edifici.
- L'81% degli immobili (19542) ricade nella zona climatica E. Le altre zone climatiche contano appena 4.584 edifici.
- Nella zona prevalente, il maggior numero di edifici (13192) è stato realizzato prima degli anni '70, ulteriori 2503 fabbricati sono sorti dopo il 1981. Circa 3848 appartengono al decennio '70-'80.
- In questa zona il 70% degli edifici costruiti prima degli anni '70 è isolato, con una quota in crescita nel decennio '70-'80 (pari all'82%), fino ad arrivare al 78,8% negli edifici costruiti nei periodi più recenti.
- Il sistema costruttivo è per il 62% in cemento armato e muratura, il 19% muratura portante in mattoni e pietra, il 16% in muratura portante in laterizio. Diversa la distribuzione se si guarda all'epoca di costruzione: prima degli anni'70 il 52% era in c.a. e muratura (25% muratura portante in mattoni e pietra e 21% muratura portante in laterizio), arrivato all'87% nel decennio '70-'80 e sceso nuovamente a 77% nell'ultimo periodo.
- La dimensione media degli edifici varia rispetto alle epoche di costruzione: gli edifici con meno di 500 m² passano da 21,6% negli edifici realizzati prima del 1970, a 18,8% degli edifici tra '70-'80, a 8,1% degli edifici post '80; gli edifici tra 500 e 1000 m² passano da 31,7% edifici ante '70, a 28,1% edifici '70-'80, a 41,1% edifici post '80;

- gli edifici superiori a 1000 m² passano da 46,7% edifici ante '70, a 53,2% edifici '70-'80, a 50,9% edifici post '80.
- Quasi la metà dei manufatti realizzati prima del '70 hanno oltre due finestre per stanza con infissi in alluminio (il 37% sono in legno), con i doppi o tripli vetri (70%). La maggior parte è dotata di schermi esterni (persiane, avvolgibili, ecc.).
- Quasi tutti gli impianti di riscaldamento sono alimentati a gas (il 77%) minore è l'impiego di gasolio (18%) e le tubature sono interne alle pareti (89%).
- L'emissione dell'aria avviene essenzialmente attraverso radiatori (93%), molto meno attraverso fan-coil 6,3% e pannelli radianti 4,7%. Il 22% degli edifici in zona climatica prevalete ha un impianto di condizionamento, soprattutto di tipo fisso (84,6%).
- Il 10% dei fabbricati in zona E è dotato di impianti a fonti rinnovabili, nel 69% dei casi di impianti fotovoltaici e nel 31% di impianti solari termici.

Aree centrali

- Nelle regioni centrali gli edifici scolatici sono 9276. Nella sola provincia di Roma ce ne sono 2311, a Firenze,
 739, a Perugia 636 e a Frosinone 506.
- Il 68% (6301 edifici) ricade nella zona climatica D, il 22% (2023) in zona E.
- Nella zona prevalente D, 4180 edifici sono stati realizzati prima degli anni '70, 1307 nel decennio '70 '80 e ulteriori 814 dopo il 1981.
- Nella zona D circa l'80% degli edifici meno recenti è isolato, con una quota in crescita nei periodi più vicini (dopo il 1980 la quota degli isolati sale al 94%).
- Il sistema costruttivo nella zona D è per l'57% in cemento armato e muratura per i fabbricati ante '70, in crescita nelle realizzazioni più recenti (79% tra '70-'80 e pari a 100% per i fabbricati post '80).
- La quota di edifici di dimensioni inferiori a 500 m² cresce nel tempo: da 31% degli edifici ante '70 passa a 27,4% per gli edifici '70-'80 fino a raggiungere il 60% degli edifici post '80. Gli edifici con superficie compresa tra 500 e 1.000 m² passano da 20,9% negli edifici ante '70, a 14,5% negli edifici '70 − "'80, a 39,8% degli edifici post '80. Oltre i 1.000 mq la quota passa da 48% negli edifici ante '70 al 58% negli edifici '70 − '80, ad essere nulla negli edifici post '80.
- Poco meno della metà (47,6%), dei manufatti realizzati prima del '70, ha due finestre per stanza, il 30,3% ne ha più di due e il 22% ne ha soltanto una. Gli infissi prevalenti sono in alluminio (il 58.8%) e in proporzioni minori sono in legno (28,8%) e acciaio (11,1%).
- Sempre per i manufatti di questa epoca il 58,7% delle finestre ha doppi o tripli vetri. La maggior parte è dotata di schermi interni (tendaggi o veneziane).
- Nella zona D la maggior parte degli impianti di riscaldamento sono alimentati a gas (il 78%), con un minore impiego di gasolio (il 20%). Oltre il 90% delle tubature sono interne alle pareti.
- In questi edifici il 95,6% dell'emissione dell'aria avviene attraverso i radiatori, il 14,6% attraverso i termoconvettori, soltanto il 3,6% attraverso i fan-coil e l'1,6% attraverso pannelli radianti. L'88% degli edifici ha un sistema di condizionamento fisso tipo split e l'11,5% ha una pompa di calore.
- Fonti rinnovabili sono utilizzate soltanto nel 13,1% degli edifici ed in particolare viene utilizzato il fotovoltaico (93,1%) e il solare termico (6,9%).

Aree meridionali

- Il Mezzogiorno conta 18502 edifici (il 37%). Superano i 1000 fabbricati le province di Napoli e Salerno.
- Il 50% (9311 fabbricati) è collocato in comuni ricadenti nella zona climatica C; il 28% (quasi 5256) in zona D;
 il 14% (2608) in zona B.
- Nella zona prevalente C, circa 5168 edifici sono stati realizzati prima degli anni '70, ulteriori 2152 fabbricati sono sorti dopo il 1981. Circa 1991 appartengono al decennio '70-'80. La medesima distribuzione si osserva nelle altre zone climatiche.
- Complessivamente il 75% degli edifici costruiti prima del 70 è in fabbricato isolato con una quota in crescita nei periodi più vicini (79,4% edifici '70 e '80 e 82,1% edifici post '80).
- Nella zona C il sistema costruttivo prevalente è cemento armato e muratura (72,8%), seguito da muratura portante e laterizio (12,7%) e muratura portante in pietra e mattoni (12%).
- Il 47,2% degli edifici in zona C ha una superficie superiore a 1000 m², quelli con superficie inferiore a 500 m²sono il 22,7% e la restante parte ha superficie compresa tra 500 e 1000 m².

- Oltre il 60%, sempre dei manufatti realizzati in zona C ha due finestre per stanza, il 28,6% ne ha più di due e il 10% ne ha soltanto una. Gli infissi prevalenti sono in alluminio (69,6%) e in quota molto più limitata in legno (13,4%). Prevalentemente viene utilizzato un vetro doppio o triplo (68,5%) rispetto ai singoli. La maggior parte è dotata di schermi esterni (persiane ed avvolgibili).
- Complessivamente nelle regioni del Mezzogiorno il 96% degli impianti di riscaldamento è di tipo tradizionale, e sono alimentati a gas (il 66%) e a gasolio (il 32%). Queste proporzioni cambiano tra le zone climatiche: nella zona C l'alimentazione a gas rappresenta il 59% e quella a gasolio il 39%; nella zona D l'alimentazione a gas rappresenta il 84% e quella a gasolio il 16%. Le tubature sono prevalentemente interne alle pareti.
- In questi edifici l'emissione dell'aria avviene quasi totalmente attraverso radiatori (93%), e in misura inferiore con fan-coil (3,8%) e termoconvettori (9,2%). Il fan-coil è prevalente in zona B. Il 30% degli edifici ha un sistema di condizionamento, soprattutto il condizionatore fisso tipo split (il 85% di coloro che sono dotati di impianto di condizionamento).
- L'utilizzo di fonti rinnovabili interessa l'11% degli edifici, suddivisi essenzialmente tra fotovoltaico 56% e solare termico 44%.

Per ulteriori dettagli e per le tabelle che illustrano i risultati dell'indagine si rimanda al documento completo.

C.3 Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico-media superiore

Nello studio, condotto dal Politecnico di Milano, è stato analizzato il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento di un edificio campione del settore edilizio scolastico.

In particolare, la analisi è stata condotta attraverso i seguenti passi metodologici:

- individuare e caratterizzare un edificio scolastico rappresentativo dello stock edilizio;
- condurre un'analisi approfondita attraverso simulazioni dinamiche del modello d'edificio.
 - o costruire la geometria edilizia campione, opportunamente suddivisa per zone termiche, e definire i componenti costruttivi, i livelli dei carichi interni e i regimi di utilizzo nell'ambiente di simulazione.
 - o individuare gli indici di fabbisogno energetico (energy need) per il riscaldamento e il raffrescamento e confronto con dati bibliografici al fine di verificare il modello;
- sviluppare per diversi contesti climatici italiani (Milano, Roma e Palermo) delle analisi atte a stimare il potenziale di risparmio delle principali tecnologie impiegabili. In particolare sono stati considerati questi campi tecnologici di intervento:
 - o riscaldamento: isolamento termico delle superfici opache, isolamento termico delle superfici trasparenti, riduzione della permeabilità all'aria dell'involucro edilizio, strategie di recupero del calore;
 - o raffrescamento: installazione di protezioni solari e vetrocamere a controllo solare, isolamento delle superfici opache, adozione di strategie di ventilazione meccanica notturna.

Il modello di edificio tipico considerato è per tre diversi contesti climatici italiani (Milano, Roma e Palermo); sono state svolte delle analisi di sensitività atte a stimare il potenziale di risparmio delle principali tecnologie impiegabili. Le azioni di risparmio energetico valutate e il numero delle loro variazioni sono indicate in Tabella 37.

Tabella 37. Tecnologie applicate per la stima del potenziale di risparmio di energia

Categoria energetica	Funzione obiettivo	Caso Base	Tecnologia	Numero variazioni (compreso caso base)	Contesti climatici	
	Fabbisogni energetici		Isolamento termico sup. opache	3		
Riscaldamento	di riscaldamento		Isolamento termico sup. trasparenti	3	2	
Riscaldamento	(con Temperatura di		Permeabilità all'aria dell'involucro	3	3	
Setpoint)	Edificio scolastico	Recupero del calore	3	i		
	Fabbisogni	rappresentativo	Controllo solare	3		
	energetici di	dello stock edilizio	Riflettanza involucro	3		
Raffrescamento raffrescamento (con			Permeabilità all'aria dell'involucro e Ventilazione meccanica notturna	3	3	
	Temperatura di		Isolamento termico supefici opache	3	7	
	Setpoint)		Riduzione carico termico da illuminazione	2		

Nelle simulazioni, si sono considerate le località climatiche di Milano, Roma e Palermo, quali centri considerevoli, come rappresentative in modo medio delle principale condizioni climatiche del territorio Italiano. Di seguito si riportano alcuni parametri sintetici caratteristici dei tre climi (Tabelle 38 e 39).

Tabella 38. Principali parametri climatici – periodo invernale

	Periodo INVERNALE (Novembre - Dicembre - Gennaio - Febbraio)								
Climi	Zona Climatica	Gradi Giorno Invernali	Temperatura media [°C]	Temperatura minima [°C]	Velocità media del vento [m/s]	Umidità relativa media [%]	Irradiazione solare diretta media [Wh/m²]		
Milano	E	2404	2,8	-11,0	0,7	79%	1263		
Roma	D	1415	9,9	-4,0	4,1	79%	2048		
Palermo	В	751	13,9	4,8	4,3	73%	2143		

Tabella 39. Principali parametri climatici – periodo estivo

	Periodo ESTIVO (Giugno - Luglio - Agosto)							
Climi	Zona Climatica (CNR)	Gradi Giorno Invernali	Temperatura media [°C]	Temperatura minima [°C]	Velocità media del vento [m/s]	Umidità relativa media [%]	Irradiazione solare diretta media [Wh/m²]	
Milano	7	482	21,7	32,6	1,0	71%	4855	
Roma	3	568	23,3	31,8	3,3	75%	4918	
Palermo	1	842	25,1	34,0	3,3	74%	6471	

Come edificio di riferimento si è considerato un edificio che per caratteristiche geometriche e dimensionali e per tipologia di spazi e funzioni ospitate possa essere rappresentativo dello stock edilizio scolastico in Italia. Per dimensioni e importanza, in particolare si è considerato un edificio adibito a scuola media superiore.

Si è fatto riferimento ad un edificio reale rispondente a queste caratteristiche, del quale si sono analizzati le dimensioni degli spazi e tutti gli aspetti necessari alle simulazioni, partendo dalla tavole grafiche che lo rappresentano e da rilievi sul campo. In seguito le caratteristiche di dettaglio sono state espresse ed ampliate in modo da rendere l'analisi generale e rappresentativa di questa tipologia edilizia.

L'edificio è uno stabile di grandi dimensioni, ha un'ampia copertura piana e superfici esposte nei diversi orientamenti principali in modo omogeneo. Presenta una buona percentuale di superficie vetrata nella porzione di involucro verticale, sopratutto per i volumi che ospitano le aule e le funzioni correlate e gli uffici amministrativi, come richiesto dalle esigenze di comfort visivo in tali ambienti per le funzioni svolte studio, lettura, laboratori, lavoro di ufficio, etc.).

Il modello sviluppato per i calcoli è stato implementato nell'ambiente di calcolo del software di simulazione energetica dinamica EnergyPlus (versione 5.0, Aprile 2010).

Tutti i parametri del calcolo energetico relativi al modello d'uso e al regime di utilizzo sono stati definiti nei valori tipici per un edificio scolastico rappresentativo del tipo considerato, in accordo alla norme tecniche di riferimento. Sono stati considerati e determinati.

- occupazione dei diversi spazi;
- gli apporti termici interni dovuti a persone, illuminazione artificiale e apparecchiature;
- la presenza e l'uso di protezioni solari (tende, etc.);
- i flussi d'aria per ventilazione ed infiltrazione;
- le temperature di regolazione e gli orari di funzionamento dell'impianto per la climatizzazione estiva ed invernale.

I risultati in termini di richiesta di energia utile per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio base di riferimento, rispettivamente nelle tre condizioni climatiche considerate sono riportate in Tabella 40.

I risultati sono stati normalizzati in funzione della superficie climatizzata. Per questo i risultati relativi al raffrescamento sono divisi per la superficie totale con l'esclusione della superficie relative alla zone della palestra, la quale come si è detto non è raffrescata, ma solo riscaldata.

Tabella 40. Richiesta di energia utile per riscaldamento (Q_H) e Raffrescamento (Q_C) nel caso base

		MIL	ANO	RO	MA	PALERMO		
		QH	QC	QH	QC	QH	QC	
		[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	
Caso Base	-	78,4	3,2	37,0	4,6	13,4	6,4	

Si nota come la richiesta di energia utile per il riscaldamento sia piuttosto elevata e in linea con l'ordine di grandezza relativo allo stock edilizio esistente in Italia.

Allo stesso tempo la richiesta di energia utile per il raffrescamento risulta contenuta nei tre climi considerati. Questo è da ricercare nel fatto che l'edificio presenta uno forma caratterizzata da uno sviluppo prevalentemente in orizzontale, con una considerevole esposizione al terreno: questo consente alla maggior parte delle zone termiche e a quelle più estese di scambiare calore in maniera agevole col terreno, sfruttando la sua temperatura più bassa, nel periodo di raffrescamento, per scaricare in esso il calore indesiderato.

Un altro aspetto che influisce sui risultati in termini di energia utile per il raffrescamento è il regime di utilizzo dell'edificio considerato, tipico delle strutture scolastiche: nel periodo dal 15 Giugno al 15 Settembre gran parte delle zone termiche dell'edificio non è utilizzata dagli occupanti e non c'è richiesta di raffrescamento all'impianto di climatizzazione, per la chiusura estiva della scuola. Pertanto, in corrispondenza del periodo più caldo dell'anno nei climi italiani, non si ha richiesta di raffrescamento.

Lo stesso ragionamento può essere fatto anche in riferimento all'orario giornaliero, gran parte dell'edificio è utilizzato dalle ore 7 alle ore 14, evitando alcune delle ore del pomeriggio.

È da considerare come regimi di utilizzo diversi da quelli tipici per un edificio scolastico che si è cercato di rappresentare possono portare a risultati differenti anche per la richiesta di energia utile per il raffrescamento: ad esempio l'utilizzo più frequente di spazi scolastici quali aule e auditorium in orari non scolastici per attività non attribuibili alla scuola stessa, ma per servizi e spazi richiesta dalla collettività, potrebbero portare ad aumentare le ore di funzionamento dell'impianto di climatizzazione in regime estivo, con un conseguente aumento della richiesta di energia utile per il raffrescamento.

Sono state quindi valutate le azioni di miglioramento delle prestazioni energetiche. In Tabella 41 vengono descritte le variazioni apportate all'edificio base, di riferimento.

In generale, si sono considerate azioni applicabili in modo diffuso sia in edifici di nuova costruzione che in edifici esistenti, nei quali si interviene con opere di ristrutturazione e riqualificazione.

Per questo ad esempio, nell'azione di miglioramento dell'isolamento termico delle superfici opache, si è considerato di applicare l'isolamento termico in tutti i componenti edilizi opachi dell'involucro edilizio, ad eccezione del basamento, dove l'applicazione dell'isolamento termico, in edifici esistenti, è più difficoltoso e meno frequente, per le difficoltà operative e i limiti di ingombro e di riduzione delle altezze nette dei locali al piano terra. Inoltre, nello specifico, si è visto che il contatto col terreno di un'ampia porzione della superficie dell'edificio, per mezzo di superfici che consentano lo scambio termico con il terreno stesso, nonostante porti ad un aumento delle dispersioni invernali, porta anche ad una riduzione della richiesta di energia utile per il raffrescamento.

Nel caso del recupero di calore nella ventilazione meccanica si è deciso di utilizzarlo solo nel periodo di riscaldamento, con l'applicazione di un bypass che evita l'attivazione del sistema di recupero nel periodo estivo. Infatti, alcune simulazioni condotte hanno mostrato che l'applicazione di un recuperatore di calore in periodo di raffrescamento, nelle condizioni considerate, generalmente porta ad una aumento della richiesta di energia utile per il raffrescamento, dovuta al fatto che si riduce l'effetto positivo del raffrescamento offerto dal flusso di aria esterna, nei periodi in cui l'aria esterna ha temperatura minore dell'aria interna e si hanno esigenze di raffrescamento negli ambienti interni.

Tabella 41. Azioni applicate per il miglioramento delle prestazioni energetiche

AZIONI		VARIAZIONI					
DESCRIZIONE	CODICE	NOTE	VALORI			U.M.	
		pareti esterne	1.10			W/(m ² K)	
	-	copertura		1.41		W/(m ² K)	
		solaio su terreno		2.83		W/(m ² K)	
Isolamento termico		pareti esterne	0.34 Milano	0.36 Roma	0.48 Palermo	W/(m ² K)	
superfici opache	0	copertura e solaio su spazio aperto	0.30 Milano	0.32 Roma	0.38 Palermo	W/(m ² K)	
		solaio su terreno		2.83		W/(m ² K)	
		pareti esterne		0.20		W/(m ² K)	
	+	copertura e solaio su spazio aperto		0.20		W/(m ² K)	
		solaio su terreno		2.83		W/(m ² K)	
	-	finestre		5.74		W/(m ² K)	
Isolamento termico superfici trasparenti	0	finestre	2.20 Milano	2.40 Roma	3.00 Palermo	W/(m ² K)	
	+	finestre		1.10		W/(m ² K)	
Permeabilità all'aria	-	n ₅₀		2.50		1/h	
dell'involucro	0	n ₅₀	1.00			1/h	
dell'illivolucio	+	n ₅₀		0.60		1/h	
Recupero del calore	-	efficienza recuperatore	0			%	
nella ventilazione meccanica	0	efficienza recuperatore 60			%		
Hella Veritilazione meccanica	+	efficienza recuperatore		80		%	
	-	fattore solare	0.85			-	
Controllo solare	0	fattore solare		0.30		-	
	+	fattore solare		0.15		-	
	-	-	0.10			-	
Riflettanza copertura	0	-		0.50		-	
	+	-		0.70		-	
	-	-		0.00		1/h	
Ventilazione meccanica notturna	0	-		1.75			
	+	-	6.00			1/h	
Riduzione carico termico da	-	-		9		W/m ²	
illuminazione	+	-		7		W/m ²	

Di seguito si presentano i risultati dello studio, in particolare in termini di richiesta di energia utile (energy need) rispettivamente per il riscaldamento e il raffrescamento.

Tabella 42. Richiesta di energia utile per riscaldamento (Q_H) e raffrescamento (Q_C)

		MILANO		RO	MA	PALERMO	
AZIONE IMPLEMENTATA		ROMA [kWh/(m³a)]	PALERMO	Q _H	Qc	Q _H	Qc
AZIONE IMPLEIMENTATA	AZIUNE IMPLEMENTATA		[kWh/(m³a)]	[kWh/(m³a)]	[kWh/(m³a)]	[kWh/(m³a)]	[kWh/(m³a)]
Caso Base	-	78.4	3.2	37.0	4.6	13.4	6.4
Isolamento termico sup. opache	0	60.2	2.6	29.6	3.7	11.4	5.0
isolamento termico sup. opacne	+	57.8	2.6	28.3	3.7	10.7	4.8
Isolamento termico sup. trasparenti	О	72.6	3.1	34.9	4.3	12.7	6.3
isolamento termico sup. trasparenti	+	70.0	3.1	33.1	4.5	12.0	6.3
Permeabilità all'aria dell'involucro	0	65.8	3.6	31.1	5.2	10.9	7.2
Permeabilità all aria dell'ilivolucio	+	62.4	3.7	29.5	5.4	10.2	7.5
Recupero del calore nella ventilazione	0	63.8	3.2	28.8	4.6	9.3	6.4
meccanica	+	59.0	3.2	26.0	4.6	8.0	6.4
Controllo solare	0	78.4	1.7	37.0	2.6	13.4	3.5
Controllo solare	+	78.4	1.2	37.0	1.9	13.4	2.5
Diffettanza conortura	0	75.9	2.8	36.2	4.1	13.4	5.5
Riflettanza copertura		74.1	2.5	35.7	3.6	13.4	4.8
Ventilazione meccanica notturna	0	78.4	2.7	37.0	3.9	13.4	5.6
ventilazione meccanica notturna		78.4	2.2	37.0	3.1	13.4	4.8
Riduzione carico termico da illuminazione	0	79.1	3.2	37.5	4.6	13.7	6.3

Per maggiori dettagli sui risultati si rimanda ai grafici riportati nel rapporto completo.

C.4 <u>Indici di benchmark di consumo per tipologie di edifici ad uso scolastico - Analisi delle prestazioni energetiche</u> di un parco edifici del terziario

L'attività di calcolo dei benchmark è stata svolta attraverso un set di simulazioni dinamiche condotte su edifici-tipo collocati nel contesto climatico italiano. E' stato inoltre realizzato uno studio per la definizione di indici di applicabilità e di potenzialità di componenti di impianto innovative, con particolare riferimento al contenimento dei consumi elettrici in fase d'uso.

 Analisi delle prestazioni energetiche di un parco edifici del terziario (Politecnico di Milano, campus Città Studi e campus Bovisa), con particolare riferimento al potenziale di riduzione degli consumi elettrici in fase d'uso

È stato condotto uno studio finalizzato a valutare diversi scenari di riduzione degli sprechi energetici a seguito di interventi mirati ad una gestione "comfort on demand" dell'energia erogata negli spazi del parco edifici del Politecnico di Milano.

Nell'abitare gli edifici, infatti, sono diversi i comportamenti abituali dell'utenza che comportano inutili sprechi di energia. Ad esempio: l'illuminazione artificiale viene inizialmente attivata quando se ne presenta la necessità, ma non è abitudine diffusa la disattivazione della stessa dal momento in cui la disponibilità di illuminazione naturale sia aumentata fino a garantire, senza necessità di alcuna integrazione "artificiale", un sufficiente livello di illuminamento degli spazi. Oppure, sovente capita di uscire dal proprio ufficio, per un intervallo di tempo più o meno prolungato, dimenticando di disattivare il sistema di illuminazione artificiale. E ancora, i dispositivi di oscuramento, attivati quando la radiazione solare diretta comporta abbagliamento agli occupanti, raramente vengono disattivati nel momento in cui la causa del discomfort non è più presente (e l'illuminazione artificiale resta attivata). Molteplici potrebbero essere anche gli esempi di "abusi" che comportano maggiori consumi per il riscaldamento o il raffrescamento degli ambienti: finestre aperte per ricambiare l'aria con terminali dell'impianto di condizionamento attivati (il che comporta, tra l'altro, il perdurare dei ricambi d'aria oltre lo stretto necessario visto che la compensazione termica data dai terminali attivi ritarda la sensazione di discomfort che "ricorda" all'utente di chiudere le finestre), ambienti condizionati senza presenza di persone, ecc. Tali aspetti, troppo spesso trascurati, sono in realtà responsabili di effetti energetico-ambientali assai rilevanti.

I comportamenti degli utenti sono prevalentemente riconducibili ad atteggiamenti di noncuranza da parte degli utenti e sono anche dovuti alla mancanza di adeguati sistemi di regolazione e controllo dell'erogazione energetica locale. Ad esempio, capita spesso di trovarsi in un ambiente eccessivamente riscaldato, privo di termostato di regolazione autonomo, e di dover provvedere al "raffrescamento" aprendo le finestre della stanza. Oppure di disporre di un solo interruttore che comanda la totalità dei corpi illuminanti presenti in ambiente quando, diversamente, in alcune giornate o momenti della giornata, sarebbe sufficiente attivare parzialmente le lampade per raggiungere il livello di illuminamento desiderato.

Ai fini del presente studio è stata condotta una prima indagine-pilota negli ambienti interni ai ventisette edifici del Campus Leonardo, Bonardi, Bassini e Golgi Clericetti (per un totale di circa 3700 ambienti), successivamente estesa ai 30 edifici del Campus Bovisa (Durando e La Masa) con lo scopo di poter stimare il potenziale di riduzione degli sprechi energetici (per altri 3200 ambienti circa).

L'indagine effettuata sulle caratteristiche d'uso e sulle dotazioni impiantistiche-tecnologiche degli ambienti considerati, ha portato alla definizione di un elevato numero di informazioni che, per esigenze di praticità, sono state organizzate in un database su supporto informatico, ad integrazione di quello già in possesso dell'Area Tecnico Edilizia. La struttura dinamica del database è stata concepita per consentirne successivi aggiornamenti ed implementazioni.

Sulla base dei dati rilevati è stato possibile individuare le principali cause di sprechi di energia e definire possibili strategie di intervento mirate al miglioramento funzionale delle dotazioni impiantistiche a livello di singolo ambiente.

In funzione delle caratteristiche degli ambienti analizzati, e delle strategie di riduzione dei consumi ipotizzate, è stato possibile valutare il potenziale risparmio energetico e la riduzione delle emissioni ad effetto serra conseguibili. Infine, l'analisi ha consentito di individuare le migliori strategie di intervento dal punto di vista dei tempi di ritorno dell'investimento, al fine di suggerire le priorità d'azione da contemplare nella pianificazione economica di gestione e manutenzione del parco edifici in esame.

o Definizione di un metodo di stima dell'indice "stato medio energetico" di un parco edilizio al fine di individuare le priorità di intervento mirate al contenimento degli consumi energetici dei singoli edifici

Di seguito si riassume per punti la metodologia impiegata per determinare lo stato medio energetico.

- gli spazi costituenti il patrimonio edilizio in esame sono stati raggruppati come primo livello in quattro macro categorie: aule, uffici, spazi comuni, locali tecnici. Per ognuna delle differenti macro-destinazioni d'uso sono state esaminate le strategie di intervento possibili agli effetti della riduzione dei consumi energetici.
 I diversi interventi sono stati quindi classificati in relazione al potenziale di riduzione del fabbisogno di energia primari per: il riscaldamento (H heating); il raffrescamento (C cooling); l'illuminazione (L lighting);
- 2. per ognuna delle quattro macro-destinazioni d'uso sono stati individuati gli ambienti-tipo aventi caratteristiche medie rappresentative del patrimonio edilizio del Politecnico di Milano (Campus Città Studi e Campus Bovisa);
- 3. per ognuno dei quattro ambienti rappresentativi si è determinato lo stato dei sistemi di attivazione e gestione delle forniture energetiche locali, in relazione al massimo potenziale di riduzione del fabbisogno di energia primaria ottenibile attraverso l'applicazione delle strategie di intervento esaminate;
- 4. è stata definita una scheda per il confronto tra lo stato medio dei sistemi di attivazione dell'ambiente di riferimento e lo stato specifico dell'ambiente in esame. La scheda, rappresentante lo stato medio energetico, consente di ottenere un punteggio sintetico che indica di quanto l'ambiente in esame si discosta dall'ambiente di riferimento
 - Simulazioni dinamiche di edifici-tipo al fine di definire i benchmark cui riferire il potenziale dato dagli interventi di contenimento dei consumi

Lo studio svolto intende contribuire ad individuare metodi e sistemi per l'ottimizzazione energetica del sistema edificio impianto del parco nazionale. A tale scopo sono state svolte delle simulazioni dinamiche su modelli edilizi ad uso ufficio riconducibili a edifici esistenti e a nuovi edifici, al fine di confrontarne le prestazioni ed evidenziarne le criticità.

La metodologia utilizzata per svolgere l'analisi, in particolare, può riassumersi nei seguenti punti:

- individuazione dei dati climatici appropriati al fine di ricondurre le analisi alla variabilità delle condizioni nazionali;
- definizione di un edificio-tipo su cui effettuare le analisi al variare dei parametri caratterizzanti;
- definizione di un set di varianti da applicare all'edificio-tipo sulla base di specifiche tecnologie costruttive, assegnate per diversa epoca di costruzione e collocazione sul territorio nazionale;
- valutazione dei fabbisogni per la climatizzazione dei modelli tramite simulazioni dinamiche effettuate con il software TRNSYS;
- implicazioni sui consumi energetici riconducibili agli impianti di climatizzazione, facendo riferimento ad una tipologia-base convenzionale, secondo l'approccio standard riportato nelle specifiche tecniche UNI TS 11300-2 e -3.

Dettagli sulle caratteristiche dell'edificio-tipo si rimanda al rapporto completo redatto dal Politecnico di Milano.

Al fine di considerare una generica prestazione impiantistica, si è fatto riferimento alle modalità di valutazione dei rendimenti delle componenti dell'impianto e dei consumi elettrici dovuti agli ausiliari suggerite dalla specifica tecnica UNI TS 11300.

Come impianto convenzionale è stato considerato un sistema a ventilconvettori a 4 tubi, dedicati a riscaldamento e raffrescamento, alimentati da caldaia a gas e da macchina frigorifera centralizzati.

Per quanto riguarda l'impianto di riscaldamento, sono stati ipotizzati sistemi di generazione e distribuzione diversi a seconda dell'epoca di costruzione dell'edificio, sulla base dei dati di riferimento riportati all'interno della UNI TS 11300-2.

Per il raffrescamento è stato ipotizzato l'utilizzo di rete di distribuzione, terminali di emissione e sistema di regolazione analoghi a quanto ipotizzato per il riscaldamento, assumendo quindi i dati di riferimento riportati all'interno della UNI TS 11300-3. Per quanto riguarda la macchina frigorifera, diversamente, la specifica tecnica prevede una valutazione del rendimento mensile basata sulle curve di efficienza fornite dai produttori: per generalizzare, ai fini del presente studio, è stato assegnato un coefficiente di prestazione stagionale pari a 2. La valutazione dei consumi elettrici dovuti agli ausiliari della macchina frigorifera è stata svolta su base mensile in relazione alla taglia del frigorifero, alle ore di funzionamento e al fattore di carico dell'impianto, come indicato dalla specifica tecnica.

Per ricondurre ai consumi elettrici dovuti agli ausiliari per emissione e distribuzione (ventilatori dei ventilconvettori e pompe di circolazione del sistema idronico) sono stati stimati (per ciascun ufficio): portata d'aria media di 300 m³/h; portate di fluido vettore di 900 dm³/h durante il periodo di riscaldamento e di 700 dm³/h durante il periodo di raffrescamento.

Il fabbisogno di climatizzazione della stagione invernale e di quella estiva degli edifici simulati è stato valutato sull'intero arco dell'anno, non vincolando alle limitazioni del periodo di riscaldamento ex D.P.R. 412, in modo analogo a quanto previsto dalla specifica tecnica UNI TS 11300-1 per valutazioni adattate all'utenza.

Sulla scorta di questo approccio, al fine di agevolare eventuali estrapolazioni volte ad estendere i risultati dello studio a specifiche località di cui siano noti i dati climatici orari, sono stati calcolati i valori di gradi-giorno di riscaldamento (base 20°C) e di raffrescamento (base 26°C) per le tre località considerate Milano, Roma e Palermo). Per includere l'effetto climatico dovuto alla radiazione solare, è stato utilizzato, quale valore di temperatura esterna di riferimento, il dato di temperatura aria-sole calcolata su superficie orizzontale.

Le simulazioni del fabbisogno termico dell'edificio, e le conseguenti valutazioni di consumi energetici relativi al sistema edificio-impianto, sono state effettuate impostando la domanda termica e frigorifera per i soli intervalli di occupazione dell'edificio, mentre per le restanti ore il sistema edilizio è stato considerato in condizioni di free-floating.

La prima valutazione di confronto tra le tecnologie costruttive considerate è stata effettuata sulla base del fabbisogno di energia termica o frigorifera richiesto dagli edifici per mantenere le condizioni ambientali interne nominali (20°C e 26°C di temperatura dell'aria rispettivamente per riscaldamento e raffrescamento, durante gli orari di occupazione). I risultati delle simulazioni su base annua sono riportati nei grafici seguenti (Figure 191-192).

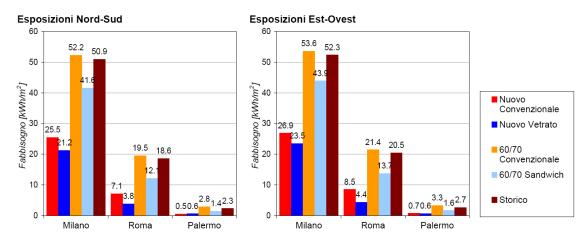


Figura 191. Fabbisogno di riscaldamento, in kWh/m², per le diverse tipologie di edificio considerate

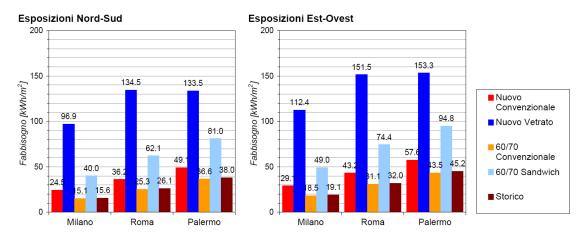


Figura 192. Fabbisogno di raffrescamento, in kWh/m2, per le diverse tipologie di edificio considerate

Allo scopo di valutare quali differenze prestazionali estive possano essere riconducibili all'utilizzo di elementi ombreggianti, è stato effettuato un approfondimento d'analisi per l'installazione di veneziane mobili interne ed esterne sul caso "edificio convenzionale di nuova costruzione".

I dimensionamenti dei generatori degli impianti di climatizzazione sono stati effettuati applicando un fattore 1,5 rispetto al picco della domanda rilevato con le simulazioni dinamiche degli edifici. In Figura 193 e 194 sono riportati rispettivamente i dimensionamenti relativi ai gruppi termici per il riscaldamento invernale e ai gruppi frigoriferi per il raffrescamento estivo.

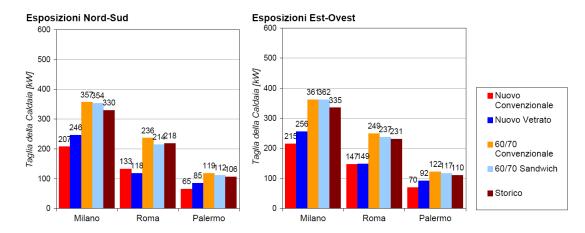


Figura 193. Taglie delle caldaie richieste dalle diverse tipologie di edificio considerate

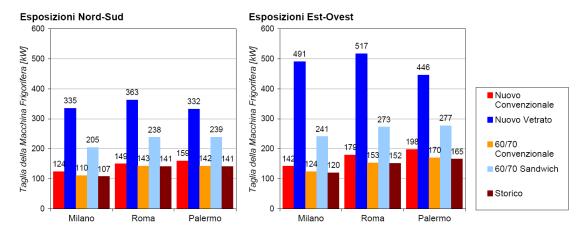


Figura 194. Taglie delle macchine frigorifere richieste dalle diverse tipologie di edificio considerate

A partire dai valori di fabbisogno energetico determinati con le simulazioni dinamiche TRNSYS, sono stati elaborati i valori di consumo di energia, per il riscaldamento invernale e per il raffrescamento estivo, secondo l'impiantistica di base descritta in precedenza, avvalendosi dell'approccio standard contemplato dalle specifiche tecniche UNI TS 11300-2 e UNI TS 11300-3. Sulla base della medesima specifica tecnica, sono stati inoltre valutati i consumi di energia elettrica dovuti agli ausiliari degli impianti di climatizzazione, oltre a quelli dovuti ad illuminazione e alle apparecchiature elettriche.

Valutazioni di dettaglio sono state infine effettuate sulla composizione dei consumi elettrici dovuti agli ausiliari d'impianto, per evidenziare la quota relativa al sistema di generazione frigorifera: se da un lato, infatti, i consumi elettrici per la distribuzione (pompe di circolazione) ed emissione (ventilatori dei ventilconvettori) sono simili per entrambe le stagioni di riscaldamento e raffrescamento, quelli associati alla generazione termica e frigorifera (ventilatori del condensatore) cambiano molto.

Le elaborazioni condotte nel complesso non pretendono di dare una visione esaustiva del comportamento energetico degli edifici del terziario del parco nazionale, ma possono contribuire a determinare un punto di partenza da cui muovere ulteriori approfondimenti. Il parco edifici italiano è variegato sia dal punto di vista degli involucri edilizi che da quello impiantistico, e presenta particolari criticità connesse ai casi in cui siano presenti ampie superfici vetrate, anche nel caso di nuove costruzioni. Con le tipologie edilizie contemplate nello studio si è voluto calibrare un set di indici di benchmark energetici rappresentativi di situazioni estreme ed intermedie (dalle epoche storiche, alle condizioni climatiche, all'estensione della quota di superficie trasparente dell'involucro): dagli esiti di queste valutazioni potrebbero essere desunti, con interpolazioni di prima analisi, valori energetico-prestazionali riconducibili ad altri casi (diverse soluzioni edilizie o contesti climatici). La metodologia illustrata potrebbe inoltre essere adottata per estendere la matrice delle simulazioni dettagliate (ad esempio, contemplando specifiche tipologie impiantistiche).

Nel seguito si riportano alcuni grafici esemplificativi da cui poter estrapolare valori di fabbisogno termico per altre località climatiche, con riferimento ai Gradi Giorno nominali (ex D.P.R 412) o a quelli desumibili, contemplando l'apporto di radiazione solare, dai dati climatici orari.

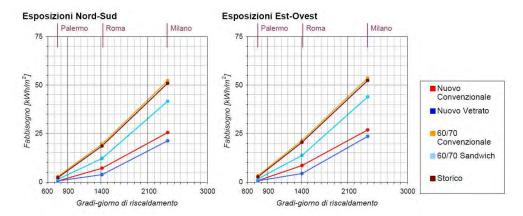


Figura 195. Fabbisogno di riscaldamento, in kWh/m², in funzione dei gradi-giorno invernali ex D.P.R. 412 per le diverse tipologie di edificio considerate

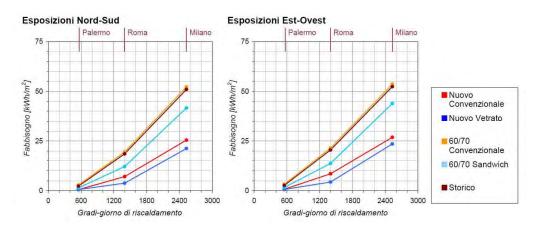


Figura 196. Fabbisogno di riscaldamento, in kWh/m², in funzione dei gradi-giorno invernali per le diverse tipologie di edificio considerate

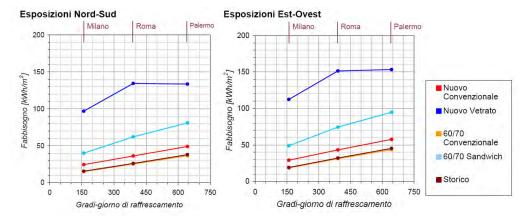


Figura 197. Fabbisogno di raffrescamento, in kWh/m², in funzione dei gradi-giorno estivi per le diverse tipologie di edificio considerate

C.5 Riqualificazione di edifici scolastici: risultati di una campagna di monitoraggio energetico

Le problematiche relative alla diagnosi energetica degli edifici esistenti risultano essere di maggiore importanza nel caso di edifici pubblici ed in particolare nel caso degli edifici scolastici là dove un uso più efficace dei vettori energetici comporta sicuri vantaggi ai bilanci delle amministrazioni pubbliche.

L'indagine svolta dall'Università di Venezia si propone non solo di valutare le condizioni degli edifici analizzati e di delineare le strategie di riqualificazione energetica più efficaci, ma soprattutto di sperimentare una metodologia di rilievo semplificato per poterla riproporre in situazioni simili.

Oggetto dell'indagine sono stati edifici scolastici del Veneto i quali sono stati sottoposti ad una serie di rilievi e misure ad opera di squadre di operatori appositamente addestrati.

Utilizzando le normali documentazioni cartacee in possesso degli enti proprietari ed integrandole con un set limitato di informazioni raccolte sul campo, una coppia di tecnici ha quindi svolto autonomamente il rilievo della situazione energetica di ciascun edificio.

Tramite un attento sopralluogo sono stati completati i dati dimensionali, registrate la consistenza e la qualità degli infissi, annotate la presenza di infiltrazioni e lesioni sulle pareti e stimate le caratteristiche degli elementi di involucro opaco. Ciò ha permesso di implementare un foglio di calcolo Ecodomus con cui modellare il comportamento energetico dell'edificio, considerando anche le dispersioni per ventilazione. Oltre all'ispezione visiva, che permetteva di esaminare l'efficienza di ogni singolo componente come richiesto dalla scheda di valutazione, per ogni complesso edilizio si è proceduto anche realizzare:

- due serie di termografie prima in regime estivo e poi in regime invernale per valutare il comportamento dell'involucro;
- un test di tenuta all'aria dell'involucro (Blower door test) eseguito in un locale campione;
- alcune indagini endoscopiche, per controllare la corrispondenza fra le stratigrafie effettive delle chiusure opache e quelle di progetto,
- misure a campione con termoflussimetri in camera climatizzata, per realizzare una differenza di temperatura costante e mettere in equilibrio le misure effettuate sulle due superfici;
- misure a campione con rilevazione in continuo di temperatura e umidità per la durata di 30 gg consecutivi, per valutare il grado di comfort interno e il comportamento del sistema di immissione del calore (terminale di impianto) e del sistema di regolazione;
- misure di qualità dell'aria interna (concentrazione di CO₂) in alcuni edifici.

Il campione di edifici analizzato è realmente significativo della situazione del patrimonio scolastico della regione Veneto sia per la numerosità del campione che per la collocazione geografica delle scuole. Nella maggior parte dei casi si sono evidenziati non solo problemi comuni (scarsità di isolamento, vetri da sostituire, impianti da riadattare,. ..), ma si sono pure rese evidenti le differenze tra i singoli casi. Vi sono cioè edifici nei quali è evidente l'azione sull'involucro (vetri con trasmittanze più basse rispetto alla media, nei quali è stato possibile effettuare un'opera di riqualificazione edilizia) o sull'impianto (sostituzione dei generatori o migliorie impiantistiche che in più di qualche caso hanno consentito di ottenere rendimenti medi stagionali superiori al valore limite di legge). In questo secondo caso è bene ricordare comunque che l'intervento sulla struttura è ben più efficace oltre che durevole eliminando la causa della dispersione termica "alla fonte". Dallo screening energetico è emerso che le scuole disperdono annualmente tra i 250 kWh/m² e i 350 kWh/m² (media 290 kWh/m²), equivalenti ad un consumo annuo di energia di circa 40 €/m². Ciò significa che in Veneto il 95% degli edifici scolastici se fosse certificato risulterebbe in classe energetica G (classificazione proposta da Ecodomus), la peggiore, e il restante 5% arriverebbe non oltre la classe F.

Tali indici sono comprensivi anche del fabbisogno di acqua calda sanitaria che è calcolato sulla base delle persone che frequentano la scuola. Tuttavia altrettanto interessante è il valore medio del fabbisogno dell'edificio calcolato sulla base delle necessità di solo riscaldamento dell'involucro che è di circa 84 kWh/(m² anno) riferito al clima reale. La conferma della difficoltà di realizzare buoni valori relativamente alle dispersioni, viene esaminando la struttura edilizia: la trasmittanza media della struttura edilizia è superiore a 1 W/(m²K), precisamente 1,25 W/(m²K). E' evidente la necessità di intervenire sulle strutture, coperture e finestre, in particolare tali risultano essere gli interventi da realizzare nella maggior parte delle scuole (circa il 75%).

Più definita la situazione relativa agli impianti: in questi casi intervenire può essere più semplice e comunque può riportare il rendimento entro i valori di legge, come succede nel 15% dei casi analizzati. La sostituzione del generatore consente per esempio l'adozione di generatori ad elevato rendimento di produzione, il miglioramento della distribuzione di energia termica e, in qualche caso, anche dell'emissione interna ai locali. A questo proposito è necessario ribadire l'utilità delle misure in situ che hanno, limitatamente ad alcune scuole, evidenziato quali problemi possano sopraggiungere da un errato posizionamento dei corpi scaldanti (radiatori, mobiletti, ecc.) o da un'insufficiente informazione fornita all'utente (riscaldamento acceso durante i periodi di chiusura della scuola). In molti casi sono stati evidenziati fenomeni di surriscaldamento dovuto all'errata posizione delle sonde termostatiche interne o alla disinformazione dell'utente su come impostare i termostati di zona. Interventi necessari riguardano quindi le strutture (coperture e superfici vetrate) e gli impianti (manutenzione ordinaria ed eventuale sostituzione di generatori sovradimensionati). Questi interventi possono comportare risparmi sui consumi stimabili attorno al 20%.

Dalla stessa indagine, la qualità dell'aria risulta scarsa nel 97% delle aule prive di sistema di ventilazione meccanico e solo nel 13% di quelle con sistema di ventilazione installato. Nelle nostre scuole tale problema non è minimamente affrontato. La quantità di energia dedicata alla ventilazione non sarà per nulla trascurabile e le soluzioni dovranno essere compatibili con le caratteristiche degli edifici (spesso vincolati). Di fondo resta un'amara constatazione sullo stato del patrimonio scolastico: la maggior parte degli edifici sono vecchi e non hanno molto margine per migliorie significative del loro comportamento energetico senza stravolgerne l'architettura o la funzionalità. Può sembrare paradossale fornire indicazioni per la buona progettazione quando si ha a che fare con un patrimonio edilizio scolastico consolidato e consistente, ma è necessario precisare quali sono le scelte che il progettista deve porre come prioritarie. Per i vetri, ad esempio, l'uso di sistemi 4-12-6 (con argon nella intercapedine) garantisce il raggiungimento di prestazioni termiche di eccellenza [Ug = 1,5 W/(m² K); fattore solare g = 0,62; trasmissione luminosa tv = 0,69] oltre a favorire l'attenuazione del rumore esterno e permettere il raggiungimento dei valori di richiesti dal D.P.C.M. 5/12/1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" (categoria E) relativamente a indice dell'isolamento acustico standardizzato di facciata (D2m,nT,W) pari a 48 dB. Anche buoni telai metallici sono garantiti per trasmittanza pari a Uf = 1,8 W/(m^2 K) e quindi la trasmittanza complessiva del sistema vetro-telaio è di assoluto rilievo. Inoltre con tale scelta ci si propone di ridurre in modo adeguato l'apporto solare a circa il 60% riducendo, dove possibile, gli apporti solari estivi. Si prevede comunque di utilizzare anche un sistema di schermatura necessario per ridurre gli apporti solari, così come espressamente richiesto dalla legislazione nazionale (comma 10, all. I del D.Lgs. 311/2006 e DPR 59/2009).

Un'ulteriore notazione riguarda l'attenzione ai ponti termici, in particolare alla correzione dei ponti termici dovuti all'attacco a terra, ai solai interpiano, all'introduzione delle finestre nel perimetro esterno e alla giunzione parete verticale - copertura. L'attenuazione dei ponti termici può consentire di ridurre l'entità delle dispersioni la percentuale delle quali può arrivare al 15% del totale. La centrale tecnica dovrebbe essere dedicata alla produzione di calore oltre a quella del freddo. La scelta del generatore può cadere su moduli termici a condensazione il cui rendimento di produzione è elevato e, soprattutto, rispetta i vincoli imposti dal D.P.R. 15 novembre 1996, n. 660 in attuazione della direttiva 92/42 CEE oppure si può optare per pompe di calore geotermiche. La regolazione impiantistica dovrebbe avvenire con sonda esterna e clima di ogni singola aula al fine di ottimizzare la prestazione del sistema di regolazione evitando sprechi energetici. Il sistema di emissione a bassa temperatura: mobiletti ventilconvettori ogni singola aula consentirebbe al singolo utente una migliore regolazione delle condizioni di comfort interno. L'apporto di aria di rinnovo consentirebbe di ridurre i rischi di produzione di condensa in estate. L'aria di ripresa dovrebbe essere inviata ad un recuperatore termico per permettere un opportuno risparmio energetico: si stima di poter recuperare almeno il 60% dell'entalpia dell'aria in uscita. La prestazione delle singole macchine termiche dovrebbe essere conforme ai requisiti prestazionale di legge (rendimento minimo medio stagionale per il sistema di riscaldamento); è opportuno valutare comunque la prestazione stagionale delle macchine frigorifere che deve essere in linea con i valori prescritti dalla Decisione della Commissione Europea che stabilisce i criteri ecologici per l'assegnazione del marchio comunitario di qualità ecologica alle pompe di calore elettriche, a gas o ad assorbimento funzionanti a gas.

Le elaborazioni dei dati rilevati ha permesso di valutare gli interventi più appropriati: per ogni edificio sono state elaborate e fornite all'Amministrazione proprietaria quattro strategie di intervento, che prevedevano, oltre alla sostituzione dei serramenti dove necessaria, l'introduzione di sistemi di ventilazione meccanica con recuperatore, l'isolamento con cappotto termico, la risoluzione dei ponti termici (più facile se accoppiata alla sostituzione del serramento), l'isolamento della sola copertura. Ogni strategia è stata associata ad un indice di costo (in €/m² di superficie utile dei locali) e ad una valutazione dei tempi di ritorno degli investimenti, commisurati ai risparmi di combustibile ottenibili. Ad esempio, affrontando la riqualificazione energetica di un edificio scolastico secondo la "strategia verde", la migliore fra quelle considerate, si può ottenere fino al 60% di risparmio: con l'isolamento degli involucri opachi, (applicazione di 8 cm di isolamento in parete e 10 cm in copertura in posizione adatta a risolvere i ponti termici) si riducono i consumi di circa il 30%; la sostituzione dei vecchi serramenti con componenti aventi prestazioni conformi alla normativa vigente contribuisce per un ulteriore 10% e l'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata dotati di recuperatori efficienti migliora le prestazioni di un ulteriore 20%, permettendo di raggiungere un indice medio di circa 110 kWh/m² anno contro gli attuali 290. I costi stimati sono dell'ordine di 300-350 €/m² di superficie calpestabile (isolamento 50 €/m²; serramenti 150 €/m² ventilazione 120 €/m²), con un tempo di ritorno dell'investimento di 12-14 anni.

C.6 <u>indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso commerciale grande distribuzione, applicabilità</u> di tecnologie innovative nei diversi climi italiani

Nello studio, condotto dall'Università di Roma Tre, sono stati analizzati due casi di edifici del commerciale adibiti alla grande distribuzione. Le analisi svolte sono state condotte su casi reali in cui è stato possibile ottenere dai gestori i dati di consumo ed il profilo di utenza giornaliero per il funzionamento delle strutture.

L'analisi è stata effettuata seguendo una metodologia che fa riferimento al quadro normativo vigente ed è stato sviluppata con il supporto di schede di indagine e rilievi in situ per determinate quelle grandezze e i valori di stratigrafia che la committenza non disponeva.

Nel rapporto completo sono dettagliate e descritte le fasi di indagine e riportate le tabelle di sintesi dei dati raccolti o desunti per lo studio di tre centri commerciali siti nel comune di Roma. In particolare sono stati scelti un centro commerciale con galleria dove affacciano i negozi e con parcheggio interrato e due centri di tipologia ben diversa e di dimensioni nettamente inferiori, concepiti come una serie di negozi circondati da un ballatoio.

Per il primo edificio sono state prese in esame le parti comuni ovvero quelle zone di libero passaggio all'interno del centro commerciale che sono "condominiali". I consumi si riferiscono all'impianto d'illuminazione, alle 6 scale mobili, i 9 ascensori condominiali e l'impianto di condizionamento mentre per i comparti si fa riferimento ad un costo medio di spesa annuale preso a campione.

C.7 Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso grande distribuzione commerciale

L'analisi condotta dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Roma La Sapienza è finalizzato a caratterizzare l'assorbimento energetico degli edifici ad uso distribuzione commerciale mediante l'individuazione di indicatori di consumo che tengano conto anche della zona climatica.

Il lavoro di ricerca ha avuto l'ulteriore scopo di valutare se è possibile individuare un eventuale legame tra i consumi di energia e le caratteristiche tecniche dell'involucro edile. Si è voluto inoltre verificare la possibilità di stilare un modello di calcolo per la previsione degli assorbimenti di energia da parte di un fabbricato ad uso ufficio.

Il primo passo della ricerca ha inteso individuare gli addetti al monitoraggio ed alla gestione dei consumi all'interno delle aziende. In generale, si tratta degli Energy Manager (EM). In base agli elenchi disponibili di EM ed in seguito a ricerche effettuate ad hoc, sono stati individuati gli addetti alla gestione energetica di numerosi enti italiani (pubblici e privati). Ovviamente, la presenza di un EM è costosa per l'azienda, quindi, le strutture che si dotano di questa figura sono situate nella maggior parte dei casi nella fascia alta dei livelli integrali dei consumi.

Individuati i destinatari dell'indagine, si è proceduto con la raccolta dati mediante richiesta di compilazione di un questionario da parte dei singoli responsabili e degli EM. Scopo complementare dell'opera era anche quello di instaurare con gli EM un rapporto di collaborazione point-to-point; ciò al fine di istituire un canale bidimensionale stabile per lo scambio di dati.

I dati raccolti sono stati successivamente ordinati all'interno di un database *Excel*, dove, per ogni edificio preso in analisi, sono stati memorizzati i dati relativi. Per ogni unità sono stati archiviati tutti i dati di consumo elettrico e termico, quelli relativi all'occupazione, agli utilizzatori ed alla struttura. Infine i dati sono stati processati e sono state dedotte numericamente le grandezze che descrivono i fenomeni di assorbimento elettrico e termico nella realtà presa in esame

Per lo studio sono state individuate due categoria di dati di interesse. I primi sono quelli di importanza primaria, che identificano l'utenza; i secondi, di seguito definiti secondari, permettono una caratterizzazione ed una agglomerazione a granularità più fine (ove richiesta) ma non modificano in modo significativo le grandezze integrali e di conseguenza non hanno effetti significativi su quelle medie.

I dati ritenuti di primaria importanza sono i seguenti:

- dati di consumo elettrico annuo espressi in kWh;
- dati di consumo termico, annuo espressi in quantità (m³) di combustibile;
- superficie della struttura;
- volume della struttura;
- localizzazione geografica (zona climatica).

La conoscenza di questi valori risulta importante per affinare la valutazione degli indicatori di consumo. Come si discuterà nel seguito, la mancata conoscenza di alcuni dei dati, per un dato edificio e/o complesso, porta necessariamente alla non-considerazione del campione in esame.

Alcuni dei dati ritenuti di secondaria importanza sono i seguenti:

- dati relativi all'involucro edilizio;
- suddivisione superfici tra vendita e magazzino;
- suddivisione superfici tra alimentare e generico;
- dati relativi alla destinazione d'uso;
- quantità superfici vetrate;
- tipo di urbanizzazione della zona;

effettiva frequentazione dei locali in ore/uomo per anno.

La conoscenza di questi ultimi dati risulta fondamentale per l'eventuale individuazione di un parametro correttivo dell'indicatore, ma non è fondamentale per l'individuazione di un indicatore di consumo.

Per ottenere sul territorio nazionale un campione correttamente distribuito e rispondente alla realtà, come prima scelta, si è deciso di contattare sia aziende ed imprenditori che EM. Per lo stesso motivo si è proceduto a raccogliere dati relativi a strutture di diverse grandezze ed operanti in diversi settori.

La risposta al questionario è stata sostanzialmente e formalmente insufficiente nonostante la varietà delle aziende contattate e dei servizi da queste erogati. Probabilmente, ciò è dovuto al fatto che in tali strutture non viene condotta una politica di gestione dell'energia e, quindi, non risulta possibile avere un colloquio proficuo.

Da un punto di vista statistico, l'analisi avrebbe dovuto essere condotta partendo dall'identificazione dei dati che rappresentano completamente il fenomeno, passando poi al loro reperimento. Purtroppo, molte amministrazioni o non conoscono il dato o non intendono/possono fornirlo. Di conseguenza l'analisi ha potuto essere più deduttiva che induttiva ed è stata condotta sulla base dei soli dati pervenuti.

Il numero di campioni rilevati, sul territorio nazionale, è di 48. Tale quantità si ritiene sufficiente a rappresentare l'intero scenario in quanto la variazione delle medie ottenute, per ogni zona climatica, è al di sotto del 5% già con 20 campioni.

Inoltre, per ottenere una corretta rappresentazione dello scenario nazionale, gli esercizi commerciali presi in esame sono stati scelti tra gruppi uniformemente distribuiti secondo diverse:

- zone climatiche (quattro zone, B,C,D,ed E);
- dimensioni (piccola, media, grande; da 1000 fino a 60000 metri quadri);
- assorbimenti di energia.

I diversi fabbricati oggetto della ricerca presi in analisi non possono essere raggruppati secondo una semplice suddivisione in funzione della latitudine, ad esempio, nord, centro e sud. In particolare ogni zona presenta diverse condizioni altimetriche ed ambientali che la caratterizzano; pertanto è necessario introdurre nella ricerca una suddivisione che tenga realmente conto delle necessità energetiche della zona.

La suddivisione in zone climatiche dei comuni italiani è stata introdotta dal D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993: regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della L. 9 gennaio 1991, n. 10. In breve, gli oltre 8000 comuni italiani risultano suddivisi in sei zone climatiche.

Gli edifici oggetto di studio sono stati raggruppati in relazione alla zona climatica anche per l'analisi dei carichi elettrici; tale scelta è dovuta alla presenza degli impianti di condizionamento che gravano sul fabbisogno totale di un edificio con una quota media del 50 - 60 %.

Diversi indicatori di consumo sono stati presi in esame per verificare quale fosse il più aderente alla realtà energetica da delineare. Tra i principali vi sono quelli che rapportano l'energia assorbita a: metri quadri; metri cubi; affluenza.

Si è deciso di investigare quale fosse l'indicatore più adeguato a strutturare un modello matematico che desse, con sufficiente affidabilità, una previsione di consumo anche per il singolo edificio. Purtroppo, non è stato possibile analizzare, a causa della ricorrente mancanza dei dati sul numero di clienti, l'affidabilità dell'indicatore di consumo relativo.

E' stato invece possibile confrontare gli indicatori di consumo, rispettivamente per il consumo elettrico e quello termico, in funzione dei metri quadri di superficie e dei metri cubi di volume.

Analisi dei dati elettrici

Va premesso che tutti i dati di consumo analizzati e gli indicatori di seguito ricavati fanno riferimento all'intero anno solare 2009.

L'indicatore utilizzato è stato quello a "metro quadro" e viene ricavato dal rapporto tra l'energia assorbita in un anno e la superficie, per ogni singola zona climatica:

$$IEMQ = \frac{kWh_{totali}}{m_{tot}^2}$$

Per valutare correttamente il consumo globale dei campioni analizzati sull'intero territorio nazionale è necessario effettuare il rapporto tra la somma delle energie assorbite dagli involucri e la somma delle superfici degli stessi in un anno. L'indicatore globale nazionale di riferimento ottenuto in questo caso è pari a 354 kWh/m² anno.

In Tabella 43 vengono elencati i dati relativi agli indicatori di consumo elettrico. Da notare come non vi sia una relazione che veda aumentare o decrescere contemporaneamente i consumi e le necessità legate alla diversa zona climatica. In tabella vengono anche riportati gli scarti quadratici medi relativi agli indicatori.

Tabella 43. Indicatori di consumo elettrico in funzione dei metri quadri (I E MQ) e dei metri cubi (I E MC), per le diverse zona climatiche

	I E MQ [kWh/m²]	I E MC [kWh/m³]	ZONA
Medio	378,4	66,3	
Scarto	46,7	10,4	В
% scarto	12,3	15,7	
Medio	277,9	53,1	
Scarto	36,2	12,6	С
% scarto	13,0	23,8	
Medio	290,6	55,2	
Scarto	73,3	27,6	D
% scarto	25,2	50,0	
Medio	341,3	68,2	
Scarto	90,5	29,9	E
% scarto	26,5	43,9	

Uniformemente ripartiti sul territorio nazionale, il 20% circa delle attività riscalda gli ambienti di inverno mediante l'impianto di climatizzazione elettrico. Tali attività presentano, ovviamente, un consumo di gas nullo. I dati relativi sono presentati in Tabella 44.

Tabella 44. Indicatori di consumo medi, per zona climatica, relativi alle sole attività che producono sia caldo che freddo con climatizzatori elettrici

	I E MQ [kWh/m²] Tutto elettrico	ZONA	
Medio	331,8		
Scarto	62,7	С	
% scarto	18,9		
Medio	497,0		
Scarto	91,2	D	
% scarto	18,4		
Medio	392,9		
Scarto	210,8	E	
% scarto	53,6		

Non sono stati reperiti campioni di strutture che non utilizzano caldaie a gas per il riscaldamento invernale nella zona B, pertanto il confronto presentato tiene conto solamente delle zone C, D ed E (Figura 198).

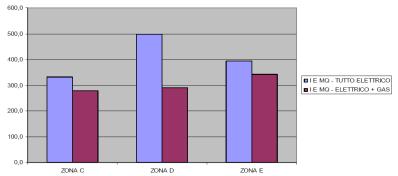


Figura 198. Confronto di indicatori elettrici tra attività con riscaldamento invernale elettrico ed attività con riscaldamento tradizionale a gas

o Analisi dei dati termici

Al contrario di quanto avviene per l'analisi nel settore elettrico, il consumo di gas è legato essenzialmente alle caratteristiche fisiche della struttura. Anche in questo caso i dati sono risultati decisamente scarsi obbligando a restringere il campo di analisi agli indicatori in funzione dei metri quadri e dei metri cubi.

Spesso i dati relativi all'involucro non sono reperibili in quando la società esercente è affittuaria e nessuno si è mai preoccupato, in fase di contratto, di effettuare una verifica in tal senso. Spesso si nota che le attività trovano spazio negli interrati di condomini che, in quanto tali, limitano in maniera sostanziale qualsiasi intervento migliorativo peggiorando ulteriormente la gestione energetica.

Il dato che più frequentemente disponibile sulle strutture è relativo alle superfici vetrate: il valore medio si attesta sul 5% circa. Tale dato evidenzia anche come non venga assolutamente sfruttato l'apporto di luce naturale nelle strutture in oggetto.

Nella presentazione dei risultati, il dato viene riferito anche al rapporto tra energia termica consumata e superficie [kWh/m²]; l'operazione di conversione del dato viene effettuata considerando il potere calorifico inferiore del gas pari a 8250 kcal/m³. Detto fattore di conversione viene indicato al netto di ogni rendimento di conversione.

Come per l'analisi dei consumi elettrici, anche in questo caso l'indicatore scelto fa riferimento ad una energia termica assorbita per unità di superficie:

$$I_t = \frac{kWh_{termici}}{m^2_{tot}}$$

In Tabella 45 si riportano gli indicatori termici ricavati nel corso della ricerca, sotto forma di gas consumato e di energia termica impiegata (al netto di ogni rendimento di conversione).

Tabella 45. Indicatori di consumo termico in funzione dei metri quadri (It MQ) e dei metri cubi (It MC), per le diverse zona climatiche

	I t MQ [m³_gas/m²]	I t MC [m³_gas/m³]	I t MQ [kWh/m²]	I t MC [kWh/m³]	Zona
medio	5,0	0,9	47,7	8,3	
scarto	0,6	0,1			В
% scarto	11,2	10,8			
medio	3,7	0,7	35,4	6,7	
scarto	0,3	0,1			С
% scarto	7,4	16,9			
medio	2,9	0,5	28,0	5,1	
scarto	0,4	0,1			D
% scarto	14,6	19,8			
medio	6,0	1,2	57,4	11,8	
scarto	3,4	1,0			E
% scarto	56,1	79,6			

I dati riportati in tabella dimostrano che, anche nell'analisi termica, si ha una migliore affidabilità degli indicatori riferendosi ai metri quadri piuttosto che ai metri cubi di volume della struttura.

Dall'analisi risulta inoltre che i consumi di gas risultano essere praticamente costanti al variare della superficie, nonostante si passi da 1000 a 60000 metri quadri.

o Indicatori di consumo per assorbimenti elettrici e termici

L'analisi effettuata ha permesso di ricavare gli indicatori di consumo per gli assorbimenti elettrici (Tabella 46) e termici (Tabella 47) per le diverse zone climatiche.

Tabella 46. Energia elettrica assorbita in un anno per m² di superficie, per zona climatica

Zona climatica	IE MQ [kWh/m²]	Errore %	
В	378,4	12,3	
С	277,9	13,0	
D	290,6	25,2	
E	341,3	26,5	

Tabella 47. Energia termica assorbita in un anno per m² di superficie, per zona climatica

Zona climatica	It m ² [m ³ gas/m ²]	I T m ² [kWh/ m ²]	Errore %
В	5,0	47,7	11,2
С	3,7	35,4	7,4
D	2,9	28,0	14,6
E	6,0	57,4	56,1

La ricerca condotta deve essere considerata soltanto l'inizio di un percorso di grande importanza ma anche di notevole complessità. La carenza di dati relativi alle aziende ed alle strutture obbliga di fatto ad una futura ulteriore indagine.

Si renderà sicuramente necessario effettuare un'analisi dettagliata dei consumi entrando dentro l'utenza e valutando nel particolare gli usi finali che sono già stati identificati in: illuminazione, condizionamento, riscaldamento, refrigerazione, sistemi ausiliari, eventuali tipologie o gruppi di utilizzatori non considerati preventivamente.

La dispersione rilevata nei dati, nonostante l'errore sia spesso al di sotto del 20%, è causata dai diversi utilizzatori e coefficienti di contemporaneità ed utilizzazione degli stessi, nonché dalle strategie di vendita. La dispersione non rende possibile applicare il risultato alla previsione di consumo di una singola struttura. A questo fine, si rende assolutamente necessaria la creazione di un modello matematico specifico in grado di tenere conto dei singoli utilizzatori al fine di poter calcolare il fabbisogno di una struttura.

Come già detto, sembra comunque necessario effettuare una opera di sensibilizzazione all'interno del settore commerciale che ad oggi sembra completamente indifferente alla problematica energetica. È necessario che le disposizioni di legge vengano attuate con la definizione degli EM, e con la specifica operativa dei loro compiti e delle loro responsabilità. A questo proposito sembra assolutamente opportuna un'opera legislativa che specifichi ed imponga compiti e doveri.

Tutte le attività proposte hanno il fine intermedio di raccogliere, organizzare e centralizzare i dati, rendendoli disponibili per tutto il territorio interessato (comunale, regionale, nazionale). Il fine ultimo è l'ottimizzazione energetica a livello locale e centrale, e l'individuazione delle politiche di consumo.

È perciò necessario istituire un sistema che obblighi le singole aziende a generare i dati di consumo ed a fornirli ad una struttura centrale dedicata. Tale struttura deve non solo collazionare i dati ma anche e soprattutto elaborarli fornendo un opportuno feedback alle amministrazioni locali.

C.8 <u>Indici di benchmark di consumo per diverse tipologie di edificio e all'applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani negli edifici ospedalieri</u>

La FIRE da anni segue, attraverso indagini e gruppi di lavoro, l'andamento dei consumi delle dinamiche del settore ospedaliero attraverso la rete degli energy manager nominati ai sensi della legge 10/91, gestita su incarico del Ministero dello Sviluppo Economico.

Le azioni svolte nel corso dell'annualità in questa linea di attività hanno riguardato:

- attivazione di una campagna informativa diretta ai presidenti delle varie Regioni Italiane;
- preparazione di un questionario sui consumi energetici e sulla tipologia edilizia degli edifici sanitari;
- attivazione di una campagna di raccolta dati presso le varie strutture sanitarie nazionali;
- organizzazione di un convegno nazionale sull'efficienza energetica nel settore della sanità.
- o Attivazione della campagna presso le Regioni

La gestione delle strutture sanitarie avviene oggi a livello locale. Per valorizzare il ruolo centrale e di coordinamento delle Regioni, un primo passo importante per coinvolgere il maggior numero possibile di strutture sanitarie è stato quello di informare i Presidenti delle vari Regioni Italiane, delle attività in corso all'interno dell'Accordo di Programma, ed in particolare del fatto che si stavano effettuando degli studi nel settore del non residenziale relativi ad edifici con destinazione d'uso ospedaliero, finalizzati a caratterizzare i consumi energetici. Si chiedeva quindi alle Amministrazioni Regionali l'interesse a partecipare all'iniziativa.

Una risposta positiva a collaborare è arrivata da solo sette Regioni italiane (Puglia, Basilicata, Liguria, Emilia Romagna, Veneto, Lazio, Sicilia).

o Preparazione del questionario sui consumi

Prendendo spunto da questionari preparati in passato dalla FIRE per indagini simili nelle strutture sanitarie, si è provveduto a realizzare un'indagine conoscitiva sui consumi energetici, sulla gestione degli stessi e sulle tipologie edilizie negli ospedali. La preparazione del questionario è stata sviluppata quindi in tre parti. Si richiedevano dati relativi alla struttura, alla gestione e ai consumi di energia.

I dati richiesti sono in larga parte già disponibili presso le strutture sanitarie, anche se spesso in maniera non strutturata, e non richiedono particolare impegno per la raccolta. Si tratta però di dati sensibili per le politiche sanitarie con possibili discordanze fra valori disponibili e stato di fatto.

o Attivazione di una campagna di raccolta dati

È stato attivato un canale diretto con i responsabili di procedimento individuati dalle Regioni ed In parallelo al canale formale, temendo i risultati limitati o poco positivi, si è fatto ricorso alla banca dati FIRE degli energy manager nominati nell'anno 2009 per un rapporto diretto. Sono stati contattati circa 160 nominati nelle strutture sanitarie e chiedendo loro la compilazione del questionario senza attendere una comunicazione da parte della propria struttura di appartenenza.

Sono arrivati 50 questionari, poca cosa se si pensa che le strutture presenti sul territorio nazionale, da dati del Ministero della Salute del 2006 risultano essere 654. È stato comunque possibile fare delle prime considerazioni, per una descrizione sugli esiti del questionario si rimanda al rapporto completo.

D. Caratterizzazione dei componenti di involucro per il controllo solare e l'illuminazione naturale degli edifici

Questa attività è stata dedicata allo studio delle proprietà dell'involucro edilizio, finalizzate alla riduzione dei consumi elettrici, attraverso l'ottimizzazione degli usi energetici per il raffrescamento estivo e dello sfruttamento della luce naturale. L'attività è stata concentrata sulle tecnologie di involucro, componenti opachi e trasparenti, atte ad ottimizzare il controllo solare degli edifici. Due studi parametrici hanno permesso di valutare l'impatto sulle prestazioni energetiche (termiche e luminose) di sistemi trasparenti ed equipaggiati con elementi schermanti su edifici per uffici e di materiali ad elevata riflessione solare per le coperture su edifici residenziali. Uno studio sperimentale è stato condotto su un edificio per valutare l'impatto di materiali riflettenti sulle prestazioni dell'edificio in condizioni reali. L'utilizzo di materiali ad elevata riflessione solare è stato testato anche per pavimentazioni esterne, valutando in modo sperimentale e numerico l'impatto della riflessione solare sui consumi elettrici per illuminazione artificiale e sui livelli termici di materiali innovativi.

È stato infine implementata la versione aggiornata del software WINSHELTER, con nuove funzionalità di progetto e possibilità di calcolo, secondo la norma ISO150099.

Alle attività hanno partecipato il Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma La Sapienza, la Stazione Sperimentale del Vetro (SSV) e l'Istituto Nazionale Ricerca Metrologica (INRIM).

L'analisi dei consumi energetici degli ultimi anni mostra un notevole incremento dei consumi elettrici nazionali nel settore delle costruzioni, sia di tipo residenziale che di altra natura. L'aumento di consumi energetici nel settore civile è dovuto essenzialmente ai consumi elettrici.

Questo aumento è evidenziato dalla Figura 199 in cui si riporta l'andamento dei consumi elettrici nel civile e nel terziario a partire deal 1990. È interessante notare l'incremento sostanziale dei consumi elettrici nel settore residenziale a partire dal 2002. Verificato l'aumento di efficienza delle apparecchiature e dei sistemi di illuminazione delle abitazioni, è coerente ritenere che buona parte dell'aumento dei consumi sia imputabile alla rapida diffusione degli impianti ed apparecchi per la climatizzazione estiva.

Oltre alle problematiche di tipo energetico appare importante sottolineare quelle ambientali. I consumi elettrici sono infatti legati ad un fenomeno dall'impatto sempre maggiore: l'isola di calore a scala urbana, ovvero innalzamento delle temperature negli agglomerati urbani rispetto alle periferie ed alle zone rurali. Questo incremento legato per intero a fenomeni antropici, dipende da: comportamento termico dei materiali da costruzione per edifici e vie di comunicazione, scarico dei mezzi di trasporto, smaltimento del calore necessario per raffrescare gli edifici, ecc.

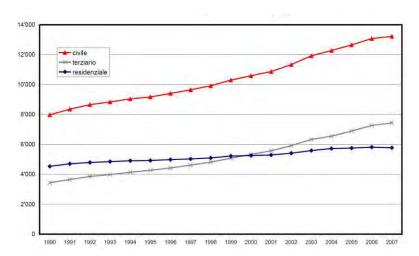


Figura 199. Consumi finali di energia elettrica (ktep) nel periodo 1990-2007

Il fenomeno ha un impatto considerevole sui consumi degli edifici climatizzati e sul comfort termico degli edifici non climatizzati, quest'ultimo con maggiori criticità. L'isola di calore è un fenomeno che raggiunge la massima intensità nelle ore notturne, quando generalmente la temperatura si abbassa garantendo il raffrescamento naturale dell'edificio. Nelle aree urbane l'abbassamento è contenuto, come si evince dalla Figura 200 che riporta i profili di temperatura per una zona urbana ed una sub-urbana in quattro giorni di agosto, e quindi la possibilità di smaltire il calore accumulato nelle strutture.

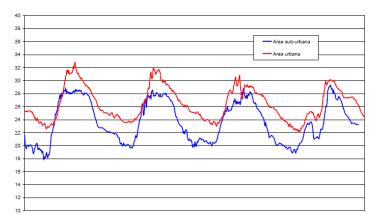


Figura 200. Profilo temperatura dell'aria - Agosto 2010

Le attività di questo obiettivo si è concentrato sull'ottimizzazione dei componenti dell'involucro edilizio per i materiali in aree urbane, per limitare il ricorso a fonti energetiche per la climatizzazione estiva e per l'illuminazione artificiale senza pregiudicare le condizioni di comfort per gli utenti.

D.1 <u>La modellazione avanzata dell'involucro edilizio trasparente</u>

È in fase di sviluppo una nuova versione di "Win-Shelter - Window and shading energetic, luminous and thermal evaluation routines" progettata allo scopo di eliminare alcuni dei limiti presenti nella versione 1 del software e per aggiungere alcune funzionalità ritenute di interesse generale.

Nella nuova versione è stata implementata la possibilità di effettuare i calcoli, oltre che utilizzando i valori integrati delle proprietà luminose e solari, anche sui valori spettrali, quando presenti (anche solo per una parte dei componenti), così come previsto dalla norma EN13363-2. Tale norma contempla infatti che, grazie alle modalità e alle equazioni previste, siano calcolati i valori spettrali dei sistemi integrati vetro + schermo, che dovranno quindi essere trattati come specificato nella norma EN410. Questa procedura, pur se allungando i tempi di calcolo, consente di ottenere risultati più precisi in presenza di elementi (vetri o schermi) molto selettivi.

Il software esegue l'integrazione secondo la norma EN410 ma consente di utilizzare anche una diversa procedura di integrazione (ad es. ISO9050). Considerata la difficoltà di ottenere i valori spettrali dei prodotti in commercio il database a corredo del programma è fornito con i soli valori integrati dei prodotti ed è lasciata al singolo utente la possibilità di utilizzare i dati spettrali, se in suo possesso. Win-Shelter consente di effettuare la caratterizzazione dei sistemi integrati vetro + schermo con qualsiasi angolazione delle lamelle degli schermi, sia positiva che negativa, e a qualsiasi altezza solare.

In questa versione resta presente una "modalità standard" in cui il software effettua i calcoli applicando tutte le condizioni previste dalla norma EN13363-2 e inserendo in automatico i valori adeguati dove previsto.

E' stata aggiunta la possibilità di calcolare le proprietà luminose ed energetiche di sistemi integrati vetro + schermo in presenza di ombre dovute a tende a braccio o aggetti. Per poter implementare questa funzionalità è stato necessario adottare alcune semplificazioni che sono riportate nel rapporto completo.

E' stata aggiunta una valutazione della trasmittanza termica dei sistemi integrati vetro + lamelle basata sui flussi termici ricavati dalle equazioni della norma EN13363-2. Il valore ottenuto, pur se indicativo non essendo implementato dalla norma stessa né da altre norme simili, consente una valutazione del coefficiente di scambio termico di vetrate complesse in cui il calcolo secondo EN673 non è consentito.

Per vetrate complesse in cui si possono avere surriscaldamenti della zona centrale rispetto alle zone periferiche (telaio, canalino) a causa degli assorbimenti delle lastre o di schermi interni, i progettisti hanno la necessità di valutare, anche approssimativamente, il rischio di frattura termica per poter effettuare la scelta del tipo di vetro (ricotto, temprato o indurito) da utilizzare. In questa versione del programma sono stati implementati algoritmi per la valutazione del rischio di frattura termica dei sistemi integrati vetro + schermo con riferimento al metodo indicato al punto 9.2 della norma AFNOR NF DTU 39 P3:2006 e alla bozza di norma CEN del novembre 2004 limitatamente ai casi in essa previsti.

L'interfaccia è stata mantenuta uguale a quella della versione precedente ma è stata adattata per poter consentire l'utilizzo delle nuove funzioni e il database sottostante è stato modificato per poter inserire i nuovi dati richiesti. Questa versione del programma non è più compatibile con il database della versione precedente. L'output, ora più personalizzabile, è prodotto sotto forma di tabelle e contiene i seguenti dati prestazionali del sistema integrato vetro + schermo: trasmissione globale luminosa, trasmissione globale solare, fattore solare, temperature dei singoli elementi opachi, assorbimenti energetici dei singoli elementi opachi, trasmittanza termica del sistema integrato vetro + schermo.

D.2 Linee guida per l'utilizzazione della luce naturale

Sono state implementate una serie di attività mirate all'ottimizzazione dell'utilizzo della luce naturale negli spazi confinati, finalizzando le azioni avviate nel corso della precedente annualità del programma.

Il database relativo allo stato dell'arte di componenti, sistemi, metodi e tecniche di progettazione della luce naturale e della sua integrazione con la luce artificiale è stato aggiornato ed integrato rispetto alla prima annualità. Sono stati effettuati approfondimenti bibliografici nella prima fase, sia per la definizione e valutazione dell'ambiente luminoso caratterizzato dalla sola presenza di luce naturale, sia dall'interazione tra luce naturale ed artificiale; successivamente, si sono analizzati e scelti i software che avrebbero garantito le prestazioni più affidabili per le simulazioni con luce naturale.

Sono state poi svolte una serie di analisi teorico/simulative delle prestazioni energetiche e di qualità visiva di ambienti tipo che utilizzino sistemi tradizionali e innovativi per l'illuminazione naturale. Si sono costruiti ambienti tipo con cui simulare la luce naturale e validare la prima fase di misure con modelli in scala e con ambienti reali. Definiti i parametri chiave da controllare attraverso una combinazione di simulazioni e misure sperimentali, si sono svolte simulazioni che hanno consentito di ottenere dati per diversi periodi dell'anno, per diverse ore, in modo da poter sviluppare delle indicazioni progettuali di massima per la progettazione con la luce naturale. Le simulazioni sono state effettuate in presenza ed in assenza di schermature, per gli ambienti tipo, mentre per gli ambienti reali ci si è attenuti alle specifiche degli ambienti considerati. Le condizioni di cielo considerate sono fondamentalmente cielo sereno e cielo coperto. Alcune simulazioni sono state effettuate in condizioni di cielo variabile. Diverse dimensioni degli ambienti, di superficie trasparente, di orientamento, sono state considerate nel tentativo di "normalizzare" e generalizzare il problema.

Parallelamente è stata condotta un'analisi sperimentale delle prestazioni e della qualità ambientale di ambienti tipo che utilizzino sistemi tradizionali e innovativi per l'illuminazione naturale. Gli ambienti sono stati studiati attraverso misure in campo di tipiche grandezze fotometriche (illuminamento, luminanza, etc.). Le misure si sono svolte in condizioni di cielo sereno, coperto e variabile, e si sono basate sull'impiego della seguente strumentazione: misure di radiazione solare globale e diffusa su piano orizzontale, più significative in condizioni di

cielo coperto, da cui è facilmente ottenibile per differenza il valore di radiazione solare diretta. Le misure di radiazione solare sono state ottenute con radiometri globali a fotodiodo, uno dei quali opportunamente schermato attraverso apposita banda di occultazione per la rilevazione della radiazione diffusa; misure di illuminamento esterno, effettuate su piano orizzontale. L'illuminamento esterno è stato ottenuto attraverso un luxmetro sistemato in esterno, in posizione non schermata; misure di illuminamento interno, effettuate per i 4 orientamenti principali sui piani di lavoro, e per il punto dell'ambiente considerato più sfavorito dal punto di vista dell'illuminamento naturale, con sonde poste con il sensore in posizione orizzontale. Gli illuminamenti interni sono stati ottenuti attraverso luxmetri sistemati in posizione opportuna sul piano di lavoro e a centro stanza per rilevare i valori di illuminamento nella zona più sfavorita; misure di luminanza, in presenza ed in assenza di elemento schermante, al piano di lavoro come zona di compito visivo; misure di trasparenza del vetro per confronto di luminanze e per confronto di illuminamenti.

Il confronto tra procedure di calcolo numerico e risultati sperimentali è stato effettuato per diverse le situazioni studiate prevalentemente attraverso modelli in scala; si è fatto uso dei risultati per procedere alla stesura delle linee guida. In Figura 201 si presenta un confronto tra le misure e le simulazioni effettuate durante la stagione invernale.

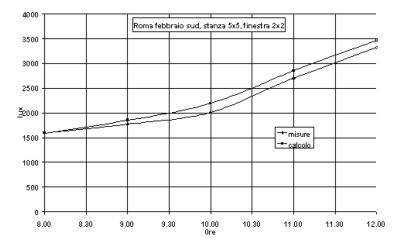


Figura 201. Analisi parametrica sull'impatto dell'involucro trasparente sulla prestazione energetica di edifici per ufficio

D.3 Analisi parametrica sull'impatto dell'involucro trasparente sulla prestazione energetica di edifici per ufficio

Scopo dell'attività era quello di individuare la miglior configurazione del "sistema serramento", capace di minimizzare il fabbisogno di energia netta necessario a mantenere le condizioni di progetto all'interno di un ambiente confinato. L'analisi considera anche il consumo di energia elettrica dovuto all'uso di luce artificiale necessaria a mantenere le condizioni di comfort luminoso.

In questo studio sono stati selezionati quattro diversi campioni di lamelle utilizzati nelle tende a veneziana, le cui caratteristiche ottiche ed energetiche sono state misurate sperimentalmente dalla Stazione Sperimentale del Vetro. Inoltre, per completezza, il calcolo è stato esteso ad una tenda tradizionale.

Dopo numerose simulazioni è stato possibile valutare l'influenza di ognuno di essi sia sulla distribuzione della luce naturale all'interno dell'edificio tramite l'uso del software Radiance, sia sul fabbisogno energetico annuo necessario a mantenere le condizioni di comfort termo igrometrico e luminoso. Le suddette simulazioni sono state effettuate con i software EnergyPlus e DaySim.

Per poter valutare l'incidenza del sistema trasparente complesso sull'intero edificio, si è scelto di focalizzare lo studio su di un blocco di riferimento, descritto nel rapporto completo e che non si riporta in questa sintesi, pensato estrapolato da un contesto più generale di un edificio a "stecca", in quanto tale tipologia risulta molto diffusa nell'edilizia relativa al terziario.

Il serramento considerato nel calcolo è costituito da vetrocamera montato in un telaio di alluminio con taglio termico su cui è applicato il sistema schermante. Per rendere più completo lo studio di analisi comparativa, sono state considerate 3 tipologie di vetrocamera differenti e 3 posizioni diverse in cui possono essere applicati i sistemi schermanti.

Nel calcolo sono state sono state considerate le seguenti composizioni:

- a) vetrocamera realizzato con due lastre di vetro float da 4 mm con intercapedine di 16 mm riempita con aria (4-16-4):
- b) vetrocamera realizzato con una lastra di vetro float di 4 mm ed una lastra, dello stesso spessore, su cui è applicato un coating basso emissivo posto in faccia 3, intercapedine di 16 mm riempita con gas argon (4-16-4):
- c) vetrocamera realizzato con una lastra di vetro float di 4 mm ed una lastra, dello stesso spessore, su cui è applicato un coating a filtro solare posto in faccia 2, intercapedine di 16 mm riempita con gas argon (4-16-4).

La posizione e la geometria del sistema schermante, così come le caratteristiche termo fisiche dei materiali che lo compongono, rivestono un ruolo determinante nella definizione delle prestazioni luminose ed energetiche del sistema schermante sull'intero involucro.

I sistemi schermanti studiati sono composti da materiali con differenti proprietà ottiche, più precisamente: L80 lamella con valore di riflettenza pari a 0,8, L50 lamella con valore di riflettenza pari a 0,5, L20 lamella con valore di riflettenza pari a 0,2, tenda con valore di riflettenza pari a 0,3 e trasmittanza luminosa e solare pari a 0,12.

Nel caso software EnergyPlus, i dati inseriti per le simulazioni sono geografici (altitudine, latitudine e longitudine della località), meteorologici (radiazione solare globale su piano orizzontale, temperatura, umidità assoluta, velocità del vento con direzione prevalente) e quelli riguardanti le caratteristiche proprie dell'edificio. Per questi ultimi è possibile inserire dati concernenti le proprietà termiche dei componenti opachi e trasparenti, gli orari di occupazione dell'edificio, l'eventuale presenza di impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione.

Infine, un'opzione fondamentale del programma, è la suddivisione degli edifici in zone termiche differenti: l'obiettivo è di unire, all'interno di ognuna, quelle parti dell'edificio con andamento dei carichi termici simili (ad esempio zone con medesima esposizione, con lo stesso orario di lavoro degli occupanti, ecc.). Quanto più la suddivisione in zone è dettagliata, tanto più accurata sarà la valutazione dei carichi termici.

Il modello di calcolo per valutare l'influenza delle veneziane è basato sull'algoritmo di Simmler, Fischer e Winkelmann (1996).

I sistemi schermanti sono stati definiti come una serie di lamelle orizzontali o verticali assumendo che le caratteristiche ottiche siano uguali per ognuna di esse. Tali proprietà vengono determinate sulla base della propria configurazione geometrica (larghezza, passo, inclinazione) e delle caratteristiche dei materiali che compongono lo schermo.

Ai fini del calcolo sono state fatte le seguenti ipotesi:

- le lamelle sono "piatte";
- la dipendenza della riflessione dalla lunghezza d'onda viene ignorata;
- la riflessione delle lamelle è perfettamente diffusa, manca quindi la componente speculare;
- le interriflessioni tra le veneziane e gli elementi perimetrali (ad esempio telai) sono ignorate.

Inoltre la modalità con la quale verrà riflessa la radiazione solare incidente è isotropica (semisfericamente uniforme) e indipendente dall'angolo di incidenza della stessa.

L'inclinazione delle lamelle della veneziana sono state diversificate secondo l'esposizione e precisamente:

- nord: orizzontale
- sud: cut-off ore 12
- est e ovest: cut-off ore 10

L'impianto funziona dalle ore 8.00 alle ore 18.00, in riferimento all'orario di apertura di un ufficio, nei giorni che vanno dal lunedì la venerdì; il numero di ricambi d'aria è fissato in 0,8 V/h; la temperatura di set point invernale è pari a 20°C, in estate a 26 °C.

Per i carichi energetici interni sono state assunte le seguenti ipotesi: presenza media nelle stanze pari a 1,5 persone, potenza delle lampade installate pari a 11 W/m², illuminamento richiesto sul piano di lavoro, posto ad un'altezza di 0,85 m, pari a 500 lux come richiesto da normativa, le lampade sono montate a soffitto; per i computer e le relative periferiche è stata scelta una potenza pari a 13 W/m². L'analisi affrontata presenta un numero di dati molto elevato che scaturiscono dalla combinazione dei diversi casi considerati nelle simulazioni. Le variabili considerate sono riassunte di seguito.

Città	Esposizione	Schermi	Controlli	Posizioni	Vetri	Geometrie
Milano Roma Palermo	Nord Sud Est Ovest	3 lamelle con diverse riflessioni L20, L50 L80 1 tenda	Abbagliamento Temperatura impianto	Esterna Intercapedine interna	Float Low-e Filtro solare	Esterna L= 10 cm Passo= 6 cm Intercapedine: L= 1,5 cm Passo= 0.9cm Interna: L= 2,5 cm Passo= 1,5 cm

I dati ottenuti sono stati riportati su diagrammi a radar; questo tipo di grafico consente di valutare l'andamento di ogni gruppo di elementi scelto, in un inquadramento generale nel quale compaiono tutte le variabili contemporaneamente. Per eseguire un'analisi accurata delle simulazioni le diverse variabili considerate sono state separate in gruppi omogenei; in questo modo è stato possibile stimare come ognuna di esse intervenga a modificare il fabbisogno annuo di energia netta necessaria a mantenere le condizioni di progetto imposte, aiutandoci a definire un percorso progettuale sensato.

Per dettaglio sui risultati dello studio si rimanda al rapporto che in appendice riporta i dati relativi alle città di Milano, Roma e Palermo, nonché i grafici che si riferiscono alla città di Roma.

In sintesi lo studio ha portato alle seguenti conclusioni:

- nella scelta di sistemi schermanti è bene prediligere materiali ad alta riflessione;
- i materiali con riflessione di tipo diffuso vanno usati nei casi più generali quando non sono noti i parametri che possono guidare il progettista verso scelte mirate, o quando nella progettazione non è previsto di entrare in tali dettagli. Se si vogliono raggiungere le prestazioni migliori occorre invece prediligere materiali caratterizzati da un'alta componente di riflessione regolare ma è fondamentale accompagnare il sistema schermante con una progettazione ad hoc che tiene conto di tutte le variabili necessarie (altezza solare, posizione dell'utente, passo, forma geometrica e inclinazione delle lamelle);
- i livelli di illuminamento sono molto sensibili all'altezza solare e all'inclinazione delle lamelle, è quindi consigliabile utilizzare un controllo automatizzato che possa modificarne dinamicamente l'inclinazione ottimizzando così l'illuminazione sui punti voluti;
- il passo da usare non deve essere mai troppo stretto in modo da evitare eccessive interriflessioni;
- uno dei principali obiettivi dovrà essere quello di indirizzare la luce verso il soffitto per ottenere un generale innalzamento dei livelli di illuminamento ed una migliore distribuzione della luce.
- è necessario utilizzare, soprattutto nell'esposizione sud, un controllo sulla luce di tipo dimmerizzato.
- il materiale ad alto coefficiente di riflessione si è dimostrato il migliore anche nella valutazione degli aspetti di comfort visivo, poiché innalza notevolmente i livelli di illuminamento sul piano di lavoro, la scelta di materiali ad alta componente regolare risulta, in questi casi, quanto mai importante per il miglioramento della qualità visiva e la vivibilità dell'ambiente confinato. Le tipologie di vetro scelte invece intervengono poco a modificare i parametri legati al comfort visivo poiché sono caratterizzate da alte trasmittanze luminose, le cose potrebbero sicuramente cambiare se si applicassero vetri riflettenti o in generale con bassi valori di trasmittanza luminosa; tale aspetto inciderebbe negativamente anche sui consumi elettrici dovuti al maggior uso di luce artificiale.
- per completezza, nelle esposizioni est ed ovest, lo studio dovrebbe essere esteso alla valutazione di lamelle disposte verticalmente, andrebbero tuttavia valutati i materiali con riflessione diffusa poiché in questi casi il re-direzionamento della luce non è tecnicamente possibile.

D.4 Analisi parametrica sull'impatto di tetti riflettenti (cool roof) sulla prestazione energetica di edifici residenziali

L'attività svolta è finalizzata a quantificare l'impatto di tecnologie e materiali ad elevata riflessione solare da utilizzare per le coperture degli edifici. Lo studio è focalizzato sull'area mediterranea che, per caratteristiche climatiche, è fortemente interessata a tecnologie in grado di ottimizzare le prestazioni energetiche per il raffrescamento estivo di edifici climatizzati e le condizioni di comfort termico degli utenti in edifici non climatizzati. Il problema è di grande attualità per i fenomeni di cambiamento climatico generalizzato, con l'innalzamento delle temperature che trova il picco nei grandi insediamenti abitativi, a causa del fenomeno dell'isola di calore urbana. A questo si aggiunga una espansione della climatizzazione estiva anche in quella categoria di edifici, tipicamente ad uso residenziale, fino a poco tempo fa sprovvisti di impianti di condizionamento e raffrescamento meccanici. La

richiesta sempre maggiore di comfort, combinata con l'effettivo innalzamento delle temperature, ha dato il via ad una escalation dei consumi elettrici tuttora in atto.

Materiali ad elevata riflettanza solare possono mitigare questi aspetti senza, ovviamente, risolverli. Lo studio dimostra l'impatto di questi materiali in edifici raffrescati in modo meccanico e naturale. L'analisi è condotta per diverse tipologie abitative e per diverse zone climatiche. Sono presi in esame anche diversi livelli di isolamento termico. I risultati dimostrano l'efficacia ed i limiti della soluzione sul bilancio energetico annuale dell'edificio. I risultati risultano interessanti anche per il legislatore, dal momento che conclusa l'azione relativa al contenimento dei consumi energetici invernali, appare necessario affrontare in modo deciso l'aspetto relativo all'efficienza energetica durante la stagione estiva.

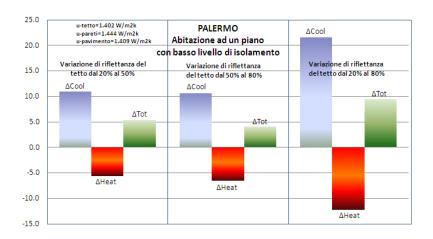
Si definiscono cool material (materiali freschi) quei materiali in grado di non innalzare in modo significativo la propria temperatura sotto la radiazione solare. I cool material sono caratterizzati da una elevata riflettanza solare (elevata capacità di riflettere la radiazione solare incidente sul materiale) e di emittanza termica (elevata capacità di emettere calore nella lunghezza d'onda dell'infrarosso). L'alto potere di riflessione è dovuto a pigmenti caratterizzati da una elevata riflettanza nella porzione infrarossa dello spettro solare, che però mantenengono il profilo tipico del colore di riferimento nello spettro visibile, ciò fa si che il materiale non si scaldi durante le ore diurne; l'elevata emittanza consente al materiale di raffreddarsi durante la notte, irradiando verso la volta celeste il calore assorbito durante il giorno. A parità di altri fattori (radiazione solare incidente, riscaldamento per convezione e/o conduzione), una superficie con queste caratteristiche rimarrà più fresca sotto il sole rispetto a una superficie che non presenti tali caratteristiche.

L'utilizzo dei suddetti materiali è molto utile per la realizzazione delle coperture e dei tetti, essendo i materiali da costruzione più utilizzati caratterizzati da elevato assorbimento solare (e quindi bassa riflettanza). Si parla in questi casi di cool roof, tecnologia in grado di realizzare un profilo di temperature superficiali più basso rispetto a un normale rivestimento, cosa che comporta una riduzione del flusso termico entrante nell'edificio contribuendo ad un'efficace diminuzione del valore medio della temperatura interna dell'aria in ambienti non climatizzati o una riduzione dei consumi per raffrescamento in ambienti dotati di impianto di climatizzazione estiva. L'uso in larga scala di materiali con queste particolarità in un'area urbana porta inoltre ad un indiretto risparmio energetico legato all'alta riflettanza solare che contribuisce alla riduzione della temperatura dell'agglomerato abitativo grazie ad un migliore bilancio energetico relativo alle superfici in gioco e favorendo la mitigazione dell'effetto di isola di calore urbana.

In questo studio le potenzialità di un *cool roof* sono state verificate attraverso un software di simulazioni dinamiche (TRNSYS) che consente di calcolare in modo accurato il fabbisogno di energia netta dell'edificio. Le analisi energetiche sono state quindi eseguite al netto dell'efficienza degli impianti di climatizzazione estiva ed invernale. Sono state eseguite numerose simulazioni per valutare l'impatto della tecnologia in funzione delle caratteristiche dell'edificio e della zona climatica, sempre in area Mediterranea.

Sono state scelte due differenti tipologie di edificio, rappresentative alcune soluzioni diffuse nel territorio in prossimità delle coste del Mediterraneo: un'abitazione a tetto piano su un solo livello e una a schiera su due livelli. L'abitazione che si sviluppa su un solo piano (rapporto superficie disperdente/volume = 0,99; rapporto superficie tetto/volume = 0,3) è molto diffusa soprattutto nell'Europa mediterranea e nelle città del Nord Africa. Questa configurazione rappresenta inoltre un caso di studio molto importante per verificare le effettive prestazioni di un tetto ad alta riflettanza rispetto ad una copertura realizzata con materiali classici. Ciò è dovuto alla grande estensione delle superfici orizzontali (tetto piano) che captano la radiazione solare rispetto alla superficie totale e al volume totale. L'edificio a schiera sviluppato su due piani (rapporto superficie disperdente/volume = 0,83; rapporto superficie tetto/volume = 0,16) presenta un minor sviluppo superficiale del tetto (anch'esso piano) rispetto alla soluzione precedente, inoltre le dinamiche di trasmissione del calore attraverso esso sono complicate dalla disposizione degli ambienti su due piani, rendendo il piano superiore più sensibile alle variazioni climatiche rispetto a quello inferiore. Un'altra osservazione fondamentale da tener presente è la presenza degli altri moduli abitativi confinanti che determinano un maggior isolamento complessivo della struttura.

Attraverso le simulazioni si è potuto determinare la variazione dei carichi energetici di climatizzazione e di riscaldamento in funzione della riflettanza del tetto. In questo modo si può osservare il reale guadagno energetico dovuto ad un *cool roof*, osservando anche come quest'ultimo influisca sul risultato in maniera diversa a seconda del livello d'isolamento. Si può notare come un incremento del valore di riflettanza faccia diminuire sensibilmente il carico di raffrescamento dell'aria (ΔCool), ma aumenti il carico di riscaldamento (ΔHeat). Il fenomeno è legato al minor apporto solare, positivo in estate e negativo in inverno, che comporta generalmente un guadagno netto su base annuale. La Figura 202 mostra, ad esempio, le variazioni dei carichi di climatizzazione, riscaldamento e totali a seguito di un aumento di riflettenza per diversi livelli di isolamento nell'edificio ad un piano nella città di Palermo.



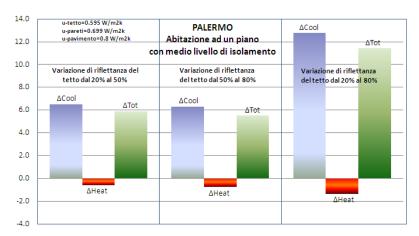


Figura 202. Variazione dei carichi dovuti all'aumento di riflettanza solare del tetto, per un abitazione ad un piano con basso e medio livello di isolamento nella città di Palermo

Risulta evidente come i *cool roof* siano, a determinate condizioni, una tecnologia sostenibile che permette un sensibile risparmio energetico annuo di energia elettrica e, potenzialmente, di evitare l'installazione di impianti di climatizzazione estiva in alcune zone climatiche. Essi raggiungono la loro massima efficienza se inseriti in un contesto climatico caldo, ma sono vantaggiosi anche se utilizzati in climi temperati e associati a strutture con un buon livello d'isolamento termico. A questo si aggiunga il fatto che i suddetti materiali, a parità di tecnologia, non presentano rilevanti sovrapprezzi rispetto ai tipici materiali di rivestimento di un tetto.

D.5 <u>Impatto di tecnologie cool roof sulle prestazioni energetiche degli edifici. Analisi sperimentale di un applicazione cool roof a Roma</u>

L'edificio sul quale è stato focalizzato questo studio è collocato a Roma. Esso è parte di un gruppo di stabili appartenenti all'Università degli Studi Roma Tre e da qualche anno è stato dato in concessione ed utilizzato come centro ricreativo per una comunità di anziani.

La scelta è caduta su questo edificio perché presenta caratteristiche standard adatte allo studio al quale è stato sottoposto. Infatti è un ottimo banco prova per verificare le effettive prestazioni di un tetto ad alta riflettanza. Ciò è dovuto alla grande estensione delle superfici orizzontali che captano la radiazione solare.

L'intera struttura presenta un basso livello di isolamento ed è caratterizzata da valori di trasmittanza (1,2 W/m² K) nettamente superiori a quelli stabiliti dal decreto legislativo 192/05 per la fascia climatica alla quale appartiene Roma. La superficie del tetto dell'edificio è ricoperta da una guaina bituminosa ardesiata.

Finalità dello studio era quello di verificare l'effettiva efficienza in termini di temperatura interna e di risparmio energetico sui carichi di climatizzazione relativi alla zona corrispondente all'applicazione, confrontando i risultati con quelli relativi alle zone equipaggiate con la copertura originale in ardesia.

Lo studio si articola in due fasi. La prima ha riguardato la rilevazione delle temperature e dell'umidità interne, delle temperature relative alle superfici in gioco (superficie esterna ed interna del tetto) e l'acquisizione di dati meteo

(radiazione solare, temperatura e umidità esterne) nei mesi di luglio e agosto 2010. La seconda fase prevedeva la creazione di un modello da inserire in un software di simulazione per valutare le prestazioni energetiche dell'edificio al variare di alcuni parametri: isolamento dell'involucro, profili di occupazione, fattore di schermatura, carichi energetici interni. Il materiale cool utilizzato è una membrana bianca lavabile Ecobios Clima con una riflettanza integrata pari all'86,4% e un'emissività termica, nella lunghezza dell'infrarosso, di 0,88. In Figura 203 si riportano le foto relative alla copertura prima e dopo l'applicazione del materiale.



Figura 203. Porzione di tetto prima e dopo l'applicazione della membrana termo - riflettente

Sono stati comparati alcuni dati acquisiti dagli strumenti di misurazione considerando solo le condizioni meteo più vantaggiose e non tenendo conto delle giornate caratterizzate da cielo coperto con conseguente minor apporto della radiazione solare sulle superfici prese in esame. Nei grafici seguenti (Figura 204) sono stati riportati i confronti dei profili di temperatura relativi al solaio di copertura mettendo a confronto i valori che si instaurano dovuti alla copertura cool e alla copertura in ardesia (riflettanza integrata 13,5%).

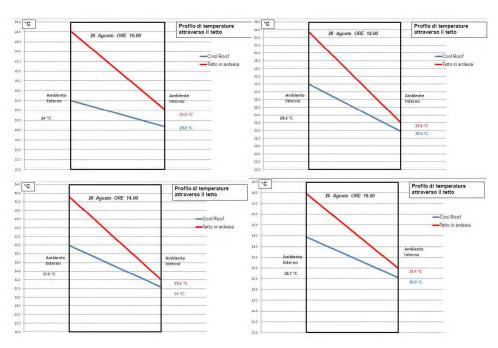


Figura 204. Profili di temperatura attraverso il tetto con copertura originale in ardesia e copertura cool

Sono stati effettuati confronti in diverse ore del giorno, corrispondenti quindi a diverse temperature esterne e diverso valore di radiazione solare incidente. Si può notare come la superficie costituita dalla membrana cool (in blu) presenti una temperatura superficiale inferiore, in particolare nel giorno considerato nei grafici si raggiunge una differenza tra le due soluzioni di circa 14° durante le ore centrali della giornata, diminuendo proporzionalmente all'intensità della radiazione solare.

Una minore temperatura della superficie esterna diminuisce il flusso termico attraverso il solaio modificando anche il valore di temperatura interna alla zona. Si è registrato in media nell'intervallo di studio considerato un decremento di temperatura di 2°.

Questo risultato è maggiormente evidenziato esaminando l'andamento della temperatura interna all'edificio senza l'utilizzo di sistemi di climatizzazione durante l'arco di una giornata nelle due soluzioni di copertura, a parità di apporti solari attraverso le superfici non opache e volumi d'aria circolanti all'ora, come evidenziato dal diagramma in Figura 205. L'andamento della tendenza in blu, propria del *cool roof* paragonato alla caratteristica associata alla copertura originale denota il riscontro positivo di questa tecnologia di raffrescamento passivo limitando i massimi di temperatura al disotto di 28,5° a fronte di valori superiori a 31° nell'altro caso.

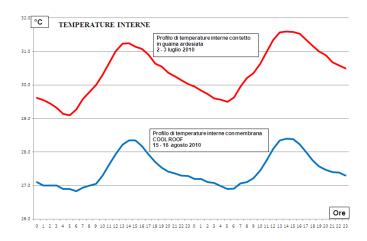


Figura 205. Profilo di temperature interne con e senza cool roof

Relativamente alle simulazioni, Il modello inserito nel software di TRNSys è stato realizzato considerando inizialmente le reali trasmittanze dell'involucro edilizio e rispettando, in maniera il più possibile fedele alla realtà, le caratteristiche termo – fisiche associate all'edifico. Il modello è stato calibrato rispetto all'andamento misurato della temperatura interna e della temperatura della superficie esterna della copertura prendendo a campione un intervallo d'esame in cui le caratteristiche termiche dell'edificio sono state rese più facilmente riproducibili nel modello.

Per raggiungere la calibrazione ottimale si è intervenuto sui parametri di infiltrazione dell'aria e sui fattori di schermatura interna ed esterna delle superfici trasparenti ottenendo uno scostamento massimo tra le temperature reali e quelle ottenute col simulatore al di sotto dei tre decimi di grado:

- la prima sessione di simulazioni è mirata ad ottenere risultati, in assenza di carichi di condizionamento, relativi alle temperature operative interne al variare della riflettanza del solaio di copertura.
- la seconda parte comporta la simulazione di un sistema di climatizzazione estiva a potenza illimitata per valutare la potenza termica spesa, per mantenere la temperatura al di sotto di un valore prefissato di set – point, al variare della trasmittanza dell'intero involucro e del solo solaio di copertura ed esaminando le prestazioni di queste tipologie di edifici associandole a tre diversi valori di riflettanza.
- la terza sessione riguarda la valutazione degli effetti del cool roof che si hanno sulle temperature operative nella zona presa in esame incrementando il profilo di occupazione.

Si sono creati tre modelli, ognuno con una diverso valore di isolamento:

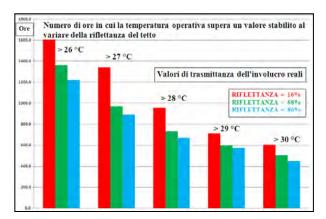
- 1. Valori reali di isolamento dell'involucro edilizio;
- 2. Valori reali di isolamento dell'involucro edilizio con trasmittanza del tetto secondo la normativa italiana;
- 3. Isolamento secondo la normativa italiana.

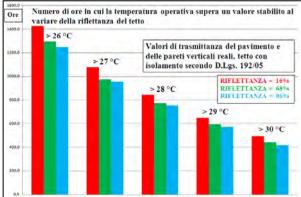
In Tabella 48 sono riportati i valori di trasmittanza a norma secondo il D.Lgs. 192 del 2005 relativi alla zona climatica D di cui Roma fa parte.

Tabella 48. Trasmittanza termica zona climatica D

Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali	Pavimenti	Chiusure trasparenti comprensive di telaio	Chiusure trasparenti
0.36 W/m ² K	0.32 W/m ² K	0.36 W/m²K	2.4 W/m ² K	1.9 W/m²K

Dai risultati delle simulazioni è stato estratto il numero totale di ore in cui la temperatura operativa interna supera alcuni valori prestabiliti nell'arco di tempo considerato dal 17 Giugno al 1 Settembre e al variare dei parametri di riflettanza solare scelti: 16% per simulare la copertura originale, 86% per la membrana minerale e 68% per la membrana minerale soggetta ad impoverimento delle sue prestazioni superficiali. In Figura 206 sono riportati gli istogrammi per i tre livelli di isolamento dell'involucro.





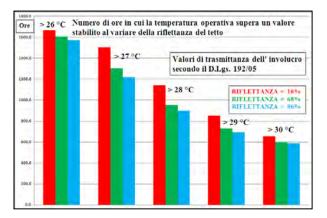


Figura 206. Temperature operative, nei tre casi di isolamento dell'involucro

Nelle simulazioni condotte si evince che l'utilizzo di un materiale ad alta riflettanza è un fattore che contribuisce ad incrementare il numero di ore in cui si rispettano le condizioni di comfort termico. D'altra parte dalle figure si può notare come all'aumentare dell'isolamento il decremento del numero di ore in cui la temperatura si attesta al di sopra di un valore prestabilito, a seguito di un aumento di riflettanza del tetto, sia di entità minore. Inoltre a parità di riflettanza il caso con isolamento dell'intera struttura a norma presenta delle temperature interne maggiori rispetto al caso reale. Questo fenomeno si manifesta nella fascia climatica del mediterraneo centrale, in edifici caratterizzati da elevati apporti solari attraverso le superfici trasparenti. La temperatura all'interno dell'involucro aumenta a causa della potenza termica associata alla radiazione solare che attraversa le finestre raggiungendo valori anche sensibilmente più alti rispetto alla temperatura esterna. A quel punto il basso valore di trasmittanza, determina un flusso di calore uscente scarso anche nelle ore notturne. Il calore rimane intrappolato all'interno creando una sorta di effetto serra.

Nelle fasce climatiche più calde il divario tra temperature interna ed esterna è in genere inferiore e il fenomeno sopra descritto si presenta in maniera meno accentuata. La configurazione che prevede l'isolamento reale, addizionato ad un livello di trasmittanza del tetto a norma, non presenta l'inconveniente sopra evidenziato, infatti le temperature operative assumono valori in media più bassi rispetto alle altre due configurazioni di isolamento trattate: un eventuale rifacimento della copertura che comporterebbe il duplice intervento sulla trasmittanza e sulla riflettanza incrementerebbe in maniera significativa il comfort termico in un edificio come quello esaminato.

Un altro fatto riscontrato nei risultati di questa prima serie di simulazioni riguarda l'elevato numero di ore in cui la temperatura operativa si attesta a valori superiori ai 29 °C anche nella configurazione a riflettanza maggiore. Ciò potrebbe essere visto come un risultato che si scontrerebbe con i valori di temperatura interna misurati con i sensori. Bisogna però pensare che la temperatura operativa è funzione, oltre che della temperatura interna

dell'aria, anche della media delle temperature superficiali di tutto l'involucro (pareti verticali, solaio e pavimento) cosa che giustifica ampiamente gli alti valori raggiunti da essa.

Per quanto riguarda le variazioni dei carichi di climatizzazione estiva, e simulazioni riguardanti il modello equipaggiato con un sistema di climatizzazione a potenza illimitata, condotte nel periodo estivo stabilito (17 Giugno - 1 Settembre), hanno avuto lo scopo di valutare l'entità del risparmio energetico in kilowattora in funzione della riflettanza della superficie del tetto. La riflettanza della copertura della sala considerata, assume i tre valori già utilizzati nella simulazioni precedenti: 16, 68 e 86%. In base a questi valori si è ricavata l'energia termica netta spesa per mantenere la temperatura della zona al di sotto del valore di set-point di 26 °C per i tre livelli di isolamento termico.

Come si può notare dai grafici riportati in Figura 207 si registra un decremento del carico proporzionale all'aumento dell'isolamento della struttura. Anche in questo caso, come nel precedente gruppo di simulazioni, si è riscontrata una minore sensibilità alla variazioni di riflettanza nell'edificio con le trasmittanze più elevate.



Figura 207. Carichi di climatizzazione in diverse condizioni di isolamento dell'involucro

Analizzando il caso peggiore, ovvero l'edificio con l'isolamento più vicino al caso reale col tetto in ardesia, ipotizzando dei lavori di rifacimento della copertura per diminuire la trasmittanza fino ai livelli stabiliti dal D.Lgs. 192/05 e applicando la membrana minerale ad alta riflettanza (86%), si passa, nell'intervallo di studio, da un consumo energetico di più di 3200 kWh a meno di 2050 kWh spesi per climatizzare la sola "Sala da ballo", risparmiando circa 9 kWh per metro quadro.

Se i lavori di rifacimento, per portare i livelli di isolamento a norma, si estendessero a tutta la struttura dello stabile, comprese, quindi, le pareti verticali, il pavimento, gli infissi e munendo sempre l'edificio di un cool roof, si passerebbe da un consumo di più di 3200 kWh a circa 1700 kWh con un risparmio energetico per la climatizzazione della zona di circa 12 kWh per metro quadro.

Mantenendo fisse tutte le considerazioni fatte in precedenza sulle temperature operative, si è poi proceduto con la stima dell'influenza che hanno differenti profili di occupazione sulle suddette temperature, sempre in funzione del parametro di riflettanza.

Il caso studio preso in esame ha dimostrato, grazie ad opportune misurazioni di temperatura, le potenzialità di un cool roof. La membrana termo – riflettente utilizzata si è rivelata in tal senso un ottimo materiale. La zona dello stabile che ha ricevuto i benefici dall'applicazione della suddetta membrana risulta termicamente influenzata da una serie di fattori che hanno messo alla prova le funzionalità del cool roof. Le ampie superfici vetrate esposte a sud in corrispondenza del lato più lungo dell'edificio sono sottoposte a ingenti apporti solari e anche se schermate fanno sentire il loro peso sulla temperatura interna. Sommando a ciò, lo scarso isolamento e il basso volume di ricircolo dell'aria, questi fattori rendono l'ambiente preso in considerazione il più termicamente critico dello stabile. Il cool roof ha comunque abbassato le temperature interne in media di 2,5 °C, risultato decisamente interessante considerando anche il fatto che esso non ha lavorato al massimo della sua efficienza a causa di un impoverimento delle caratteristiche superficiali dovuto ad agenti esterni.

I risultati ottenuti dal software di simulazione, riguardanti le temperature operative e i carichi interni di climatizzazione estiva, hanno integrato i dati ottenuti con le misurazioni. In particolare si è notata un'amplificazione dei vantaggi riguardanti il raffrescamento dell'edificio con questo metodo passivo, se associato ad un incremento del livello di isolamento del tetto. Si è inoltre potuto quantificare l'entità del risparmio energetico sui carichi interni, notando anche in questo caso come esso aumenti in maniera direttamente proporzionale al livello di isolamento. Dalle considerazioni tratte dallo studio si evince inoltre che un cool roof

presenta vantaggi sia se applicato direttamente su un edificio preesistente, sia su nuovi edifici in fase di costruzione.

D.6 <u>Analisi sperimentale e numerica dell'impatto di cool material sulle prestazioni illumotecniche e termiche di manti stradali</u>

Obiettivi della ricerca, svolta nel quadro della collaborazione con INRIM, sono:

- definire le condizioni geometriche di misura per la caratterizzazione ottica dei manti stradali a fini prenormativi per applicazioni in ambito di illuminazione stradale e di studio del bilancio energetico e del microclima in ambito cittadino;
- determinare le proprietà ottiche di un campione di manti stradali nelle tre tipologie normale, drenante e con trattamento al biossido di titanio;
- verificare mediante simulazione e misure sul campo gli impatti energetici ottenibili con i diversi asfalti.

La normativa per gli impianti di illuminazione prevede una caratterizzazione delle proprietà ottiche dei manti stradali pensando unicamente al traffico motorizzato e prevedendo un numero ridotto di angoli di misura in particolari condizioni di osservazione. In una prima fase si valutano e definiscono le condizioni di caratterizzazione più idonee, ai fini della ricerca proposta, pensando sia alla quota di radiazione ridistribuita durante il giorno verso gli edifici sia alle ricadute normative in ambito illuminotecnico.

E' stato necessario, quindi, individuare dei campi di misura sia spettrali (visibile e infrarosso) sia direzionali (condizioni di illuminazione e di osservazione) specifici per il caso di traffico motorizzato e di traffico pedonale in condizione di illuminazione notturna e per lo studio della ripartizione dell'energia raggiante in condizioni di illuminazione con luce naturale. Sono state effettuate sia caratterizzazioni in laboratorio che sul campo.

Infine, per alcuni scenari tipici dell'illuminazione stradale (rettilineo, incrocio) e di ambienti cittadini (via stretta o corso con palazzi), sono state eseguite delle simulazioni illuminotecniche ed energetiche al fini di valutare vantaggi e svantaggi applicativi dei diversi materiali, limitatamente al loro comportamento ottico.

In una prima fase campioni di manto stradale di diversa tipologia (normale, drenante e trattato con biossido di titanio) sono stati caratterizzati in laboratorio per determinarne le proprietà termiche e nel campo del visibile. Successivamente sono state eseguite caratterizzazioni sul campo.

Su alcuni scenari tipici dell'illuminazione stradale (rettilineo, incrocio) e di ambienti cittadini (via stretta o corso con palazzi) sono state quindi eseguite delle simulazioni illuminotecniche ed energetiche al fini di valutare vantaggi e svantaggi applicativi dei diversi materiali, limitatamente al loro comportamento ottico. In particolare sono state definite:

- le caratteristiche in termini di risparmio energetico di impianti di illuminazione di pari caratteristiche normative prestazionali e di impianti di illuminazione innovativi a risparmio energetico basati su sorgenti LED;
- la quota di energia dispersa verso l'alto e verso gli edifici in condizioni diurne e notturne, limitatamente al campo del visibile.

I risultati dello studio portano a concludere che l'uso di asfalti chiari presenta conseguenze illuminotecniche riconducibili essenzialmente ai seguenti punti:

- riduzione del flusso luminoso installato, infatti aumentando la radiazione riflessa nella direzione di osservazione è possibile ottenere i valori prescritti di luminanza del manto stradale con valori inferiori di illuminamento;
- miglioramento delle condizioni di visione;
- miglioramento del confort visivo, infatti l'incremento della luce diffusa (ad elevati angoli di osservazione, l'asfalto si può considerare lambertiano) rende più luminoso l'ambiente cittadino riducendo le condizioni di abbagliamento generate sia dagli apparecchi di illuminazione sia dalla presenza di sorgenti private (ad esempio vetrine);
- aumento dell'illuminazione indiretta: la maggior luce riflessa tende a migliorare le condizioni luminose dell'ambiente aumentando la sicurezza del traffico misto, ossia quando sono presenti contemporaneamente pedoni e veicoli. Anche zone esclusivamente pedonali è più semplice ottenere condizioni di illuminazione adeguate al riconoscimento dei volti e alla percezione di ostacoli;
- potenziale aumento inquinamento luminoso, specialmente in ambito extraurbano. In zone urbane il flusso luminoso disperso in modo lambertiano verso l'alto può essere in gran parte schermato da edifici e costruzioni. In ogni caso con una oculata scelta delle proprietà in riflessione (massimizzazione della

riflessione speculare e riduzione di quella lambertiana) è possibile ottimizzare le condizioni di impatto ambientale e di consumi energetici.

Durante il giorno la presenza di asfalti particolarmente chiari può creare condizioni di abbagliamento o di elevato contrasto tra zone illuminate e zone in ombra, specialmente per i pedoni o se sono presenti zone con asfalti di diverso tipo (ad esempio marciapiede e carreggiata).

Dalle misure eseguite risulta evidente la superiorità, anche in riflessione speculare, del manto trattato con vernice rispetto al manto non trattato, in particolare nel caso della vernice bianca.

Questa diversità di caratteristiche richiede, qualora la vernice sia applicata su strade già illuminate, una verifica progettuale dell'impianto di illuminazione. Infatti, se è vero che il livello medio di luminanza sicuramente incrementa e quindi la nuova situazione supera le richieste normative, nulla si può dire, a priori, sulle uniformità di luminanza e quindi sul superamento dei requisiti normativi relativi a questi parametri. Inoltre una verifica progettuale potrebbe consigliare una riduzione del flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione, ottenibile, per esempio, con regolatori di flusso luminoso o con diminuzione della potenza delle lampade installate.

Dal punto di vista termico gli asfalti trattati con vernice manifestano vantaggi sostanziali, presentando differenze di temperatura superficiali significativamente inferiori a quelle dell'asfalto non trattato. Queste differenze sono più evidenti con la vernice bianca (circa 10 °C nelle condizioni sperimentali considerate). Inoltre, considerando che l'asfalto di riferimento presente nel sito sperimentale è risultato particolarmente chiaro, l'effetto positivo del ridotto riscaldamento superficiale potrebbe essere maggiormente accentuato nelle città ove, per motivi di reperibilità degli inerti dell'asfalto, questi sono particolarmente scuri.

E. Partecipazione all'Implementing Agreement Energy Conservation in Building and Community Systems della IEA

In questo obiettivo si inseriscono le attività svolte all'interno dei diversi gruppi di lavoro dell'Implementing Agreement Energy Conservation in Building and Community Systems della Agenzia Internazionale dell'Energia. In particolare è stata assicurata la partecipazione ai seguenti Annex:

- Annex 40 "Net Zero Energy Buildings" Obiettivo genenerale dell'Annex è quello di individuare metodi e sistemi per la progettazione dei sistemi edificio-impianto ed energia netta zero, alla luce dei più recenti indirizzi europei di politica energetica degli edifici (Position of the Council at first reading with a view to the adoption of a Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (Recast) April 7th 2010) e degli obiettivi di risparmio energetico e limitazione delle emissioni di gas serra;
- Annex 46 "Holistic Assessment Tool-Kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings (EnERGO)" – L'Annex concentra i propri studi sul retrofit energetico di una categoria di edifici che costituisce buona parte del parco edilizio non residenziale: gli edifici governativi.
 - Studi effettuati sugli edifici non residenziali hanno dimostrato come molti edifici governativi sono caratterizzati da notevoli consumi energetici: ciononostante, nei casi di retrofit di questi edifici vengono raramente applicate misure di risparmio energetico;
- Annex 49 "Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities" Scopo dell'Annex è trovare delle strategie di uso dell'energia a bassa exergia, sia a livello di edificio sia a livello di community. La ricerca si estende a tutte le fasi, dalla generazione, alla distribuzione allo stoccaggio, all'uso finale di energia e cerca di valorizzare l'approccio exergetico ai fini dell'ottimizzazione dell'efficienza globale, relativa all'intera catena.
- Annex 53 "Total Energy Use in Buildings Analysis and evaluation methods" Scopo dell'Annex è l'approfondimento dei metodi di previsione dei consumi totali di energia negli edifici, con particolare riferimento agli usi finali, al fine di valutare le misure, le politiche e le tecniche di risparmio energetico. Particolare tema di approfondimento è la valutazione dell'influenza del comportamento dell'utente sui consumi energetici.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica (rif. Obiettivi B, C ed E)

Le attività sviluppate dal Politecnico di Torino sono state finalizzate allo studio ed applicazione dei modelli e programmi di calcolo per la certificazione energetica degli edifici basati sull'applicazione della norma UNI/TS 11300 e alla validazione di questa norma per la certificazione di edifici complessi, utilizzando come principale strumento di indagine il codice di simulazione dinamica EnergyPlus. E' stato sviluppato un foglio di calcolo per l'applicazione trasparente delle UNI/TS 11300 e il confronto con altri metodi semplificati (norme CEN EPBD).

Altre attività sviluppate dal Politecnico di Torino sono state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento per gli edifici a destinazione d'uso scolastico per le scuole secondarie superiori, collocate nelle zone climatiche E ed F.

Nell'ambito della collaborazione sono inoltre inserire le attività relative alla partecipazione ai lavori del gruppo di esperti dell'Annex 48 "Heat pumping and reversibile air conditioning", dell'Annex 53 "Total Energy Use in Buildings - Analysis and evaluation methods" e dell'Annex 44 "Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings" dell'Implementing Agreement "Energy Conservation in Building Communities Systems" dell'Agenzia Internazionale dell'Energia.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia (rif. Obiettivi C e E)

Le attività sviluppate dal Politecnico di Milano sono state finalizzate a determinare, attraverso codici di calcolo dinamici, i fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento di edifici destinati ad uso scolastico.

Esperti dell'Università partecipano ai gruppi di lavoro della Task 40 "Net Zero Energy Buildings" dell'Implementing Agreement "Energy Conservation in Building and Community Systems" dell'IEA.

Politecnico di Milano, Dipartimento Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito (rif. Obiettivi C e E)

La ricerca affidata al Politecnico di Milano riguarda attività di calcolo dei benchmark svolta mediante rilevamento di consumi e attraverso un set di simulazioni dinamiche condotte su edifici-tipo collocati nel contesto climatico italiano. In quest'ambito era previsto lo studio per la definizione di indici di applicabilità e di potenzialità di componenti di impianto innovativi, con particolare riferimento al contenimento dei consumi elettrici in fase d'uso.

Il Dipartimento partecipa da diversi anni all'Implementing Agreement "Energy Conservation in Building Communities Systems" dell'Agenzia Internazionale dell'Energia, svolgendo attività relative agli Annex 46 "Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings (EnERGo)" e Annex 49 "Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities".

Università Roma TRE, Dipartimento di Progettazione e Studio dell'Architettura (rif. Obiettivo C)

Le attività sviluppate dall'Università di Roma TRE sono state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici termici ed elettrici nel settore degli edifici commerciali della grande distribuzione, facendo riferimento a casi concreti e rilevando le caratteristiche prestazionali del sistema edificio impianto e reperendo i consumi da "bolletta".

Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Fisica Tecnica (rif. Obiettivo D)

L'attività condotta dal Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma La Sapienza costituisce la prosecuzione del lavoro, svolto nella prima annualità dell'Accordo di Programma, in cui erano state analizzate le problematiche relative alla "Integrazione luce naturale/artificiale in ambito terziario e abitativo". Nella seconda annualità, sono state affrontate le tematiche relative all'utilizzo della luce naturale in differenti tipologie di ambienti confinati al fine di giungere alla definizione di linee guida orientate all'ottimizzazione dell'impiego di luce naturale, anche in presenza di impianti di illuminazione, nell'ottica di un miglioramento della qualità ambientale e della sostenibilità energetica.

Università di Roma La Sapienza, Dipartimento Ingegneria Elettrica (rif. Obiettivo C)

Le attività sviluppate dall'Università di Roma La Sapienza di Roma sono state incentrate sulla determinazione dei fabbisogni energetici termici ed elettrici nel settore degli edifici commerciali per la media distribuzione, si è fatto riferimento ad alcuni edifici campione su cui sono condotte le indagini.

Università di Padova, Dipartimento di Fisica Tecnica (rif. Obiettivo C)

Le attività svolte all'interno del tema di ricerca relativo alla "Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione, interazione condizionamento e illuminazione" ha riguardato uno studio comparativo tra i fabbisogni energetici netti, lato edificio, per la climatizzazione estiva ed invernale di edifici residenziali e del terziario situati in climi differenti. L'analisi è stata eseguita con il codice di calcolo dinamico TRNSYS 15, attraverso simulazioni orarie: in tal modo sono stati presi in considerazione tutti i principali elementi che concorrono alla definizione del fabbisogno energetico netto dell'edificio.

Università di Palermo, Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (rif. Obiettivo E)

La collaborazione è relativa alla Partecipazione alle attività della Task 40 "Net Zero Energy Buildings" dell'Implementing Agreement "Energy Conservation in Building and Community Systems" dell'IEA. La ricerca ha riguardato da un lato approfondimenti metodologici sui "Net Zero Energy Buildings" (NZEB), dall'altro lo sviluppo e dell'analisi dei software di simulazione termo fisica degli edifici ponendo in evidenza lacune e problemi che si possono riscontrare nel caso di applicazione dei suddetti software ai NZEB.

Università IUAV di Venezia (rif. Obiettivo C)

L'Università di Venezia ha condotto un'indagine finalizzata non solo a valutare le condizioni degli edifici ad uso scolastico della regione Veneto e delineare le strategie di riqualificazione energetica efficaci, ma soprattutto a sperimentare una metodologia di rilievo semplificato che si possa riproporre in situazioni simili.

Come previsto dal Piano Annuale di Realizzazione, sono stati inoltre avviati deicontratti di ricerca con alcuni operatori per la compiuta esecuzione delle attività, in particolare:

CRESME (rif. Obiettivo B)

Le attività svolte dal CRESME sono state rivolte a quantificare e qualificare il parco immobiliare riferito alle destinazioni d'uso degli edifici scolastici e degli alberghi. È stata definita la consistenza degli edifici di queste destinazioni d'uso, ne è stata caratterizzata la distribuzione sul territorio e le caratteristiche costruttive ed impiantistiche.

CNR - Istituto per le Tecnologie della Costruzione (rif. Obiettivo)

L'attività svolta da CNR-ITC ha riguardato l'implementazione del codice DOCET finalizzato al calcolo dell'indice di prestazione energetica degli edifici del residenziale esistenti in conformità; con le norme UNI TS 11300 - parti 1 e 2, alla definizione degli schemi di certificazione energetica su scala nazionale e implementando il tool per rispondere, in modo più specifico, alle indicazioni del Decreto Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica degli Edifici.

Federazione Italiana per il Risparmio Energetico (FIRE) (rif. Obiettivo C)

La FIRE ha sviluppato l'attività riguardante la definizione dei fabbisogni energetici nel settore edilizio ospedaliero, coinvolgendo gli Energy Manager di queste strutture e gli Assessorati regionali competenti. Per acquisire il maggior numero di dati di interesse per questa attività è stata sviluppata una scheda di indagine inviata agli assessorati di tutte le Regioni nazionali.

Il Comitato Termotecnico Italiano (CTI) (rif. Obiettivo A)

Il CTI ha proseguito l'attività riguardante la definizione dell'anno caratteristico per le province italiane delle regioni del centro nord (Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Lombardia, Piemonte, Toscana, Trentino Alto Adige, Valle D'Aosta e Veneto). Le stazioni selezionate sono 57 ubicate in prossimità dei rispettivi capoluoghi di provincia e sono rappresentative delle caratteristiche climatiche di questi.

Istituto Nazionale Ricerca Metrologica (INRIM) (rif. Obiettivo D)

Ha svolto le attività di caratterizzazione illuminotecnica e termica di manti stradali ad elevata riflettenza solare.

Stazione Sperimentale del Vetro (rif. Obiettivo D)

Ha svolto le attività di sviluppo e implementazione del software WIN SHELTER secondo laUNI EN 14500 e la ISO 15099.

Università Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale (rif. Obiettivo D)

L'incarico affidato all'Università di Roma Tre è relativo all'esecuzione di un caso studio sull'impatto di tecnologie Cool Roof sulle prestazioni energetiche degli edifici.

I sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili

La domanda di energia per il condizionamento degli ambienti è aumentata considerevolmente negli ultimi decenni ed il trend è ancora fortemente in crescita. Le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento estivo (sistemi a compressione con motori elettrici) sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici. In particolare il rischio è di dover aumentare significativamente la potenza installata senza un corrispondente aumento del consumo con il risultato di un costo dell'energia più alto.

Negli ultimi anni diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico si sono focalizzate sullo studio di processi per il condizionamento degli edifici basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (solar 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, considerata la coincidenza della domanda con la disponibilità di energia solare. Attualmente esistono diverse componenti tecnologiche per la realizzazione di sistemi di raffrescamento solare, tuttavia non esiste ancora una soluzione 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.

Il progetto ha lo scopo di definire e sviluppare un sistema integrato che sia competitivo e di riferimento per il sistema Italia e infine comprendere in quali condizioni climatiche, con quali tecnologie e con quale politica di supporto possa essere avviata una azione che porti ad una diffusione di massa di sistemi di climatizzazione basati sull'energia solare.

Occorre osservare che i sistemi di climatizzazione assistiti da solare possono far ricorso alla integrazione di tecnologie diverse, quali l'impiego in varie forme di sistemi basati su tubi di calore (heat pipe). Va infine rilevato che, per migliorare la competitività del sistema, è interessante indagare le potenzialità di impiego invernale di un sistema di solar cooling: il progetto si dedicherà pertanto anche allo studio del comportamento delle pompe di calore elioassistite in periodo invernale.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Lo scopo principale del progetto è quello di favorire uno sviluppo esteso del ricorso a tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede lo sviluppo di componenti innovativi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti, quale un nuovo modello di macchina ad assorbimento dedicata alle applicazioni solari, attualmente non presente sul mercato: quello che si trova disponibile è normalmente l'adattamento di macchine alimentate a gas, che hanno prestazioni limitate se accoppiate a sistemi solari. Allo stesso tempo è necessario lo sviluppo di soluzioni tecnologiche ottimali per ciascuna condizione climatica del territorio nazionale: è infatti assodato che non tutte le tecnologie di solar cooling, ma anche di geotermia, possono essere applicate indifferentemente al territorio nazionale. E' quindi opportuno analizzarne le prestazioni in modo analitico, sia con monitoraggi sul campo, per quanto riguarda le soluzioni tecnologiche già implementate e di uso corrente, che con modelli di ottimizzazione multiparametrica sul tempo di pay-back con riferimento alle tecnologie correnti.

L'attività si realizzerà attraverso le seguenti fasi:

- ricognizione delle tecnologie e dei prodotti disponibili sia dal lato della produzione che dal lato impiego: collettori a media temperatura, piani, evacuati, a concentrazione, con l'impiego di heat pipes, pompe di calore a compressione e ad assorbimento, sistemi desiccant, sistemi geotermici. È previsto anche il monitoraggio di impianti esistenti e di un impianto di solar cooling in corso di realizzazione nel Centro Ricerche ENEA della Casaccia;
- realizzazione di laboratori per la qualifica di collettori solari a concentrazione e di sistemi di pompe di calore elioassistite;
- Sviluppo e caratterizzazione di laboratorio di componenti innovativi:
 - macchina ad assorbimento acqua ammoniaca dedicata ad impieghi solari
 - collettore solare ad heat pipes
 - desiccant compatto;

- definizione, modellazione ed ottimizzazione di architetture impiantistiche per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, analisi tecnico economica comparata per tecnologia e per zona climatica;
- linee guida e studi prenormativi per l'incentivazione dell'uso delle tecnologie di climatizzazione assistita da energia solare.

L'attività prevede i seguenti obiettivi intermedi:

A. Studi di fattibilità

Realizzazione di studi di fattibilità per la analisi delle prestazioni di diverse soluzioni tecnologiche di solar cooling, di impianti geotermici ed elioassistiti, di sistemi di trattamento aria con l'impiego di heat pipes, attraverso l'impiego di modelli di ottimizzazione multiparametrica sul tempo di pay-back con riferimento alle tecnologie correnti. Confronto analitico tra le diverse tecnologie applicate ad un edificio di riferimento in diversi climi italiani.

B. Ricognizione delle prestazioni di sistemi esistenti ed individuazione dei fattori di criticità

Realizzazione di una serie di campagne di monitoraggio in campo e in laboratori di test. In questa attività è compreso il completamento di un impianto di solar cooling del centro ENEA Casaccia, il cui dimensionamento è il risultato di uno degli studi di fattibilità mediante ottimizzazione effettuato nell'ambito dell'obiettivo A.

C. Realizzazione di Laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi

Presso il centro ENEA di Trisaia, è prevista la realizzazione di un laboratorio per la caratterizzazione di collettori solari sia del tipo heat-pipe (con funzionamento a temperature superiori ai 100°C) che a concentrazione, che costituirà una estensione di quello già esistente (accreditato SINAL) che opera nel campo delle applicazioni a bassa temperatura. Data la varietà di soluzioni impiantistiche destinate alle applicazioni di solar cooling che richiedono, tra l'altro, l'adozione di soluzioni tecnologiche innovative per quanto attiene la parte solare, sono previste attività di ricerca e sperimentazione di nuovi componenti. Tali attività riguardano analisi termofluidodinamiche abbinate a verifiche sperimentali su componenti commerciali e/o prototipi.

L'attività prevede una prima fase di analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori a media temperatura. In questa fase è stato previsto lo studio delle problematiche tecniche inerenti la caratterizzazione energetica di tali tipologie di collettori, con definizione delle metodiche di prova ed individuazione delle apparecchiature e strumentazioni necessarie per lo svolgimento della successiva attività di sperimentazione. Successivamente è prevista la realizzazione delle facility necessarie alla qualificazione e sperimentazione di componenti solari a media temperatura.

Viene inoltre allestito, presso il centro della Casaccia, un laboratorio di prova per pompe di calore elio assistite.

D. Sviluppo di componenti innovativi

L'obiettivo prevede la progettazione e lo sviluppo di prototipi di componenti innovativi per diverse tipologie di impianti di solar cooling, nell'intento di portare un contributo significativo all'allargamento della diffusione di questo tipo di impianti ed al miglioramento delle efficienze dei singoli componenti. In particolare s'intende agire su tre componenti principali: collettori solari, macchina ad assorbimento, sistema desiccant, sviluppando, nel caso della macchina ad assorbimento e del desiccant, componenti specificatamente dedicati all'impiego solare, laddove attualmente vengono impiegati componenti destinati ad un uso diverso ed adattati a questo impiego, con conseguenti perdite di efficienza e complicazioni in fase di installazione, che inducono un aumento significativo dei costi.

La macchina ad assorbimento ad acqua ammoniaca per impieghi solari, di potenza adatta al settore residenziale (5-50 kW), viene progettata espressamente per le basse temperature di attivazione (95-100°C), in modo da poterla convenientemente accoppiare a pannelli solari del tipo a tubi evacuati. Contrariamente alle macchine a bromuro di litio, la reversibilità dell'utilizzo le permetterà di riscaldare ambienti con alta efficienza durante l'inverno mediante corpi scaldanti a bassa temperatura.

Il desiccant compatto sarà caratterizzato da una migliore efficienza di deumidificazione, per renderlo maggiormente competitivo per l'impiego in climi caldo umidi, a differenza delle macchine attualmente disponibili, progettate e realizzate da società del nord Europa, e che hanno quindi funzionamenti ottimizzati per carichi di umidità considerevolmente più bassi.

Vengono inoltre indagate soluzioni innovative di scambio termico e sviluppate logiche di controllo avanzate per sistemi di desiccant.

E. Partecipazione ai gruppi di lavoro IEA – Solar Heating and Cooling e SolarPACES

Partecipazione, quali rappresentanti italiani su incarico del MSE, ai lavori dell'Implementing Agreement della Agenzia Internazionale per l'Energia "Solar Heating and Cooling" e "SolarPACES, Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems".

In particolare, per quanto riguarda l'IA Solar Heating and Cooling viene assicurato il contributo italiano alle attività del gruppo di lavoro Solar Air-Conditioning of Buildings (Task 38), mentre relativamente all'IA SolarPACES viene garantito l'avvio delle attività sull'accordo, in seguito della adesione nazionale, recentemente autorizzata dal MSE.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Studi di fattibilità

Scopo di questa attività è la realizzazione di studi di fattibilità tecnico economica per l'analisi delle prestazioni di diverse soluzioni tecnologiche innovative per la climatizzazione di edifici per uffici.

A.1 Studio sulla applicabilità di sistemi e componenti assistiti da fonti rinnovabili

È stato effettuato uno studio dei possibili sistemi di climatizzazione innovativi che sfruttino le energie rinnovabili. In particolare lo studio è volto al confronto di due particolari sistemi:

- i sistemi geotermici a pompa di calore a compressione;
- i sistemi "solar cooling", con refrigeratore ad assorbimento.

Questi sono i sistemi tecnologicamente più maturi e che trovano maggiore diffusione commerciale, oltre ad essere oggetto di studi e sviluppi tecnologici.

Nel corso dello studio, è stata analizzata una terza tecnologia, si tratta dei sistemi "elioassistiti". Tali sistemi si segnalano come una possibile soluzione tecnologica per il miglioramento delle prestazioni invernali delle pompe di calore a compressione. Si evidenzia come attualmente questi sistemi siano oggetto di ricerche sperimentali e non trovino ancora diffusione tra i sistemi commercialmente disponibili, se non in rare eccezioni.

Lo studio è stato affrontato analizzando delle strutture edilizie statisticamente rappresentative delle costruzioni ad uso ufficio nel territorio nazionale. Gli edifici analizzati sono frutto di una ricerca effettuata dall'ENEA volta ad identificare le costruzioni adibite ad uso ufficio maggiormente diffuse in Italia. Il risultato della ricerca porta a tre tipologie edilizie rappresentative degli edifici tipici presenti nel nostro Paese. Tali tipologie sono state successivamente diversificate a seconda della località, arrivando così a definire un totale di dodici edifici diversi.

Le tre tipologie di edifici sono nel dettaglio:

- Edificio 1 Edificio in muratura e cemento armato, costruito tra il 1920 e il 1945. 2 piani di 3,3 metri di altezza ciascuno (6,6 m complessivi di altezza) e 216 m² in pianta. Dopo ristrutturazione per migliore resa energetica;
- Edificio 2 Edificio in cemento armato, costruito fra il 1945 e il 1970. 5 piani di 3,1 metri ciascuno (15,5 m complessivi di altezza) e 480 m² in pianta. Dopo ristrutturazione per migliore resa energetica;
- Edificio 3 Edificio in muratura e cemento armato, costruito fra il 1945 e il 1970. 2 piani di 3,1 metri ciascuno (6,2 complessivi) e 216 m² in pianta. Dopo ristrutturazione per migliore resa energetica.

Si tratta di edifici medio - piccoli (tra i 500 e i 2500 m²), collocati in località rappresentative delle diverse caratteristiche climatiche del territorio italiano (Milano, Napoli, Roma e Palermo). In Tabella 49 si riportano i dati climatici delle località selezionate.

Tabella 49. Dati climatici località analizzate

Località	Gradi Giorno	Zona climatica	Latitudine	Temperatura massima	Temperatura minima	Temperatura media giornaliera massima	Temperatura media giornaliera minima
MILANO	2404	E	45°28′	34,0	-5,6	17,3	10,3
NAPOLI	1034	С	40°51'	35,0	0,9	21,6	14,0
PALERMO	751	В	38°7'	35,8	3,6	21,5	14,6
ROMA	1415	D	41°57'	36,4	-4,4	21,2	9,2

A seconda della località e della tipologia di edificio, le potenze termiche e frigorifere per le quali è stata effettuata l'analisi sono riportate in Tabella 50. I valori indicati rappresentano i valori massimi di potenza del sistema di distribuzione del calore interno all'edificio, non la potenza massima della pompa di calore dell'impianto.

Le simulazioni effettuate sui vari edifici sono atte a verificare le prestazioni degli impianti e suggerire la tipologia più conveniente, indipendentemente dal sistema di distribuzione del calore interno all'edificio. Inoltre, visto il tipo di studio, i modelli sono di carattere generale e, sebbene opportunamente dimensionati, non tengono conto di tutte le problematiche pratiche che possono verificarsi nel momento della realizzazione di un impianto reale. Allo stesso modo, per confrontare i costi dei vari impianti, sono stati considerati unicamente i costi dei componenti principali dell'impianto: sono stati quindi trascurati

Tabella 50. Carichi termici e frigoriferi degli edifici analizzati

	kW Riscaldamento	kW Raffrescamento
MI1	20,6	14,4
MI2	82,2	63,9
MI3	20,6	14,4
NA1	11,1	15,8
NA2	37,5	639
NA3	11,1	15 8
PA1	5,6	17,2
PA2	13,9	69,4
PA3	5,6	17,2
RM1	11,1 158	
RM2	37,5	639
RM3	11,1	15,8

tutti i costi relativi al sistema di distribuzione del caldo e del freddo interni all'edificio. Si sottolinea quindi come i costi indicati possono essere utilizzati per confrontare le diverse scelte impiantistiche.

Per la valutazione economica si è deciso di utilizzare il *Costo Totale Attualizzato*, considerando che il costo di installazione dell'impianto sia sostenuto completamente all'anno 0, e che il costo dell'energia utilizzata si rivaluti ogni anno.

Si è scelto di non utilizzare il tempo di recupero in quanto si considera l'intervento di installazione di un impianto di condizionamento ex-novo e le diverse tipologie di impianto vengono così confrontate con un unico parametro economico assolutamente indipendente dalle tecnologie tradizionali che possono essere usate in alternativa.

La formula utilizzata è la seguente:

$$\mathit{CTA} = \mathit{Costo\ iniziale} + \sum \mathit{costo\ annuo\ energia\ aux} \times \frac{1}{(1+r)^n}$$

con r = tasso di sconto al netto del tasso di crescita dei prezzi dell'energia, posto pari al 2% n = numero di anni presi in considerazione per attualizzare i costi, posto pari a 20.

Per quanto riguarda il costo dell'energia sono state utilizzate le seguenti ipotesi:

- costo gas: 0,60 €/Nm³ (PCI 8570 kcal/Nm³);
- costo energia elettrica: 0,18 €/kWh.

I sistemi solar cooling sono stati analizzati in modo tale da ottimizzare economicamente ed energicamente il dimensionamento e la scelta impiantistica dei collettori. Tali sistemi sono economicamente condizionati dagli elevati costi delle macchine frigorifere ad assorbimento di bassa potenza. Per tali macchine non può essere considerato un costo medio al kW frigorifero istallato, essendo la differenza di prezzo tra le macchine di diversa potenza molto bassa. Tali sistemi risultano quindi vantaggiosi solo in caso di installazioni di potenza elevata in quanto richiedono un'elevata spesa iniziale per il costo delle macchine, sopratutto per piccole installazioni. Questo ne preclude l'utilizzo se non per grossi sistemi. Dalle simulazioni effettuate risulta che per piccole potenze (edifici 1 e 3 in tutte le località) il solar cooling è un sistema sconveniente. Sebbene siano ottenibili risparmi energetici rispetto ad una pompa di calore ad aria convenzionale, il costo è comunque eccessivo. Per impianti più grandi (edificio 2) con richieste di potenza superiori ai 60 kW il sistema solar cooling può risultare vantaggioso da un punto di vista energetico rispetto ad un impianto geotermico, poiché il costo specifico della macchina ad assorbimento (per potenza frigorifera nominale) si riduce sostanzialmente.

Le simulazioni dei sistemi geotermici sono state effettuate utilizzando dati geologici ricavati da recenti sondaggi effettuati a Roma, Milano, Napoli e Palermo dal Dipartimento di Geologia dell'Università di Roma Tre. Nelle simulazioni sono stati utilizzati i dati relativi a rilevamenti puntuali: va però sottolineato il limite di tale approccio, poiché si riscontrano sostanziali differenze delle caratteristiche del terreno anche a poca distanza dai punti di rilievo (con relative differenze nei risultati, nonché nei costi di perforazione). Si è scelto di utilizzare comunque dei valori medi per caratterizzare il terreno nella località in considerazione. Il geotermico, fra le tre tecnologie considerate, è sicuramente la più matura da un punto di vista commerciale, soprattutto per applicazioni delle dimensioni considerate in questa ricerca. Esistono molti impianti installati soprattutto in Europa centrosettentrionale, in America e in Asia. I sistemi geotermici sono in genere convenienti per le installazioni con

potenze minori: in particolare i sistemi con sonde orizzontali sono i più convenienti, ma necessitano di ampie superfici, la cui disponibilità deve essere valutata nelle possibili installazioni. Per i sistemi a sonde verticali, il vantaggio economico/energetico è minore, ma si avvantaggia della minore superficie richiesta.

Infine, fra le tre tecnologie considerate, la pompa di calore elioassistita è decisamente quella meno sviluppata e nel mercato, salvo rare eccezioni: è però oggetto di studio di diversi ricercatori ed esistono diversi impianti sperimentali. Vista l'assenza di indicazioni di progettazione standardizzate, sono state effettuate diverse prove per ottenere la configurazione da utilizzare per le simulazioni. Diversi tentativi di cambiare la tipologia di collettori solari e la superficie captante non hanno dato sensibili miglioramenti dal punto di vista energetico: si è quindi deciso di utilizzare per tutte le simulazioni una superficie captante di 50 m² e di impiegare collettori scoperti. Per valutare l'effettiva efficacia del sistema simulato è probabilmente necessario effettuare un'analisi sperimentale. Visti i risultati ottenuti si è deciso di non includere gli impianti a pompa di calore elioassistita nel confronto diretto con le altre tecnologie.

Di seguito si riportano le tabelle che riassumono i risultati ottenuti.

Tabella 51. Confronto economico

	Solar cooling	GHP verticale	GHP orizzontale
MI1	€ 53000	€ 40000	€ 31000
MI2	€ 17000	€ 173000	€ 133000
MI3	€ 52000	€ 40000	€ 31000
NA1	€ 45500	€ 35000	€ 25000
NA2	€ 134500	€ 137000	€ 92000
NA3	€ 44000	€ 32000	€ 24000
PA1	€ 43500	€ 33000	€ 24000
PA2	€ 139000	€ 141000	€ 98000
PA3	€ 42000	€ 32000	€ 23000
RM1	€ 45000	€ 33000	€ 24000
RM2	€ 133000	€ 135000	€ 92000
RM3	€ 43000	€ 32000	€ 22000



Tabella 52. Valutazione dell'energia primaria consumata dai diversi sistemi

	Solar cooling [MJ/anno]	•	
MI1	67100	70900	70900
MI2	284000	288000	301000
MI3	64900	69500	69800
NA1	40500	54400	52200
NA2	156000	170000	169000
NA3	35200	45100	48800
PA1	33300	47500	46900
PA2	135000	184000	188000
PA3	27300	43600	43500
RM1	38900	48200	46500
RM2	150000	164000	168000
RM3	31200	42700	42000

Per effettuare il confronto dell'energia primaria consumata dai diversi sistemi alimentati ad energia elettrica, è stato considerato il rendimento medio del parco elettrico nazionale pari a 0,38.

Dalle tabelle riepilogative si vede chiaramente come, in tutte le situazioni considerate, un impianto geotermico a sonde orizzontali sia quello che garantisce un miglior rapporto costo/energia risparmiata: il limite di tale impianto risiede nello spazio libero necessario per l'installazione del pozzo orizzontale. Per quanto riguarda gli altri due tipi di impianti, i sistemi solar cooling sono convenienti per potenze maggiori, mentre per piccole potenze sono più economicamente sostenibili sistemi geotermici a sonde verticali. Spostandosi da nord a sud, come atteso, migliora la resa degli impianti di tipo solar cooling rispetto a quelli geotermici.

A.2 <u>Strutturazione di una banca dati in ambiente G.I.S. per lo sviluppo di impianti innovativi finalizzati alla</u> gestione delle georisorse

Visto il crescente sviluppo di impianti a pompa di calore (PDC) che derivano energia termica dal sottosuolo senza prelevare acqua di falda, si è deciso di sviluppare una banca dati contenente i dati di progetto necessari per il dimensionamento di questo tipo di impianti. In questi ultimi anni i componenti che costituiscono un impianto di tipo geotermico sono stati oggetto di una grande evoluzione. Ad esempio, per quanto riguarda le PDC, sono ormai disponibili modelli molto silenziosi e quindi installabili in qualsiasi collocazione all'interno degli alloggi. Inoltre sono ormai disponibili PDC a potenza termica modulante. È così possibile minimizzare l'inerzia termica dei circuiti interni evitando così l'adozione di serbatoi inerziali di grosse capacità. Per quanto riguarda gli scambiatori di calore col terreno, sono state sviluppate nuove geometrie (ad esempio quelle a spirale o a canestro) che possono dare la possibilità di approntare soluzioni più compatte e meno invasive di quelle ottenibili con le geometrie tradizionali. Va anche considerato che il mercato offre ormai componenti appositamente realizzati per questi impianti, in grado di rendere più semplici e sicuri gli interventi di realizzazione, taratura, gestione e manutenzione.

Per rendere facilmente accessibili i dati necessari alla progettazione ed al dimensionamento di questo tipo di impianti, si è svolta una ricerca finalizzata alla realizzazione di una banca dati in ambiente G.I.S. in modo da agevolare lo sviluppo di impianti innovativi per la gestione delle georisorse con particolare attenzione alle risorse geotermiche a bassa entalpia.

La ricerca ha condotto alla realizzazione di un geodatabase atto ad archiviare i dati ambientali e geologici necessari alla realizzazione di analisi complesse mirate alla mappatura delle fattibilità territoriali per l'installazione di impianti geotermici con sonde verticali (SGV).

Il geodatabase è stato testato su un area campione della città di Roma al fine di verificare le potenzialità, la funzionalità e la scalabilità del modello di analisi. Tale modello, presentato nel seguito, rappresenta uno strumento strategico di supporto alla pianificazione ambientale di possibile utilizzo da parte degli Enti locali per l'identificazione delle potenzialità geotermiche territoriali e per la programmazione delle attività di gestione.

Lo sviluppo di strumenti di analisi guidata è di fondamentale importanza per l'utilizzo delle diverse funzionalità di zonizzazione geografica offerta dai sistemi informativi territoriali. Gli strumenti sviluppati, anche se sottendono ad una conoscenza approfondita degli algoritmi di analisi, sono utilizzabili attraverso maschere semplificate. In tal modo anche l'utente non esperto può eseguire studi complessi utilizzando i dati archiviati nel geodatabase. L'utente può inoltre individuare aree geografiche a diversa propensione per lo sviluppo di impianti geotermici, definendo semplicemente i parametri chiave della ricerca da menù semplificati sviluppati ad hoc all'interno del software.

Il geodatabase è stato inoltre implementato con dati relativi alle città di Milano, Napoli e Palermo finalizzati alla produzione di simulazioni del comportamento di impianti di climatizzazione in queste località riferite a 3 tipi di edifici diversi per tipologia costruttiva.

Le informazioni prodotte, di carattere indicativo e generale, non sostituiscono lo studio approfondito per la progettazione di un impianto geotermico ma comunque definiscono le informazioni di base necessarie e propedeutiche alla strutturazione degli studi di dettaglio da condurre direttamente in situ.

I dati geografici raccolti nella fase di screening, atta a valutare la propensione generale di una regione ad ospitare impianti geotermici, sono stati organizzati in un database geografico in ambiente ArcGIS 9.3.

Il geodatabase è strutturato in modo da poter raccogliere ed analizzare i dati provenienti da diverse fonti bibliografiche, da indagini effettuate in situ ed in laboratorio. Inoltre i dati organizzati in tabelle e features sono relativi a dati originali e agli stessi dati interpretati in modo da non perdere il dato di partenza.

Il geodatabase contiene, nello specifico:

- shape file della geologia di superficie;
- shape file dei sondaggi geognostici;
- shape file delle isofreatiche;
- shape file delle sezioni stratigrafiche;
- dati tabellari.

Selezionando quindi il sondaggio che ricade nella zona di interesse, si ottengono visualizzazioni del tipo di quelle riportate in Figura 208 e 209.

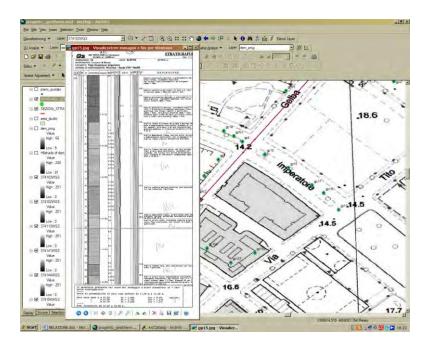


Figura 208. Sondaggi geognostici e un .jpg relativo al log stratigrafico archiviato nel geodatabase

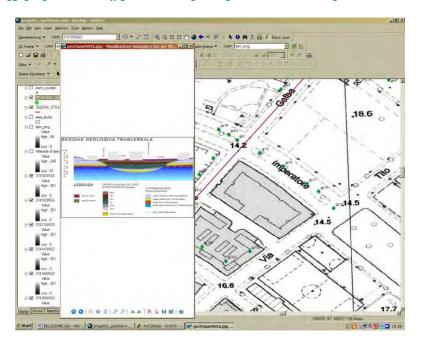


Figura 209. Shape file di una traccia di una sezione stratigrafica archiviata all'interno del geodatabase

Dalla *feature* puntuale dei "sondaggi" in cui sono riportati gli attributi generali relativi ai sondaggi, attraverso relazioni di tipo 1:M e 1:1 sono state relazionate le seguenti tabelle:

- Caratteristiche fisiche;
- Caratteristiche termiche;
- Caratteristiche stratigrafiche;
- Caratteristiche idrogeologiche.

Le informazioni, per ogni categoria descritta sono riportate nel seguito.

	Umidità naturale - quantità di acqua presente nella roccia espressa in %					
	Ghiaia - frazione granulometrica della roccia ricadente in questa categoria, espressa in %					
	Sabbia - frazione granulometrica della roccia ricadente in questa categoria, espressa in %					
Caratteristiche	Limo - frazione granulometrica della roccia ricadente in questa categoria, espressa in %					
fisiche	Argilla - frazione granulometrica della roccia ricadente in questa categoria, espressa in %					
	Permeabilità media - espressa in m/sec					
	Peso di volume - rappresenta la densità espressa in kN/m³					
	Umidità naturale media - quantità di acqua presente nella roccia espressa in % ricavata da dati bibliografici					
	Peso di volume medio – rappresenta la densità espressa in kN/m³ ricavato da dati bibliografici					
	Conducibilità termica minima – valore minimo riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Baltt 1 e 2, espressa in Watt su metro Kelvin (W/m K)					
	Conducibilità termica media - valore medio riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Baltt 1 e 2, espressa in Watt su metro Kelvin (W/m K)					
	Conducibilità termica massima - valore massimo riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Baltt 1 e 2, espressa in Watt su metro Kelvin (W/m K)					
Caratteristiche termiche	Resa termica lineare minima - valore minimo riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Baltt 1 e 2, espressa in Watt su metro (W/m)					
	Resa termica lineare massima - valore massimo riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Baltt 1 e 2, espressa in Watt su metro (W/m)					
	Capacità termica volumetrica minima - valore minimo riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Baltt 1 e 2, espressa in Metro Joule su metro cubo Kelvin (MJ/ m³ K)					
	Capacità termica volumetrica massima - valore massimo riportato nelle tabelle VDI Richtlinien 4060, Blatt 1 e 2, espressa in Metro Joule su metro cubo Kelvin (MJ/ m³ K)					
	Calore Specifico – espresso in kJ/kg°C					
	Codice identificativo sondaggio - Identificativo unico alfanumerico del sondaggio					
	Descrizione originale - Descrizione come riportata nel log stratigrafico del sondaggio					
Caratteristiche stratigrafiche	Nomenclatura ufficiale - Nome della formazione come indicato nella legenda C.A.R.G. (Cartografia Geologica Regionale)					
	Quota tetto - espressa in m s.l.m.					
	Quota letto - espressa in m s.l.m.					
	Spessore - espresso in metri					
Caratteristiche	Quota Falda - espressa in m s.l.m.					
idrogeologiche	Temperatura - espressa in °C					

Sono stati inoltre sviluppati degli strumenti semplificati per operare analisi di tipo spaziale sui dati memorizzati nel geodatabase. Queste analisi hanno lo scopo di mostrare l'andamento con la profondità delle proprietà termiche del terreno. In tal modo si ottiene una zonizzazione della propensione del territorio per lo sviluppo di impianti geotermici, con lo scopo di individuare l'andamento con la profondità della formazione litologica più produttiva dal punto di vista geotermico (Figura 210).

Il presente studio, oltre ad essere un importante mezzo di archiviazione del dato, è uno strumento valido nella ricerca ed analisi degli indicatori geologici ed ambientali per l'impiego dell'energia

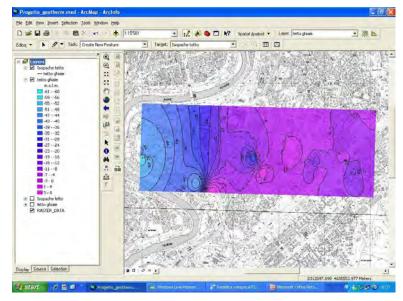


Figura 210. Distribuzione spaziale del tetto dell'acquifero più produttivo e relative isobate

geotermica a bassa entalpia. Il modello concettuale è stato sviluppato al fine di produrre un mezzo efficiente, editabile, scalabile ed user friendly, ovvero facilmente utilizzabile anche dai non esperti in sistemi informativi territoriali attraverso semplici interrogazioni, query ed analisi.

Attraverso ricerche guidate l'utente può infatti passare da una prima fase di "screening" territoriale ad una fase di interrogazione del dato archiviato per giungere a conclusioni utili alla progettazione di indagini mirate alla definizione puntuale delle caratteristiche geotermiche del sito individuato. La realizzazione del geodatabase in ambiente ArcGis e dei relativi strumenti di analisi assumerebbe un ruolo importante nella valutazione delle potenzialità territoriali nell'ambito delle energie alternative qualora, attraverso alcune modifiche, si proceda alla pubblicazione in internet in modo da poter rendere fruibile a chiunque non solo l'interrogazione del dato ma anche il suo aggiornamento.

B. Ricognizione delle prestazioni di sistemi esistenti ed individuazione dei fattori di criticità

Obiettivo di questa attività è il completamento dell'impianto di Solar Cooling dell'edificio F51 e l'analisi dei dati di monitoraggio estivo ed invernale rilevati dall'impianto di supervisione realizzato a servizio dell'impianto stesso. E' stata inoltre realizzata una test-facility per impianti di tipo desiccant.

B.1 Impianto di Solar Cooling Edificio F51 centro ENEA Casaccia

È stata completata l'installazione del sistema di controllo ed acquisizione dati a servizio dell'impianto di solar cooling dedicato alla climatizzazione estiva ed invernale dell'Edificio F51. Il completamento del sistema di controllo e di acquisizione dati ha consentito quindi l'inizio delle attività di monitoraggio dell'impianto.

L'edificio F51, con destinazione d'uso ad uffici ed ubicato nell'area Capanna del Cenrto Ricerche ENEA Casaccia, è stato realizzato tra il 1982 ed il 1983. Si tratta di un edificio a pianta rettangolare delle dimensioni di 48,2 m di lunghezza per 12,2 mi di larghezza, ha un'altezza di circa 7 m ed ha l'asse trasversale orientato con l'asse nord-sud. Le caratteristiche dimensionali sono riportate in Tabella 53.

Tabella 53. Caratteristiche dimenzionali edificio F51

Superficie Edificio, m²	588
Superficie involucro, m²	1937
Volume lordo, m³	4116
Fattore di forma	0,47
Superficie ambienti riscaldati m²	1176
Volume ambienti climatizzati, m ³	3175

L'impianto di solar cooling è stato installato implementando

l'impianto di climatizzazione esistente costituito da una caldaia a gas naturale per il riscaldamento invernale e da un gruppo frigorifero per il raffrescamento estivo. L'impianto interno all'edificio, comunque rimasto invariato, è del tipo a fan coil ed aria primaria.

L'implementazione dell'impianto esistente con il solar cooling è stata caratterizzata dai seguenti interventi principali:

- 1. Installazione di un campo solare realizzato con pannelli solari a tubi evacuati;
- 2. Installazione di un accumulo di energia termica costituito da due serbatoi da 1500 litri ciascuno;
- 3. Installazione di un gruppo frigo ad assorbimento da 70 kW alimentato in parte dall'energia termica prodotta dal campo solare ed in parte dalla caldaia a gas metano esistente;
- 4. Installazione di un accumulo di acqua refrigerata prodotta dal gruppo frigorifero ad assorbimento costituito da un serbatoio da 2000 litri;
- 5. Installazione di una Torre evaporativa a servizio del Gruppo frigo ad assorbimento;
- 6. Installazione di un sistema di controllo ed acquisizione dei dati di funzionamento.

Lo schema dell'impianto è riportato in Figura 211.

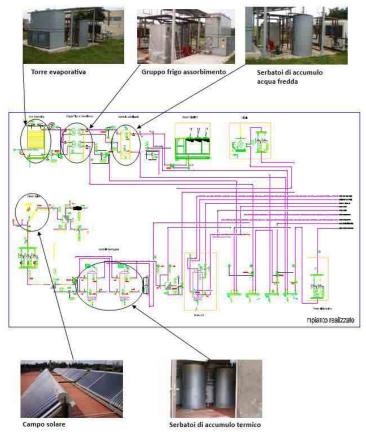


Figura 211. Schema funzionale dell'impianto

Il sistema di controllo dell'impianto rileva i parametri di funzionamento del campo solare (temperatura dell'acqua prodotta, temperatura all'interno dei serbatoi di accumulo, temperatura dell'acqua di mandata al gruppo frigo ad assorbimento) agendo sulle pompe di circolazione e sui sistemi di emergenza oltre ad interfacciarsi con il gruppo frigo a compressione e la caldaia esistenti per il comando di accensione e spegnimento degli stessi. Il sistema di controllo acquisisce dal sistema di controllo del gruppo frigo ad assorbimento gli stati di funzionamento delle macchine a servizio di quest'ultimo (torre evaporativa, pompe di circolazione dell'acqua di raffreddamento, di quella refrigerata e di quella calda).

Il sistema di acquisizione dati provvede ad acquisire i dati di funzionamento dell'impianto (portate, temperature, energia) relativamente ai flussi rappresentati in Figura 212. Il sistema installato ha la caratteristica di essere modulare e questo offre la possibilità di estendere in futuro il sistema, ad esempio, al controllo degli impianti presenti all'interno dell'edificio (elettrico, illuminazione, climatizzazione) costituendo in tal modo un sistema integrato in grado realizzare un controllo

finalizzato alla gestione completa dell'edificio, per ottimizzarne i consumi in funzione delle esigenze degli utenti e degli standard qualitativi richiesti.

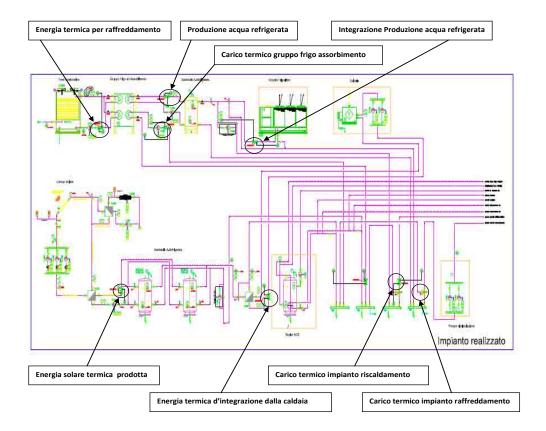


Figura 212. Posizionamento contacalorie all'interno dell'impianto

Dati di monitoraggio dell'impianto

Il gruppo frigo ad assorbimento installato (YAZAKI modello WFC 20) eroga la potenza frigorifera di 70 kW alla temperatura di alimentazione dell'acqua calda di circa 88 °C, assorbendo circa 100 kW di potenza termica.

Si deve rilevare che l'impianto è stato progettato per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento con tutta l'energia termica che può essere prodotta dal campo solare installato di superficie di circa 100 m² con l'eventuale integrazione della caldaia esistente. La massima produzione del campo solare nelle condizioni di irraggiamento ottimale (mese di Luglio) produrrebbe circa 60-70 kW di energia termica mentre i rimanenti 40-30 kW dovrebbero essere erogati dalla caldaia d'integrazione nel caso il carico frigo richiesto dalle utenze fosse di 70 kW. In tal caso la temperatura massima a cui dovrebbe lavorare la caldaia deve essere di almeno 90 °C in modo da alimentare il gruppo frigo ad assorbimento alla temperatura di circa 87-88 °C. Tuttavia, la caldaia esistente ha una sua temperatura massima di lavoro di circa 75 °C e, pertanto, la massima potenza termica alimentabile al gruppo frigorifero è di circa 60-70 kW con una produzione relativa di potenza frigorifera tra i 20 ed 40 kW in dipendenza della temperatura d'ingresso dell'acqua di raffreddamento.

I dati rilevati della potenza termica prodotta (Tabella 54) evidenziano che la potenza istantanea prodotta dal campo solare è quella attesa (circa 60 kW per il mese di luglio) e che la potenza frigorifera prodotta dal gruppo frigorifero è quella attesa dalle specifiche per i livelli termici dell'acqua calda di alimentazione come riportato nella Tabella 55. I dati sono stati rilevati nelle ore di massima insolazione (tra le 13.00 e le 16.00).

Tabella 54. Potenze istantanee (kW) - Funzionamento estivo

Mese	Giorno	Ora	kW1	kW2	kW3	kW4	СОР
7	15	13	58,1	0,6	58,7	41,0	0,700
7	15	14	49,3	0,7	50,0	35,5	0,709
7	15	15	36,9	13,1	50,0	35,5	0,709
7	15	16	22,7	22,9	45,6	32,7	0,718
8	11	13	49,1	0,3	49,4	35,0	0,708
8	11	14	41,0	3,2	44,2	31,1	0,703
8	11	15	29,6	10,6	40,2	28,2	0,701
8	11	16	16,5	15,7	32,3	22,8	0,708
8	23	13	48,3	15,9	64,1	44,7	0,696
8	23	14	39,6	19,0	58,7	41,0	0,700
8	23	15	27,6	26,8	54,4	38,3	0,703
8	23	16	14,0	31,6	45,6	32,7	0,718
9	3	13	39,8	10,2	50,0	35,5	0,709
9	3	14	32,2	16,5	48,7	34,7	0,711
9	3	15	21,6	28,5	50,0	35,5	0,709
9	3	16	9,4	36,2	45,6	32,7	0,718

- kW1 Potenza termica prodotto dal campo
- kW2 Potenza termica prodotta dalla Caldaia d'integrazione
- kW3 Potenza termica alimentata al G. Frigo ad assorbimento
- kW4 Potenza frigorifera prodotta dal G. Frigo ad assorbimento
- COP (kW4/kW3) Coefficiente di prestazione del G. Frigo ad assorbimento

Tabella 55. Temperature (°C) – Funzionamento estivo

Mese	Giorno	Ora	T1	T2	Т3	T4	T5	Т6	T7	Т8
7	15	13	78.0	87.0	74.0	71.4	77.0	77.0	11.9	8.8
7	15	14	75.8	86.4	72.0	69.7	75.0	75.0	11.5	8.9
7	15	15	71.0	80.0	72.0	69.7	75.0	74.4	11.8	9.2
7	15	16	66.0	73.5	71.0	68.9	74.0	73.0	12.1	9.7
8	11	13	77.8	86.5	75.3	73.1	78.3	78.3	11.6	9.3
8	11	14	76.0	85.0	74.0	72.0	77.0	76.9	11.5	9.2
8	11	15	71.0	80.0	73.0	71.2	76.0	75.5	11.9	9.7
8	11	16	66.2	75.0	71.0	69.5	74.0	73.3	12.1	10.4
8	23	13	76.0	85.0	75.3	72.4	78.3	77.6	11.9	8.6
8	23	14	75.0	84.5	74.0	71.4	77.0	76.2	11.5	8.4
8	23	15	71.0	82.0	73.0	70.5	76.0	74.8	11.8	8.9
8	23	16	65.0	75.0	71.0	68.9	74.0	72.6	11.9	9.4
9	3	13	76.0	84.5	72.0	69.7	75.0	74.6	11.9	9.3
9	3	14	75.0	84.0	71.7	69.5	74.7	74.0	11.5	8.9
9	3	15	71.0	81.3	72.0	69.7	75.0	73.8	11.8	9.2
9	3	16	67.0	75.0	71.0	68.9	74.0	72.4	12.2	9.3

Legenda:

- T1 Temperatura mandata al Campo Solare
- Temperatura ritorno dal Campo Solare T3 Temperatura mandata A. calda al G. Frigo ad assorbimento
- Temperatura ritorno dal Serbatojo d'accumulo termico
- Temperatura mandata dalla Caldaia
- Temperatura mandata alla caldaia
- Temperatura mandata Acqua refrigerata al
- gruppo frigo ad assorbimento Temperatura ritorno acqua refrigerata dal gruppo frigo ad assorbimento

Le temperature e i dati della potenza istantanea riportati nelle tabella sono quelli rilevati nei punti rappresentati in Figura 213.

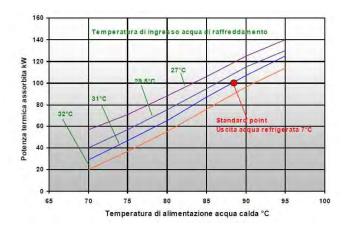


Figura 213. Potenza termica assorbita in funzione della temperatura di alimentazione dell'acqua calda

Da quanto premesso, i dati rilevati della potenza termica prodotta evidenziano che la potenza istantanea prodotta dal campo solare è quella attesa (circa 60 kW per il mese di luglio) e che la potenza frigorifera prodotta dal gruppo frigorifero è quella attesa dalle specifiche per i livelli termici dell'acqua calda di alimentazione.

Dai dati di funzionamento rilevati, l'impianto di solar cooling realizzato richiederà degli ulteriori adeguamenti che riguarderanno principalmente la caldaia d'integrazione ed il gruppo frigo a compressione esistenti. Relativamente a quest'ultima si dovranno apportare le opportune modifiche (sostituzione della valvola di scarico termico con termostato di blocco a riarmo manuale) per portare la temperatura massima di produzione a circa 95 °C. Si dovrà provvedere inoltre alla sostituzione del gruppo frigo a compressione esistente con uno di potenzialità di circa la metà di quella attuale o, in alternativa, aumentare la capacità di pompaggio del sistema.

B.2 Realizzazione di un nuovo set up sperimentale per il test e lo sviluppo di componenti impiantistici impiegati in sistemi desiccant cooling innovativi

L'attività è mirata all'indagine sperimentale di componenti aeraulici innovativi da impiegare in unità di trattamento dell'aria (UTA) desiccant cooling. A tal fine è stato realizzato un set up sperimentale composto da una cellula di test dove collocare il sistema da testare e da due unità di condizionamento dell'aria che provvedono a fornire due flussi d'aria a condizioni termoigrometriche fissate. Il sistema permette lo svolgimento di prove su diversi componenti impiegati nei sistemi desiccant cooling quali, componenti che realizzano il raffreddamento evaporativo diretto e indiretto, varie tipologie di scambiatori di calore sensibile e latente, rotori e sistemi a letto fisso contenenti materiale adsorbente.

Il primo componente esaminato è lo scambiatore di calore aria-aria a pacco con umidificazione continua del secondario per mezzo del quale è possibile realizzare processi di raffrescamento evaporativo indiretto. In questo componente, tramite l'umidificazione continua del flusso d'aria secondario è possibile massimizzare il raffreddamento sensibile del flusso d'aria primaria.

Il layout dell'intero sistema sperimentale realizzato è mostrato in Figura 214.

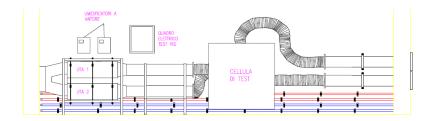


Figura 214. Schema del sistema di test per componenti aeraulici innovativi

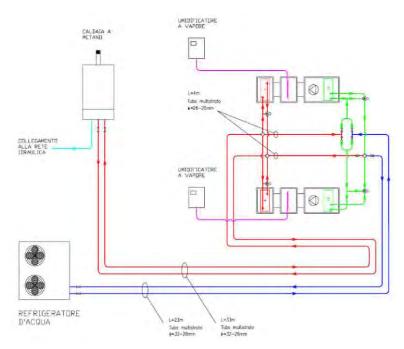


Figura 215. Schema dell'impianto di condizionamento dell'aria da utilizzare per il test di componenti aeraulici

Per il condizionamento dei due flussi d'aria esterna sono state installate due unità di trattamento dell'aria. Per mezzo di queste è possibile ottenere due flussi d'aria in condizioni prefissate di temperatura umidità e portata da utilizzare per testare il componente in esame. Al fine di poter eseguire le campagne di prova indipendentemente dalle condizioni dell'aria esterna e per una maggiore versatilità impiantistica, entrambe le UTA sono state dotate di una batteria di raffreddamento (o riscaldamento), di una sezione di umidificazione a vapore ed infine di una batteria di post-riscaldamento.

Inoltre il sistema è a portata variabile in modo da poter effettuare misure anche in condizioni di portata diverse e sbilanciate. Le batterie di scambio termico presenti nell'UTA sono collegate ad un refrigeratore e ad una caldaia che forniscono il freddo e il calore necessario per il raggiungimento delle condizioni dell'aria desiderate. L'immagine del set up sperimentale per il test di componenti aeraulici è riportata in Figura 215.

Il sistema di monitoraggio è costituito da diversi sensori di temperatura, umidità, pressione, portata e assorbimento elettrico posizionati in diversi punti dell'impianto i cui segnali sono acquisiti da un'unità centrale di acquisizione e controllo che dialoga con una logica di controllo implementata su Labview. In particolare, tramite l'invio di segnali di controllo di tipo proporzionale $(0-10\ V)$ e digitale, la logica di controllo provvede a regolare il funzionamento del refrigeratore d'acqua, della caldaia, delle quattro valvole a tre vie integrate nel sistema, degli umidificatori e dei ventilatori al fine di ottenere condizioni di temperatura, umidità e portata desiderate nei due flussi d'aria da impiegare nelle prove.

Realizzato il set up sperimentale, sono state eseguite prima diverse prove per testare il sistema di monitoraggio e controllo per avviare successivamente la fase di prove sullo scambiatore di calore aria-aria a pacco con umidificazione continua del secondario. Il componente in esame è della stessa tipologia dei due impiegati nell'UTA desiccant cooling, che verrà descritta nella successiva attività. Ciò permetterà, da un lato, un'analisi dettagliata delle prestazioni del componente preso singolarmente e dall'altro il test del funzionamento in integrazione con il resto del sistema costituito dall'UTA DEC.

Il processo di raffreddamento della corrente d'aria primaria per mezzo dell'umidificazione continua del flusso secondario è il seguente: l'aria secondaria viene fatta passare attraverso un pacco di umidificazione posto sotto lo scambiatore di calore e mantenuto bagnato dall'acqua spruzzata dagli ugelli, portandosi in condizioni vicine alla saturazione; successivamente, grazie ad un'umidificazione continua del flusso secondario anche all'interno dello scambiatore di calore è possibile massimizzare il raffreddamento del flusso d'aria primario.

In Figura 216 si riporta uno schema della cellula di test in cui è già inserito lo scambiatore a pacco da testare.

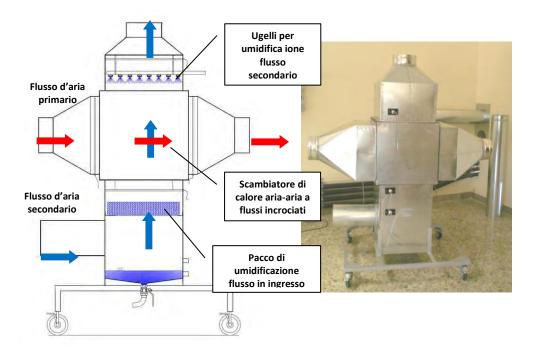


Figura 216. Cellula di test per scambiatori di calore aria-aria a pacco con umidificazione continua del flusso d'aria secondario

La prima serie di prove condotte sul componente ha avuto come obiettivo la caratterizzazione delle prestazioni in condizioni di funzionamento standard, ovvero in assenza di umidificazione del flusso d'aria secondario. Una delle grandezze caratteristiche del componente esaminate è il rapporto di temperatura definito come:

(Tin primario – Tout primario)/(Tin primario – Tin secondario)

Esso coincide con l'efficienza termica del componente se il tipo di fluido e le portate sui due lati dello scambiatore sono uguali.

Nella seconda serie di prove si è indagato invece il comportamento del componente in presenza di umidificazione del flusso di aria secondaria, ottenendo risultati interessanti in termini di aumento del rapporto di temperatura.

In definitiva, i primi risultati delle misure svolte sul componente sono decisamente incoraggianti ed invitano a proseguire la ricerca intrapresa, aprendo inoltre prospettive interessati soprattutto per applicazioni in accoppiamento di sistemi DEC.

Nella successiva annualità saranno condotte ulteriori indagini, al fine di testare il componente in diverse condizioni di funzionamento. In particolare, gli aspetti che verranno ulteriormente analizzati sono i seguenti:

- test dello scambiatore evaporativo in condizioni di ampi range di portata dell'aria;
- prove con differenti ugelli nebulizzatori;
- variazione della portata d'acqua ricircolata agli ugelli degli scambiatori evaporativi tramite variazione della velocità di rotazione della pompa di ricircolo;
- introduzione/esclusione di pacchi evaporativi all'ingresso degli scambiatori di calore HX 1 e 2 al fine di testare l'aumento di efficienza nello scambio termico dovuto al processo di umidificazione attuato sulla vena d'aria prima che questa entri nello scambiatore.

B.3 <u>Miglioramento delle prestazioni energetiche impianto desiccant cooling installato presso l'Università di</u> Palermo

Il monitoraggio dell'impianto d DEC (desiccant cooling) installato presso il laboratorio solare del Dipartimento DREAM dell'Università di Palermo, ha dimostrato come la tecnologia DEC possa realmente rappresentare una soluzione interessante per lo sfruttamento dell'energia solare per la climatizzazione invernale ed estiva degli ambienti. A fronte di ciò va inoltre sottolineata la necessità di ulteriori studi e sviluppi al fine di superare limiti attualmente presentati dalla tecnologia in esame.

Dalle esperienze fatte sul funzionamento dell'impianto e da un esame dettagliato dei dati di monitoraggio degli ultimi due anni, sono stati evidenziati i seguenti aspetti:

- l'impianto ha mostrato un funzionamento regolare durante la fase di monitoraggio;
- la soluzione impiantistica adottata che consente il recupero di parte del calore di condensazione della macchina frigorifera si è rivelata vantaggiosa;
- il contributo a livello stagionale delle batterie ausiliarie di raffreddamento, specialmente quella per il controllo della temperatura di mandata è notevole (circa 40% della produzione di freddo nell'UTA);
- si è riscontrato un trasporto di umidità nello scambiatore di calore sensibile legato alla bassa tenuta delle guarnizioni e presenza di particelle di polvere, sedimentate nel tempo sulla superficie interna dello scambiatore.

Lo studio di configurazioni impiantistiche alternative tramite simulazioni orarie dell'intero sistema ha portato all'individuazione di alcune strategie di ottimizzazione di seguito descritte e oggetto del presente lavoro di ricerca. In Figura 217 si riporta lo schema dell'UTA, precedente alle modifiche apportate.

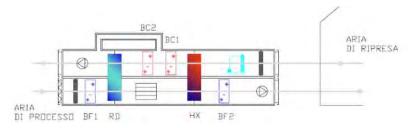


Figura 217. Unità desiccant cooling come si presentava prima delle modifiche

Nell'ottica della presente ricerca, si è deciso di modificare l'impianto sperimentale in modo tale da rendere possibile il test di soluzioni impiantistiche DEC innovative. In particolare, per lo svolgimento delle attività sperimentali, l'impianto in questione necessitava di una maggiore flessibilità e dell'introduzione di nuovi componenti. Le modifiche realizzate nell'ambito del presente progetto sono le seguenti:

- sostituzione dello scambiatore di calore rotativo con uno a piastre a flussi incrociati, al fine di eliminare il trasporto di umidità dal secondario al primario e di aumentare l'efficienza di scambio termico grazie all'introduzione di ugelli spruzzatori sul lato secondario;
- introduzione di un ulteriore scambiatore di calore a piastre mirato all'ottimizzazione del processo di raffreddamento evaporativo indiretto del flusso d'aria primaria, per mezzo di un flusso d'aria secondario proveniente dall'edificio, mantenuto costantemente in condizioni di saturazione. Grazie all'aumento di efficienza nello scambio termico l'introduzione di questo componente permette un migliore sfruttamento del potenziale di raffreddamento evaporativo contenuto nell'aria di ripresa dall'edificio, aumentando il contributo dell'unità DEC sul totale dell'energia frigorifera fornita;
- rigenerazione del rotore adsorbente utilizzando aria esterna anziché aria di ripresa. Da un attento esame dei dati di monitoraggio condotto sinora, sono stati riscontrati i seguenti due aspetti: il primo è inerente alla modesta incidenza legata ad un maggiore contenuto di umidità assoluta nell'aria di rigenerazione sulla capacità di deumidificazione della ruota al gel di silice; il secondo è legato a quanto detto al punto precedente circa la possibilità di sfruttare maggiormente il potenziale di raffreddamento contenuto nell'aria di ripresa.

Lo schema del sistema modificato è mostrato in Figura 218.

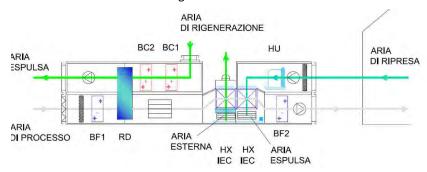


Figura 218. Schema di funzionamento dell'UTA DEC modificata, con raffrescamento evaporativo indiretto dell'aria di processo a 2 stadi

I componenti innovativi inseriti nel processo sono i due scambiatori a pacco, a flussi incrociati. I due componenti permettono di massimizzare il raffreddamento dell'aria di processo fino a raggiungere temperature di immissione tali da non necessitare in molti casi dell'utilizzo della batteria di post raffreddamento.

L'aria di processo subisce così un doppio raffrescamento evaporativo indiretto: nel primo scambiatore a flusso incrociato con aria esterna preventivamente portata in condizioni di saturazione, e in seguito in un secondo scambiatore della stessa tipologia posto in serie al primo in cui lo scambio termico avviene con il flusso d'aria di ritorno dall'edificio anch'esso portato a saturazione. In particolare, per entrambi gli scambiatori l'umidificazione dell'aria secondaria avviene prima con un umidificatore a pacco, e poi tramite acqua che viene spruzzata con ugelli all'interno delle alette, raccolta in una bacinella e ricircolata con una pompa ad immersione.

Secondo il nuovo schema, la ruota essiccante viene rigenerata con aria esterna. Questa soluzione, seppure richiede un ventilatore aggiuntivo per la movimentazione dell'aria, ha il vantaggio di disaccoppiare la rigenerazione della ruota essiccante con le condizioni dell'aria di ritorno dall'edificio, soprattutto in termini di portata dell'aria. Infatti, grazie alla presenza di un ventilatore dedicato è possibile modulare la portata d'aria di rigenerazione sulla base delle esigenze di deumidificazione e della temperatura disponibile nel serbatoio di accumulo solare evitando l'uso di by-pass sulla ruota.

È stato aggiornato anche il sistema di acquisizione dati, regolazione e controllo implementato su Labview. In particolare, al fine di esaminare le prestazioni degli scambiatore di calore, sono stati introdotti nuovi punti di misura di temperatura e umidità. Inoltre, per aumentare la versatilità e le possibilità di prova sono stati introdotti dei dispositivi per il controllo della velocità dei ventilatori, serrande di apertura/chiusura in modo tale da permettere diversi passaggi d'aria e by-pass della portata d'acqua inviata agli ugelli.

Le prove condotte hanno mostrato risultati molto interessanti relativamente alle prestazioni energetiche ottenute grazie all'impiego degli scambiatori di calore con raffrescamento evaporativo.

Nella prossima annualità ulteriori indagini saranno condotte, al fine di ottimizzare l'intero processo e ridurre ulteriormente i consumi di elettricità. In particolare verranno analizzati:

- la modalità di funzionamento secondo la quale l'aria di ritorno in uscita dal secondario dello scambiatore HX 2, rientra nello scambiatore HX 1, continuando così lo scambio termico con l'aria di processo; questa modalità di funzionamento è resa possibile dal sistema di serrande di apertura e chiusura di cui il sistema è provvisto; ciò permetterebbe l'esclusione del ventilatore di estrazione dello scambiatore HX 1, riducendo così i consumi di elettricità;
- regolazione della portata d'aria di rigenerazione al variare delle specifiche esigenze di deumidificazione richiesta; ciò permetterebbe di ottimizzare lo sfruttamento del calore di rigenerazione, e di aumentare di conseguenza il COP (ciefficiente di prestazione) termico del sistema.

C. Realizzazione di Laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi

Obiettivo di questa attività è la realizzazione, presso il centro ENEA di Trisaia, di un laboratorio per la caratterizzazione di collettori solari a media temperatura sia del tipo heat-pipe (con funzionamento a temperature superiori ai 100°C) che a concentrazione, che costituirà un'estensione di quello già esistente (accreditato SINAL) che opera nel campo delle applicazioni a bassa temperatura. Ulteriore obiettivo di questa attività è la realizzazione di una facility per il test di pompe di calore elioassistite presso la sala prove CAPOC 2 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

C.1 Realizzazione piattaforma sperimentale per caratterizzazione collettori solari a media temperatura

Scopo principale della presente linea di attività è la realizzazione di laboratori per la qualificazione di componenti e sistemi destinati alla climatizzazione estiva ed invernale degli edifici e basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (sistemi di solar heating & cooling).

Data la varietà di soluzioni impiantistiche destinate alle applicazioni di "solar heating &cooling" che richiedono, tra l'altro, l'adozione di soluzioni tecnologiche innovative per quanto attiene la parte solare (sistemi del tipo heat-pipe di nuova generazione, sistemi a concentrazione basati su ottiche focalizzanti e non focalizzanti), risulta di particolare importanza la conduzione di attività di ricerca e sperimentazione (attraverso analisi termofluidodinamiche abbinate a verifiche sperimentali) su componenti commerciali e/o prototipi.

Sulla base di quanto detto, la presente linea di attività ha tra i suoi obiettivi principali la realizzazione, presso il centro ENEA di Trisaia, di un laboratorio per la caratterizzazione energetica di collettori solari a concentrazione,

che costituirà una estensione di quello già esistente (accreditato ACCREDIA) che opera, da oltre 10 anni, nel campo delle applicazioni a bassa temperatura.

 Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura.

L'analisi ha riguardato principalmente i seguenti aspetti:

- analisi delle diverse tipologie di concentratori solari utilizzanti sia sistemi ottici focalizzanti (concentratori parabolici lineari, concentratori parabolici puntuali, concentratori a specchi di Fresnel, ecc) che non focalizzanti (Compound Parabolic Concentrator, CPC). Da questa attività è emersa l'estrema variabilità di soluzioni componentistiche disponibili sia a livello commerciale che prototipale che si differenziano non solo per la tecnologia utilizzata per concentrare la radiazione solare ma anche per taglia e caratteristiche dei materiali utilizzati sia per il sistema ottico che per il ricevitore. Da ciò è emersa la necessità di un'ampia rangeability in termini di portata e temperatura di lavoro che la stazione sperimentale deve avere per garantire la sperimentazione sia delle diverse tecnologie commerciali attualmente disponibili, sia per sperimentare prototipi attualmente in fase di sviluppo ed ottimizzazione da parte di aziende operanti nel settore, con alcune delle quali sono già in essere attività di collaborazione e supporto tecnico-scientifico allo sviluppo di nuovi prototipi;
- definizione delle metodiche di prova da adottare per la caratterizzazione energetica dei collettori a media temperatura. Sono state analizzate le metodiche attualmente in uso per la caratterizzazione di collettori a bassa temperatura che prevedono la misura delle prestazioni termiche sia in stato stazionario, sia in regime transitorio (metodo QDT – Quasi Dynamic Test). In particolare sono state valutate le possibili varianti da apportare a tali metodi per tener conto degli effetti introdotti dalla concentrazione della radiazione solare;
- attività preliminare di sperimentazione su collettori a media temperatura con l'ausilio dei circuiti di prova utilizzati per la caratterizzazione di collettori a bassa temperatura e che impiegano acqua come fluido termo-vettore. Tali prove preliminari hanno avuto lo scopo di verificare e mettere a punto le metodiche di prova di cui sopra, in vista della caratterizzazione energetica a temperature fino a 300 °C mediante l'uso di fluidi diatermici.
- o Soluzioni tecniche adottate nel dimensionamento del circuito di prova e del sistema di acquisizione dati

Al fine di individuare i valori ottimali per il dimensionamento dei componenti il circuito di prova, sono state effettuate simulazioni dinamiche, mediante algoritmi sviluppati in ambiente MatLab, dei principali sottosistemi (circuito di riscaldamento, circuito di raffreddamento, ecc.) che compongono il circuito termo-idraulico.

In particolare sono state condotte simulazioni di diverse possibili configurazioni di impianto al fine sia di determinare quella che meglio rispondesse ai requisiti di stabilità, precisione a regime e basso consumo di combustibile sia per avere utili indicazioni per il dimensionamento dei vari componenti il sistema. Le simulazioni hanno riguardato sia il raffreddamento ed il riscaldamento in linea, sia quello in cui si sono introdotti serbatoi di accumulo termico per smorzare le fluttuazioni delle grandezze regolate. Tale seconda opzione in termini di stabilità e precisione della regolazione si è dimostrata nettamente migliore. Le simulazioni sono state effettuate scrivendo le equazioni di bilancio energetico e di massa in transitorio per i vari componenti del circuito e simulando il sistema di regolazione con controllori PID indipendenti per ogni loop di regolazione.

Il fine principale della simulazione è stato quello di verificare i tempi di risposta del sistema nel suo complesso per portarsi in condizioni di regime una volta impostati i valori di set-point delle grandezze da controllare e la verifica, una volta raggiunto lo stato stazionario, della rispondenza entro i limiti richiesti dalla metodica di prova adottata (stabilità di temperatura entro 0,1 °C, stabilità di portata entro l'1% del valore di set-point) dei valori di regime delle grandezze controllate con i valori di set-point impostati. Introducendo, inoltre, perturbazioni di tipo random si è verificata la capacità del sistema di regolazione di annullare gli effetti di tali perturbazioni. Poiché, per quanto detto sopra, per rendere maggiormente stabili le regolazioni di temperatura si sono introdotti nel circuito serbatoi fungenti da sistema di accumulo termico, si è svolta un'analisi parametrica con lo scopo di determinare il volume minimo di tali serbatoi in grado di assicurare la stabilità e la precisione di regolazione richiesta.

Con le simulazioni effettuate si è inoltre verificata la capacità del sistema di adattarsi, in termini di requisiti di stabilità e precisione, alle varie condizioni di funzionamento, tenuto conto del fatto che esso dovrà lavorare con una rangeability estremamente elevata (temperature di lavoro comprese tra 80 e 350°C; portate di prova comprese tra 100 e 3000 kg/h). Inoltre si è verificata la capacità del sotto-sistema di raffreddamento di introdurre un abbattimento contenuto della temperatura in uscita dai collettori compatibile con la potenza termica della caldaia in quanto un raffreddamento eccessivo richiederebbe una potenza della caldaia elevata con maggiori costi sia di impianto che di esercizio (elevato consumo di combustibile) e possibili pendolazioni del sistema di

regolazione. Da tale punto di vista il raffreddamento in linea con un semplice scambiatore con fluido diatermico raffreddato ad aria o acqua, si è rivelata non praticabile in quanto, specie ad elevate temperature di funzionamento, tale sistema di raffreddamento introduce una diminuzione troppo elevata della temperatura del fluido diatermico. Pertanto si è scelta l'opzione di introdurre un serbatoio inerziale ed una valvola miscelatrice a tre vie in modo da raffreddare solo una parte del fluido e mediante il serbatoio livellare le fluttuazioni di temperatura. Le simulazioni condotte hanno confermato la bontà di tale scelta.

Infine, allo scopo di verificare quanto ottenuto mediante gli script di MatLab, si è proceduto alla simulazione dell'intero impianto di prova, compreso il collettore a concentrazione, mediante TRNSYS, ottenendo risultati confrontabili con quelli precedentemente ottenuti.

In base ai risultati delle simulazioni sia in ambiente MatLab che TRNSYS, si è proceduto al dimensionamento dei vari componenti il circuito termo-idraulico (generatore ad olio diatermico con bruciatore a GPL, circuito di riscaldamento del fluido termo-vettore, circuito di raffreddamento del fluido termo-vettore, componentistica termo-idraulica, piping e coibentazione).

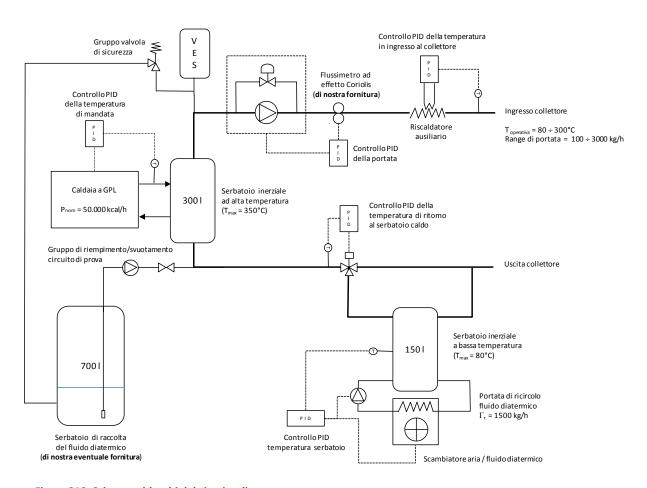


Figura 219. Schema a blocchi del circuito di prova

Con riferimento alla Figura 219, che indica schematicamente i vari elementi che costituiscono il circuito di prova, si sono dimensionati i componenti come segue:

- per il riscaldamento del fluido diatermico nelle condizioni più gravose è risultata necessaria una caldaia della potenza di 50 kW e si è optato per una riscaldatore alimentato a GPL;
- si è scelto un serbatoio inerziale della capacità di 300 litri in grado di garantire uno smorzamento adeguato delle fluttuazioni della temperatura di mandata del fluido diatermico;
- per il sistema di raffreddamento, come accennato in precedenza, si è individuata una configurazione comprendente come componenti principali:
 - uno scambiatore fluido diatermico-aria in grado di mantenere, mediante opportuna regolazione della portata d'aria allo scambiatore, una temperatura di 80-90 °C in un serbatoio inerziale di 150 litri;

- una valvola miscelatrice con lo scopo di raffreddare solo una parte del fluido diatermico in modo da evitare un raffreddamento eccessivo di quest'ultimo con conseguente incapacità della caldaia di assicurare il set-point desiderato della temperatura di mandata del fluido diatermico al serbatoio inerziale ad alta temperatura;
- allo scopo di ottenere una regolazione fine della temperatura in ingresso al collettore e per compensare le perdite lungo la tubazione di mandata, si è inserito un sistema ausiliario di riscaldamento del fluido diatermico costituito da una resistenza scaldante della potenza di 5 kW, posizionata a ridosso dell'ingresso del collettore e munita anch'essa di controllo PID;
- per quanto riguarda, invece, la scelta del fluido-termovettore si è optato per un fluido diatermico sintetico ad alta stabilità termica (TERMINOL 66) in grado di lavorare a temperature fino a 350°C con basse pressioni di funzionamento;
- infine, per la supervisione ed il controllo dei vari parametri di processo (temperatura di mandata del fluido termo-vettore, portata di processo, temperatura di ritorno al sistema di riscaldamento, temperature dei serbatoi inerziali ad atta e bassa temperatura) si è optato per un sistema SCADA che implementa una regolazione PID indipendente per ogni grandezza controllata e che consente di controllare, attraverso un'interfaccia grafica user-friendly (Figura 220), ogni fase del processo di prova.

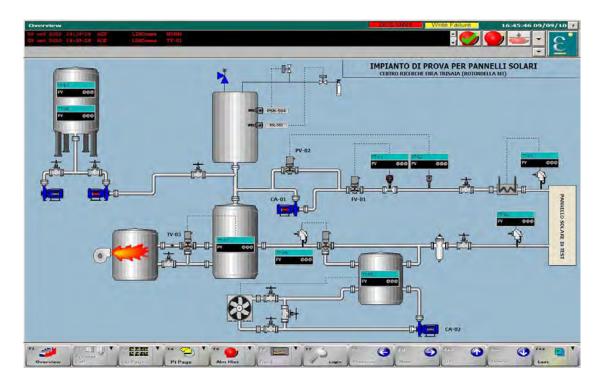


Figura 220. Interfaccia grafica del DCS

L'intero circuito di prova è stato progettato per consentire la determinazione sperimentale dell'efficienza termica del collettore in diverse condizioni operative, sia dal punto di vista meteo-climatico (per diversi angoli di incidenza della radiazione solare, per diversi valori del rapporto diffusa/globale, sia termo-fluidodinamico (differenti prove sull'intero campo operativo del collettore in termini di temperatura e portata), il tutto sotto la supervisione di un sistema di acquisizione dati dedicato, che ha la funzione di acquisire le diverse grandezze fisiche necessarie per la caratterizzazione delle prestazioni energetiche dei collettori solari a media temperatura.

In particolare, le grandezze fisiche da monitorare sono:

- temperatura del fluido termo-vettore in ingresso al collettore in prova;
- temperatura del fluido termo-vettore in uscita al collettore in prova;
- differenza di temperatura tra uscita ed ingresso al collettore;
- portata massica del fluido termo-vettore;
- parametri meteo-climatici: radiazione solare globale, radiazione diffusa, radiazione diretta, temperatura ed umidità ambiente, velocità del vento, ecc..

Data l'accuratezza richiesta dalla metodica di prova, e sulla base dell'esperienza acquisita nella conduzione di prove su collettori a bassa temperatura, si è optato per la seguente strumentazione di misura:

- termoresistenze Pt100 di classe A secondo IEC-751, che consentono la misura delle temperature di processo con accuratezze inferiori al 0,1 °C;
- flussimetro ad effetto Coriolis con trasmettitore 4-20 mA (Micro Motion mod. F050), adatto per applicazioni ad alta temperatura in grado di lavorare con fluidi diatermici, e caratterizzato da alti livelli di accuratezza (± 0.1% del valore letto) nella misura della porta massica;
- sensori per la misura della radiazione solare, costituiti da un piranometro (Kipp&Zonen mod. CMP11 classe "secondary standard" secondo ISO 9060) per la misura della radiazione globale e da un pireliometro (Kipp&Zonen mod. CHP1 classe I secondo ISO 9060) per la misura della radiazione diretta;
- sensori per il monitoraggio dei parametri meteo-climatici (termo-igrometro, anemometro, pluviometro).

Infine, al fine di acquisire i vari dati di processo con i livelli di accuratezza richiesti dal metodo di prova, è stato dimensionato un sistema di acquisizione dati (della National Instruments) munito di moduli di acquisizione, controllo e condizionamento dei segnali dalle seguenti caratteristiche principali:

- modulo di acquisizione e controllo con risoluzione a 16 bit, dotato di connettività USB per il collegamento ad un PC dedicato;
- modulo per l'acquisizione di segnali analogici, sia in tensione che corrente, dotati di amplificatori a controllo di guadagno e filtri passa basso a 2 Hz;
- modulo per l'acquisizione di RTD a 4 fili con 16 canali indipendenti dotati di amplificatori a controllo di guadagno e filtri passa basso a 5 Hz;
- modulo per la generazione di segnali analogici (tensione, corrente) con risoluzione a 12 bit;
- modulo per l'acquisizione e generazione di segnali digitali (TTL, CMOS).
- Realizzazione della piattaforma sperimentale di caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura

Definite le specifiche di progetto si è proceduto alla realizzazione della piattaforma sperimentale da ubicarsi in un'apposita area localizzata nei pressi del Laboratorio di qualificazione dei collettori e sistemi solari del C.R. ENEA Trisaia.

La figura 221 mostra l'impianto totalmente assemblato su skid nella sua configurazione definitiva.



Figura 221. Foto del circuito di prova assemblato su skid

In conclusione, all'interno di questa linea di attività sono state portate a termine le seguenti azioni:

 sono state affrontate le problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura;

- sono state affrontate le problematiche connesse al dimensionamento ottimale dei diversi componenti il circuito di termo-idraulico di prova per i collettori a media temperatura. Ciò ha consentito di progettare una stazione sperimentale con la quale il Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia sarà in grado di analizzare e caratterizzare un vasta gamma di sistemi solari a concentrazione da destinare ad applicazioni avanzate del solare termico;
- si è proceduto alla fase realizzativa della stazione sperimentale, e si è proceduto alla verifica funzionale dei diversi componenti l'impianto al fine di testarne il suo corretto funzionamento in fase operativa.

C.2 Realizzazione di una test facility per pompe di calore con evaporatore elioassistito

In quest'ambito era prevista la realizzazione di una facility per la caratterizzazione di pompe di calore elioassistite che ha come finalità la verifica tecnica ed economica della convenienza di questa soluzione rispetto a quelle che utilizzano altre sorgenti termiche, sia provenienti da combustibili fossili che da fonti rinnovabili (aria o terreno). Le pompe di calore del tipo a compressione di vapore rappresentano una tecnologia per certi aspetti matura, che viene prevalentemente utilizzata per il raffreddamento e la climatizzazione estiva, mentre per il riscaldamento invernale viene ancora privilegiato nella maggior parte dei casi l'utilizzo di impianti a combustione. La valutazione del possibile impiego di pompe di calore elioassistite anche per il riscaldamento invernale va quindi nel senso di una maggiore integrazione e semplificazione (con evidenti vantaggi di carattere economico) degli impianti di climatizzazione estivi ed invernali, consentendo inoltre un significativo ridimensionamento della quantità di combustibili fossili utilizzati.

La difficoltà principale nell'utilizzo delle pompe di calore anche per il riscaldamento invernale riguarda il reperimento di sorgenti termiche dotate di elevata qualità, intesa come costanza della temperatura ed elevata capacità termica, grandezze che definiscono il grado di inerzia termica della sorgente. La sorgente termica più utilizzata nelle macchine a compressione di vapore è l'aria che, pur essendo dotata di una enorme capacità termica, in condizioni invernali ha tuttavia una grande variabilità in termini di temperatura ed umidità tanto da inficiare il COP delle pompe di calore del tipo aria-aria o acqua-aria a causa del fenomeno della formazione di brina sull'evaporatore. Il limite che sconsiglia l'utilizzo delle pompe di calore per il riscaldamento degli ambienti durante il periodo invernale è quindi legato ai numerosi cicli di sbrinamento tanto più frequenti quanto più è bassa la temperatura ambiente ed è elevata l'umidità relativa.

In natura esistono però anche sorgenti di grande capacità termica con una variabilità contenuta della temperatura della sorgente: il terreno, ad esempio, può rappresentare una valida alternativa all'aria soprattutto se l'energia termica viene prelevata a profondità notevoli (maggiore stabilità della temperatura): le sonde geotermiche devono quindi essere installate a profondità dell'ordine dei 90-100 m, con considerevoli costi iniziali di investimento. Sistemi economicamente più vantaggiosi possono ottenersi avvalendosi di pannelli solari termici piani non vetrati, poco costosi che sfruttando l'irraggiamento solare, possono mettere a disposizione una sorgente termica utilizzabile in una pompa di calore a scambio acqua-acqua.

In generale, le pompe di calore sono macchine in grado di trasferire calore da una sorgente a temperatura più bassa verso una a temperatura maggiore, spendendo dell'energia (Figura 222): questa può essere fornita da un

compressore, che richiede un dispendio di energia elettrica (pompe di calore a compressione), oppure da un bruciatore alimentato a gas metano o a GPL (pompe di calore ad assorbimento).

La pompa di calore si dice "reversibile" quando è predisposta alla duplice funzionalità di riscaldamento e condizionamento.

Per stimare l'efficienza di una pompa di calore (in particolare come riscaldatore) viene utilizzato il COP (Coefficient of Performance), definito come rapporto tra il calore ceduto dal condensatore all'ambiente da riscaldare e l'energia elettrica consumata al compressore. Quest'ultima può essere ridotta elevando preventivamente il contenuto termico

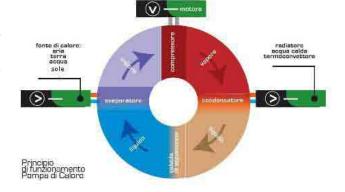


Figura 222. Principio di funzionamento di una pompa di calore

della sorgente inferiore. Questo può essere ottenuto integrando le pompe di calore con impianti ad energia solare. Questi impianti sono formati da collettori solari a bassa efficienza per la captazione di energia solare, collegati ad una pompa di calore di tipo acqua-acqua per la produzione di acqua calda, che viene poi mandata al sistema di distribuzione del calore interno all'edificio servito dall'impianto. Un possibile schema di impianto (accoppiamento

termico "in serie") è illustrato nella figura 223. In questo schema non è riportato lo schema di funzionamento dell'impianto in fase di raffrescamento, poiché è sufficiente ricorrere ad un sistema tradizionale di smaltimento del calore (es. drycooler, torre evaporativa).

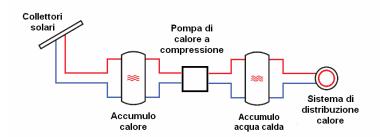


Figura 223. Schema essenziale di un impianto elioassistito in funzionamento invernale con abbinamento termico in serie

L'impianto sperimentale costruito presso il centro ricerche della Casaccia (schema in Figura 224) prevede anche la possibilità di monitorare e provare il funzionamento delle pompe di calore durante il periodo estivo (funzione di condizionamento) essendo stato previsto un drycooler dedicato allo scopo.

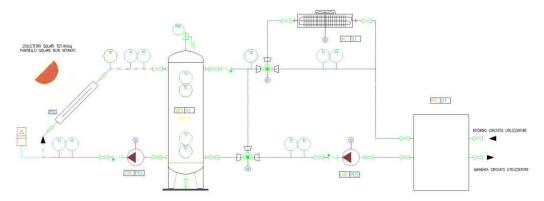


Figura 224. Schema funzionale del laboratorio per la caratterizzazione sperimentale di impianti a pompa di calore elioassistita

Nel funzionamento invernale la pompa di calore produce al condensatore un incremento di temperatura dell'acqua destinata all'utenza di 5 °C. L'acqua uscente dall'evaporatore viene inviata, tramite la pompa P02, al serbatoio inerziale VES01 della capacità di 2000 litri, dopo essere passato attraverso la valvola miscelatrice a tre vie. L'acqua prelevata dal serbatoio, per mezzo della pompa di circolazione P01, viene mandata ai collettori solari ed ivi riscaldata. Quando la temperatura all'interno del serbatoio raggiunge il valore di set, viene chiuso il flusso d'acqua verso i collettori per mezzo di un sistema di regolazione che agisce sulla pompa P01. L'acqua è infine prelevata dal serbatoio per essere inviata alla mandata dell'evaporatore della pompa di calore. Nel caso in cui la temperatura dell'acqua proveniente dal serbatoio risulti troppo elevata, con il rischio di ottenere per il fluido refrigerante un valore di temperatura massima all'evaporatore superiore a quella massima ammissibile, questa viene miscelata con l'acqua fredda uscente dall'evaporatore azionando opportunamente la valvola a tre vie: è inoltre possibile raffreddare ulteriormente l'acqua deviando la valvola e facendo passare il fluido attraverso l'aircooler AC01.

Nel funzionamento estivo, l'acqua inviata all'utenza viene raffreddata di 5 °C all'evaporatore. L'acqua uscente dal condensatore viene avviata attraverso la valvola a tre vie VR1 ed attraverso la valvola on-off VR2 all'air-cooler AC-01 dove viene raffreddata per convezione forzata prima di essere rinviata all'ingresso del condensatore. Ovviamente in questa tipologia di funzionamento, i collettori solari non vengono utilizzati.

Con la test facility realizzata sarà possibile qualificare il funzionamento di pompe di calore diverse, analizzandone il comportamento in abbinamento ad un sistema elioassistito. Si è quindi deciso di utilizzare una superficie captante (circa 41,25 m²) prossima a quella massima disponibile, in modo da ampliare la possibilità di utilizzo della test facility.

La pompa di calore elioassistita è decisamente una tecnologia poco sviluppata e nel mercato, salvo rare eccezioni, risulta completamente assente. È però oggetto di studio da parte di diversi ricercatori e esistono vari impianti

sperimentali. Dalle prime simulazioni dinamiche effettuate, risulta evidente l'aumento della potenza termica fornita e l'abbassamento della potenza elettrica assorbita da una pompa di calore abbinata ai collettori solari durante il funzionamento invernale.

D. Sviluppo di componenti innovativi

Obiettivo di questa attività è la progettazione e lo sviluppo di prototipi di tre componenti principali da impiegare in impianti di solar cooling, quali:

- macchina ad assorbimento ad acqua ammoniaca per impieghi solari, progettata espressamente per basse temperature di attivazione (95-100°C);
- pannelli solari a tubi evacuati ad heat pipe, da accoppiare alla pompa di calore ad acqua ammoniaca;
- scambiatore di calore in controcorrente con layer adsorbenti e raffreddamento evaporativo indiretto (desiccant compatto: ECOS) per impianti innovativi di solar air-conditioning.

D.1 Realizzazione di una macchina ad assorbimento ad acqua ammoniaca per impieghi solari

Il Solar Cooling comprende una famiglia di tecnologie che permettono il raffrescamento degli edifici utilizzando in massima parte l'energia solare (Figura 225). La tipologia di impianto più frequentemente utilizzata è quella basata sull'impiego di pannelli solari accoppiati a cicli termodinamici chiusi, quali quelli delle macchine ad assorbimento, particolari condizionatori che invece dell'energia meccanica di un motore, impiegano energia termica. Una caldaia di integrazione è normalmente prevista per garantire il funzionamento dell' impianto in assenza di sole.

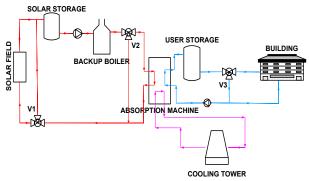


Figura 225. Schema di solar cooling

I cicli ad assorbimento permettono di realizzare macchine per il condizionamento dell'aria alimentate con energia termica proveniente da varie fonti. La fonte termica in assoluto più interessante per tali scopi è senza dubbio quella solare, per il fatto di essere particolarmente abbondante, specie nel nostro Paese, oltreché gratuita e rinnovabile. Dal connubio fonte solare-cicli ad assorbimento, è quindi possibile produrre acqua fredda a circa 7 °C per il condizionamento estivo degli ambienti mediante fan coil o batterie alettate. Tali impianti di solar cooling, vengono già realizzati (qualche decina in Italia) utilizzando nella maggior parte dei casi delle macchine ad assorbimento ad Acqua-Bromuro di Litio di produzione estera (Yazaky, Ebara, Carrier, Trane, Broad, ecc.). Le taglie minime disponibili sono di 17,5-35 kW freddi, e relegano queste applicazioni al settore terziario, mentre per il settore residenziale non esiste attualmente una produzione di serie consolidata con taglie adatte.

Da un'analisi di questa nicchia di mercato, condotta dai nostri partner industriali, emerge che le taglie più richieste nel settore medio residenziale e piccolo terziario sono quelle da 18 e 50 kW frigoriferi. L'utilizzo dei cicli ad Acqua –Bromuro di Litio che coprono la stragrande maggioranza di queste applicazioni, comporta alcuni svantaggi, primo fra tutti l'impossibilità ad utilizzare le macchine anche come pompe di calore invernali, salvo rari casi quando è disponibile acqua a temperatura di circa 10-12 °C come sorgente secondaria, e si possono utilizzare apparecchi distributori di energia termica a bassa temperatura (\approx 35 °C) come i pavimenti radianti.

Scelta del ciclo termodinamico

Gli impianti per solar cooling basati su macchine ad assorbimento si differenziano in base al tipo di ciclo della macchina ad assorbimento utilizzata:

a) Macchine ad Acqua-Bromuro di Litio a singolo effetto

Queste macchine necessitano tipicamente di acqua calda a 80-100 °C per il loro azionamento, producibile
mediante pannelli solari a bassa concentrazione (pannelli a tubi evacuati). Le loro prestazioni frigorifere (COP)

sono pari a 0,7 rispetto al calore di alimentazione. Lo smaltimento del calore prodotto dal ciclo termodinamico avviene a temperature di 30-40 °C e pertanto per il loro funzionamento è indispensabile una torre evaporativa, che comporta ingombri e consumi aggiuntivi e potenziali pericoli per colture batteriche. Dal momento che utilizzano acqua come fluido refrigerante non possono essere generalmente impiegate come pompe di calore invernali, salvo rari casi.

b) Macchine ad Acqua-Bromuro di Litio a doppio effetto

Molto simili alle precedenti, di cui sono la versione ad alta efficienza, presentano COP frigoriferi molto elevati, pari a circa 1,1, necessitano di acqua calda o vapore a circa 160 °C, producibili soltanto con più costosi pannelli solari a medio-alta concentrazione (pannelli parabolici ad inseguimento solare).

c) Macchine ad Acqua-Ammoniaca

Da poco prese in considerazione per il solar cooling, hanno un COP \approx 0,6/0,7 e richiedono temperature di funzionamento di circa 190 °C, ottenibili con gli stessi pannelli solari a concentrazione del caso precedente. I vantaggi aggiuntivi di queste macchine consistono nel poter funzionare senza bisogno di torri evaporative, e soprattutto nella reversibilità del funzionamento. La stessa macchina può operare anche per il riscaldamento invernale permettendo, in assenza di sole, un risparmio di combustibile pari a circa il 50% rispetto alle caldaie tradizionali ad alta efficienza. Macchine di nuova concezione, non derivate da quelle alimentate a fiamma diretta, possono richiedere temperature di azionamento minori a vantaggio del costo e dell'efficienza dei pannelli solari.

Sulla base di queste considerazioni e sentiti i partner industriali del settore, si è deciso di adottare un ciclo ad acqua-ammoniaca, a bassa temperatura (≈ 100 °C) per sfruttare al meglio la radiazione solare mediante i pannelli a tubi evacuati e che permette il funzionamento reversibile come pompa di calore invernale con COP attesi di $\approx 1,5$ su base gas.

Simulazione stazionaria

Una macchina ad assorbimento ad acqua-ammoniaca è costituita da un generatore di vapore con annessa colonna di rettifica per l'ammoniaca, da due valvole che separano una zona ad alta pressione da una a bassa pressione, da una pompa ad alta prevalenza e da alcuni scambiatori di calore.

La scelta del ciclo termodinamico è fondamentale per ottenere le migliori prestazioni in base alle specifiche di funzionamento. In particolare, per avere un buon rendimento di generazione da parte dei pannelli solari è essenziale non richiedere temperature troppo elevate di alimentazione al generatore della macchina. Un elevato COP del ciclo, anche se meno importante con fonti energetiche gratuite, permette tuttavia di ridurre la superficie del campo solare ed il costo di investimento complessivo. Esistono vari schemi possibili per realizzare un prototipo di macchina ad assorbimento ad acqua-ammoniaca, quelli a più elevato rendimento sfortunatamente richiedono maggiori temperature di funzionamento. Si è cercato inizialmente di verificare l'esistenza di un ciclo operabile ad aria esterna per evitare l'uso della torre evaporativa, tuttavia le proprietà della miscela acqua-ammoniaca non permettono tale realizzazione se non con temperature del fluido di raffreddamento inferiori a quelle ottenibili in estate con la torre (~31°C). La simulazione è stata condotta quindi soltanto sugli schemi più semplici a singolo stad' ("" 220")

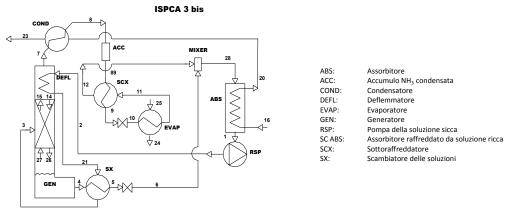


Figura 226. Pompa monostadio

Si sono evitati schemi di tipo GAX (Ger Absorber heat Exchange, Figura 227) a p rendimento, che avrebbero richiesto tempe superiori a quella di alimentazione prefissa maggior costo realizzativo e colonne di distil più elevate.

I risultati delle simulazioni condotte i software sviluppato precedentemente in mostrano la possibilità di realizzare una ma che operi nelle condizioni riportate in Tabella

Per ottenere tale risultato si è quindi accettare sia l'uso della torre evaporativa, presente negli impianti di solar sooling attu l'impiego di distributori a bassa temperatura (pavimenti radianti) compatibili con questo tipo di applicazioni avanzate per il condizionamento dell' aria. La temperatura limite di funzionamento per l'alimentazione solare in queste condizioni risulta essere 95 °C, quindi leggermente più bassa della prefissata, tuttavia in questo caso si sarebbe dovuta costruire una pompa della soluzione ammoniacale con portata molto più grande e quindi poco conveniente.

Progettazione e realizzazione del prototipo

Normalmente tutti i componenti di una macchina di questo tipo non sono reperibili sul mercato, fatta eccezione per i motori elettrici, le ventole, le valvole, i circolatori per l'acqua e pochi altri elementi. Ultimamente tuttavia è comparso sul

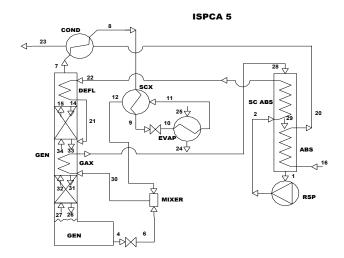


Figura 227. Schema tipo GAX

Tabella 56. Specifiche di funzionamento della macchina

Tipo	Pompa di Calore Reversibile
Fluidi di lavoro	Acqua-Ammoniaca
Scambio termico	Acqua-Acqua
Potenza frigorifera	18 kW
Potenza termica	~50 kW
Temperatura di alimentazione	100 °C
Temperatura acqua fredda estiva	7-12 °C
Temperatura smaltimento/riscaldamento	31-35 °C
COP freddo	~ 0,6
COP caldo	~ 1,6

mercato un tipo di scambiatore a piastre, interamente in acciaio inossidabile (AlfaLaval tipo Alfanova), che può ridurre notevolmente il lavoro di realizzazione. Prima di decidere se adottarli o meno si è proceduto con una campagna sperimentale preliminare, sostituendo con questi gli scambiatori di un precedente prototipo da 11 kW frigoriferi realizzato in ENEA, con risultati accettabili dal punto di vista funzionale ed eccellenti da quello degli ingombri.

Per quanto riguarda l'intero set di scambiatori presenti sul prototipo (condensatore, evaporatore, sottoraffreddatore, scambiatore delle soluzioni, assorbitore) si è quindi proceduto all'acquisto. I rimanenti componenti sono stati progettati su misura e fatti costruire all'esterno.

Per concludere nell'ambito di questa linea di attività è stata verificata la fattibilità tecnica per la realizzazione di una macchina ad assorbimento reversibile ad acqua-ammoniaca da adibire al solar cooling and heating nel settore medio residenziale e piccolo terziario. La grande opportunità offerta da questo tipo di macchine per l' ottenimento del raffrescamento con fonte rinnovabile solare e del riscaldamento misto gas-solare ad alta efficienza potrà risultare in uno sviluppo industriale a breve-medio termine.

D.2 Realizzazione di un pannello solare a tubi evacuati ad heat pipe

L'attività ha come obiettivo quello di progettare e sviluppare prototipi di componenti innovativi per diverse tipologie di impianti di solar cooling, nell'intento di portare un contributo significativo all'allargamento della diffusione di questo tipo di impianti ed al miglioramento delle efficienze dei singoli componenti. In particolare, il componente oggetto di questa linea di ricerca è il collettore solare che dovrà essere accoppiato ad una macchina ad assorbimento ad acqua/ammoniaca progettata per le basse temperature di attivazione (95-100°C).

o I collettori a tubi evacuati heat pipe

I collettori solari utilizzati nella maggioranza delle applicazioni, hanno rendimenti estremamente ridotti in climi sfavorevoli, con scarsa insolazione e bassa temperatura a causa delle eccessive perdite di calore. Poiché queste perdite sono dovute per lo più ad effetti convettivi, sono stati ideati dei pannelli nei quali l'intercapedine d'aria è

sostituita da una zona sottovuoto (o meglio a bassissima pressione). Questo permette di ridurre drasticamente le perdite anche in zone a temperatura molto bassa. Esistono fondamentalmente due tecnologie diverse per realizzare questi pannelli: nella prima lo scambio di calore è liquido-liquido come nei pannelli convenzionali, mentre la seconda prevede che il fluido che scorre nelle tubature del pannello evapori e ceda successivamente il calore per condensazione: quest'ultima è detta tecnologia heat-pipe.

La tecnologia heat-pipe risulta più efficiente, ma è tecnologicamente più complessa. Per far evaporare il fluido a temperature inferiori ai 100°C è necessario depressurizzate le tubature che contengono il fluido termovettore. Il tipo di fluido termovettore da utilizzare e la quantità con il quale riempire l'heat pipe è oggetto di ricerca in questa attività.

Un collettore solare del tipo a tubi evacuati si compone essenzialmente dei componenti di seguito descritti:

- TUBI EVACUATI: si tratta di tubi di vetro borosilicato sottovuoto. Viene creato un tubo in vetro a doppia parete dove all'interno dello stesso viene praticato il vuoto: il sigillo sottovuoto viene effettuato con una lega metallica speciale tramite
- ASSORBITORE: è realizzato con un rivestimento ad alta selettività al nitruro di alluminio Al-N/Al ed alette di alluminio;
- SCAMBIATORE A CONDENSAZIONE (HEAT PIPE): è un tubo in rame avente diametro esterno pari a 8 [mm]. All'interno del tubo viene praticato il vuoto prima che lo stesso venga riempito con una precisa quantità di fluido termovettore;
- COLLETTORE: è realizzato in rame ed il numero di attacchi è funzione della potenza termica per che il pannello dovrà essere in grado di garantire. L'heat pipe può essere a diretto contatto con il fluido che attraversa il collettore oppure può essere alloggiato in un tubo camicia solidale al collettore stesso.



Figura 228 Struttura pannello solare a tubi evacuati

Modalità di funzionamento del collettore

termocompressione;

I collettori solari del tipo heat pipe utilizzano la radiazione solare per produrre acqua calda a mezzo di speciali tubi in vetro sottovuoto che convertono la radiazione solare in calore e lo trattengono grazie al vuoto creato al loro interno.

L'energia raccolta dal tubo in vetro viene trasferita sulla lamiera termoconduttrice presente all'interno e successivamente all'heat-pipe. L'elemento in rame heat pipe inserito all'interno del tubo permette al liquido contenuto al suo interno di evaporare anche a basse temperature. Il tubo dei collettori heat-pipe è infatti riempito con un fluido che viene immesso all'interno dello stesso solo dopo aver praticato il vuoto: in questo modo il fluido evapora già a basse temperature. Il vapore che giunge al condensatore cede il calore prodotto al liquido che circola all'interno del collettore e condensando precipita nella parte inferiore per poi riprendere il processo di vaporizzazione. Lo scambio termico avviene "a secco", senza contatto diretto tra il fluido termovettore all'interno del tubo sottovuoto e l'acqua che circola all'interno del collettore.

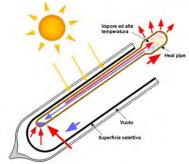


Figura 229. Schema di funzionamento collettore ad heat pipe

Fattori Caratterizzanti un heat pipe

I fattori caratterizzanti il comportamento termico di un heat pipe sono:

- la geometria dell'heat pipe (diametro interno e lunghezza);
- il grado di vuoto praticato all'interno dell'heat pipe prima che venga riempito;
- il tipo di fluido con il quale viene effettuato il riempimento (es. acqua, olio di silicone, alcool,..)
- la quantità di fluido di riempimento immesso all'interno dell'heat pipe (grado di riempimento);
- l'inclinazione di installazione dell'heat pipe.

L'obiettivo è creare un legame tra questi parametri e le prestazioni richieste, in modo da poterne personalizzare la realizzazione in funzione della destinazione d'uso (es. produzione ACS, solar cooling) e della zona geografica dove l'heat pipe verrà installato. In generale, i risultati ottenuti mediante la sperimentazione dovranno consentire lo sviluppo di una piccola utility dedicata alla selezione dell'heat pipe che meglio soddisfa l'applicazione per la quale verrà utilizzato.

Impianto Sperimentale Tosca

L'impianto sperimentale TOSCA (Thermalfluid-dynamics Of Solar Cooling Apparatus) è stato sviluppato e realizzato

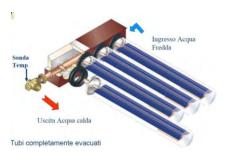


Figura 230. Logica di funzionamento del collettore solare a circolazione forzata

presso il laboratorio di Termofluidodinamica Applicata ai Sistemi Energetici del C.R. Casaccia dell'ENEA. Lo scopo principale dell'impianto TOSCA è lo studio dello scambio termico, ai fini di migliorare le prestazioni, di un heat pipe a tubo evacuato. L'heat pipe è riscaldato per effetto joule e raffreddato con un fluido (acqua) che scorre all'interno di un collettore in cui è inserita la parte condensante dell'heat pipe stesso. Lo scambio termico avviene, quindi, tra la superfice esterna dell'heat pipe ed il fluido che passa attraverso il collettore in convezione forzata senza cambiamento di fase (Figura 230).

Nelle figura 231 si riporta la visione d'insieme dell'impianto realizzato.

Per poter caratterizzare l'heat pipe, si è deciso di realizzare un banco di prova come di seguito descritto:

- 1. per mezzo di una resistenza elettrica, distribuita lungo tutto l'heat pipe, a meno della parte finale dove avverrà la condensazione, verrà ceduta una potenza nota e variabile all'heat pipe (Pel [W]);
- 2. il condensatore verrà immerso in una tubazione attraversata da acqua avente portata e temperatura in ingresso note (Q_{H2O} [L/s] T_{in} [°C]). In questo modo verrà asportato calore dal condensatore e sarà possibile, misurando la temperatura a valle dello scambio con l'heat pipe (T_{out} [°C]) e conoscendo portata e temperatura a monte dello stesso (Q_{H2O} [L/s], T_{in} [°C]), verificare la potenza termica asportata che dovrà essere prossima alla potenza elettrica fornita;
- 3. al condensatore ed all'evaporatore sono previste delle sonde a contatto di temperatura, in modo da poter rilevare l'andamento della temperatura nel tempo. E' prevista anche una sonda a contatto installata sulla coibentazione del collettore, in modo da poter valutare le perdite di calore attraverso la coibentazione stessa;
- 4. la resistenza termica dell'heat pipe verrà calcolata come segue:

$$RT = (T_{evaporatore} - T_{condensatore})/P_{el}$$
 [°C/W]

l'impianto è pronto per iniziare la campagna sperimentale. Alcune prove preliminari sono già state effettuate per verificarne il funzionamento. La potenza fornita all'heat pipe ha un suo peso nella funzionalità del sistema. Chiaramente una potenza maggiore fornita al sistema porta ad avere delle temperature sulla superficie dell'heat pipe maggiori. Tutti i risultati in



Figura 231. Visione d'insieme impianto

questo momento sono però congruenti ed compatibili con le più elementari nozioni di termofluidodinamica. Come già detto è ancora presto per trarre delle conclusioni definitive, ma bisognerà effettuare un'analisi molto più approfondita a valle della intera campagna sperimentale.

A valle di ciò è stato sostituito l'heat pipe per effettuare prove usando un secondo heat pipe con una quantità di fluido di riempimento molto differente dal precedente. In questa maniera si può valutare l'importanza di tale parametro nel funzionamento dell'intero sistema. Pur rendendosi necessarie ulteriori prove, si può già affermare che la quantità di fluido di riempimento influenza molto la funzionalità dell'heat pipe. Naturalmente si dovrà effettuare una campagna di prove specifica per trovare quale è la soluzione ideale.

D.3 <u>Realizzazione di uno scambiatore di calore in controcorrente con layer adsorbenti e raffreddamento evaporativo indiretto (desiccant compatto: ECOS)</u>

In quest'ambito è stato sviluppato il modello teorico di un innovativo scambiatore di calore aria-aria denominato ECOS, con funzione di deumidificazione per adsorbimento e contemporaneo raffreddamento evaporativo indiretto dell'aria di mandata, destinato ad applicazioni commerciali/industriali di climatizzazione ambientale (gestione dell'aria primaria). Il modello è stato implementato in ambiente Matlab/Simulink, ed è stata eseguita una campagna di simulazioni del funzionamento del componente per analizzarne le prestazioni e ottimizzarne design, modalità di funzionamento e scelta dei materiali.

I risultati dimostrano le potenzialità applicative dello scambiatore, ma lo studio ha evidenziato problematiche legate agli aspetti costruttivi e di ingombro. Tali risultati suggeriscono quindi di investigare soluzioni tecniche

alternative, che risolvano le problematiche intrinsecamente legate alla specifica tipologia di scambiatore analizzata, ma che permettano di sfruttare lo stesso principio fisico, di cui è stata verificata l'efficacia.

La deumidificazione dell'aria nella climatizzazione

Alcune funzioni della climatizzazione, come il ricambio fisiologico d'aria, la gestione del carico latente (umidità) e la pulizia dell'ambiente da odori e pulviscolo in sospensione, sono delegate alla cosiddetta "aria primaria", il cui ricambio, in particolare in climi caldi e umidi, comporta significativi consumi elettrici, la cui quota principale è relativa alla deumidificazione. Nei sistemi convenzionali tale funzione si realizza tipicamente tramite un processo di condensazione, schematicamente mostrato nel diagramma psicometrico riportato in Figura 232.

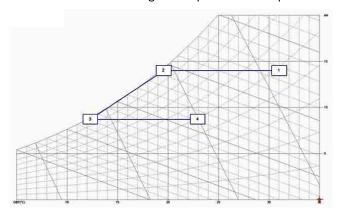


Figura 232. Rappresentazione schematica del processo di deumidificazione per condensazione: DBT (°C) - temperatura dell'aria; AH (g/kg) - umidità specifica dell'aria

L'aria esterna, calda e umida, viene raffreddata fino al punto di rugiada (1-2), e conseguentemente sottoraffreddata (2-3) perché ceda una parte del proprio contenuto di vapore sotto forma di condensa. Al termine di tale processo l'aria necessita di un post-riscaldamento per essere riportata a valori di benessere di temperature e umidità relativa, prima di essere inviata all'ambiente (3-4).

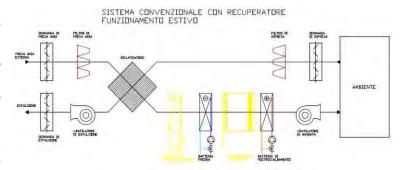
Tale processo non è energeticamente efficiente, poiché il passaggio dalla condizione 1 alla 4 richiede un raffreddamento e un successivo post riscaldamento. Inoltre il sottoraffreddamento dell'aria necessita idi acqua refrigerata a bassa temperatura (tipicamente 7 °C): ciò comporta una riduzione delle prestazione del relativo ciclo frigorifero, e un aumento dei consumi elettrici.

Impianto convenzionale di trattamento aria primaria

Nella Figura 233 è mostrato un tipico schema di un'unità di trattamento aria (UTA) convenzionale, dotata di recuperatore statico di calore, nelle modalità di funzionamento estivo e invernale. I componenti che nel funzionamento relativo alla specifica stagione rimangono inattivi sono indicati in giallo.

Nel periodo estivo lo scopo del sistema è la riduzione della temperatura e della umidità dell'aria esterna che viene inviata all'ambiente. Questo compito è svolto dalla batteria fredda (raffreddamento e condensazione) e dalla successiva batteria calda (post-riscaldamento, che raramente si realizza tramite un secondo recuperatore);

Nel funzionamento invernale occorre scaldare e umidificare l'aria esterna, tramite un preriscaldamento (nel recupe-



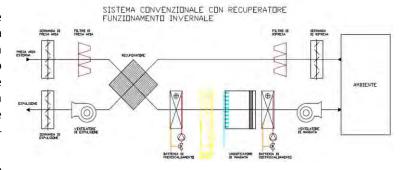


Figura 233. Schema di UTA convenzionale

ratore e nella batteria di preriscaldamento), un'umidificazione adiabatica fino a saturazione (che comporta un

livello di umidità specifica controllabile con la temperatura di preriscaldamento) e un post-riscaldamento fino alla temperatura richiesta.

Il sistema ECOS

Il presente lavoro mira allo sviluppo di un sistema di deumidificazione innovativo rispetto a quelli tradizionali: per quanto basato sull'utilizzo di materiali adsorbenti come nei sistemi DEC a ruota, e quindi alimentabile energeticamente con calore a bassa temperatura, il sistema in esame ha la peculiarità di abbinare il processo di deumidificazione dell'aria esterna (esotermico) al processo di raffreddamento evaporativo dell'aria di ripresa (endotermico), con un potenziale miglioramento dell'efficienza di entrambi i processi, grazie all'utilizzo di un particolare scambiatore di calore aria-aria denominato ECOS - indirect Evaporative COoling counter-flow heat exchanger with Sorption.

L'analisi e ottimizzazione di uno scambiatore ECOS per applicazioni destinate a utenti industriali/commerciali, con portate nominali di aria ≥ 5000 m³/h, costituisce l'oggetto della presente ricerca. Lo scambiatore ECOS è sostanzialmente simile a un recuperatore statico di calore a piastre in controcorrente, i cui canali di mandata (dove fluisce l'aria esterna da deumidificare) siano rivestiti con materiale adsorbente, e i canali di ripresa (dove fluisce l'aria di ripresa) siano rivestiti di materiale idrofilo che viene mantenuto bagnato. Il calore rilasciato dal processo di adsorbimento del vapore nei canali di mandata viene ceduto attraverso le piastre metalliche dello

scambiatore al materiale idrofilo e all'aria di ripresa, ottenendo un doppio risultato: il contenimento della temperatura del materiale adsorbente durante la deumidificazione, e il potenziamento del processo di evaporazione dell'acqua contenuta nel materiale idrofilo. In Figura 234 si riporta lo schema dello scambiatore e i suoi canali.

Come in tutti i sistemi basati su materiali adsorbenti, alla fase di deumidificazione deve essere alternata la fase di rigenerazione, in cui il vapore viene asportato dal materiale adsorbente, riportandolo alle condizioni iniziali. Nelle UTA DEC convenzionali tale alternanza è garantita dal movimento della ruota, tramite cui il materiale essiccante è posto in contatto alternativamente con l'aria esterna e l'aria di ripresa. Nel sistema in esame, che per le sue caratteristiche deve essere

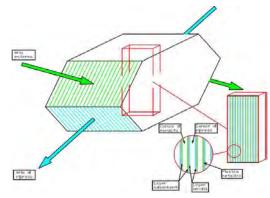
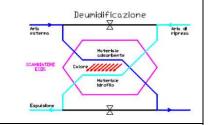
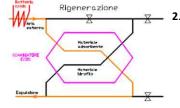


Figura 234. Schema dello scambiatore ECOS

necessariamente basato su uno scambiatore statico, l'alternanza delle fasi è gestita tramite il controllo dei flussi di aria, come chiarito nella seguente descrizione schematica delle fasi del ciclo di funzionamento dello scambiatore:

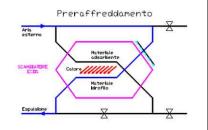
1. Fase di deumidificazione per adsorbimento raffreddato: l'aria esterna fluisce nei canali di mandata e viene deumidificata per contatto con il materiale adsorbente, l'aria di ripresa fluisce nei canali di ritorno e viene umidificata per contatto con il materiale idrofilo bagnato; si ha cessione di calore sensibile tra canali di mandata e ripresa.





Rigenerazione: l'aria esterna viene scaldata con una batteria alimentata da acqua calda e fluisce nei canali di mandata. La bassissima umidità relativa dell'aria calda permette il desorbimento del vapore dal materiale adsorbente. L'aria esterna assorbe vapore e cede calore diventando umida e tiepida, e viene espulsa.

3. **Preraffreddamento**: le condizioni iniziali del materiale idrofilo sono ripristinate tramite un flusso di acqua nebulizzata miscelata con aria prelevata dall'esterno, che ne agevola la distribuzione lungo i canali di ripresa e sottrae calore ai canali di mandata precedentemente scaldati nella fase di rigenerazione



Considerazioni sull'applicabilità del componente

Senza riportare i risultati delle simulazioni eseguite, si elencano di seguito alcuni risultati/considerazioni che da tali simulazioni derivano e che hanno contribuito al processo di ottimizzazione dello scambiatore:

- 1. la necessità di avere due scambiatori che operano alternativamente e che sono entrambi dimensionati per la portata nominale, comporta necessariamente un incremento degli ingombri che annulla i vantaggi di compattezza dovuti alla contemporanea molteplicità di funzioni che lo scambiatore ECOS riesce a svolgere. Si ha quindi la necessità di limitare l'area frontale dello scambiatore, a parità di portata volumetrica, incrementando la velocità media dell'aria nei canali dello scambiatore. D'altro canto, a parità di altre condizioni, tale incremento richiede un proporzionale incremento della lunghezza del canale (per garantire analoghe prestazioni) e di conseguenza un incremento quadratico delle perdite di carico e dei relativi consumi elettrici dei ventilatori. Nel caso in esame si è quindi giunti a definire una velocità nominale dell'aria nello scambiatore v = 2,5 [m/s], come compromesso tra problemi di ingombro e consumi elettrici;
- compatibilmente con le problematiche costruttive, e garantendo comunque la necessaria resistenza meccanica alla differenza di pressione tra i canali, lo spessore della lamiera che separa i canali deve essere minimizzato: non solo per migliorare lo scambio termico come in uno scambiatore convenzionale, ma specificamente per ridurre la massa dello scambiatore, che durante il funzionamento viene scaldata e raffreddata ciclicamente. Questo aspetto è chiarito nel punto successivo.
- 3. in termini di consumi energetici, il sistema ECOS permette la riduzione della temperatura di rigenerazione, ma è affetto da limiti intrinseci rispetto ai sistemi DEC a ruota:
 - la presenza di acqua nei layer idrofili dei canali di ripresa al termine della fase di deumidificazione potrebbe comportare una limitata ma costante evaporazione della stessa durante la fase di rigenerazione, in particolar modo se tale fenomeno fosse autoalimentato dall'eventuale convezione naturale da esso stesso creata: ne deriverebbe una non trascurabile cessione di calore ai canali di ripresa, un calore sostanzialmente "rubato" al processo di rigenerazione senza alcun effetto utile;
 - ad ogni ciclo il calore accumulato dallo scambiatore durante la fase di rigenerazione deve essere smaltito tramite la fase di preraffreddamento. Si tratta sostanzialmente di uno spreco di energia, accentuato dal fatto che non è possibile scaldare i canali di mandata senza che ci sia cessione di calore alla struttura metallica dello scambiatore e ai canali di ripresa. Tale consumo energetico potrebbe essere limitato con un recupero, ovvero preriscaldando uno scambiatore all'inizio della fase di rigenerazione con il calore ceduto dal secondo scambiatore durante la fase di preraffreddamento. In un sistema aria-aria come quello in oggetto risulta però molto complesso (in termini costruttivi) realizzare il sistema di recupero citato. Una soluzione alternativa consiste nell'aumentare la durata del ciclo di funzionamento, riducendo quindi la frequenza delle fasi di riscaldamento e raffreddamento degli scambiatori. Un limite superiore alla durata del ciclo è definito dal tempo necessario a saturare il layer adsorbente, e un prolungamento delle fasi richiede quindi un incremento della massa di materiale adsorbente e idrofilo, e conseguentemente anche della massa sottoposta al ciclo termico. La massa metallica dello scambiatore non aumenterebbe (quindi si otterrebbe comunque un vantaggio), ma aumenterebbe la resistenza termica tra i canali, dovuta principalmente allo spessore dei layer: è quindi necessario ottimizzare il dimensionamento e le tempistiche di fase nell'ottica dei consumi energetici complessivi;
 - nei sistemi a ruota il calore di adsorbimento e quello accumulato dal materiale durante la rigenerazione vengono ceduti all'aria di mandata e recuperati dallo scambiatore rotativo (proporzionalmente all'efficienza dello stesso), nel sistema ECOS, come spiegato al punto precedente, si perde la quota calore accumulato, ma è importante evidenziare come ci sia una sorta di recupero indiretto del calore di adsorbimento: a parità di condizioni dell'aria esterna, riducendo la temperatura di rigenerazione si riduce conseguentemente la quantità di calore fornito all'aria per raggiungere tale temperatura;
- 4. l'ultima, ma forse più importante analisi, riguarda la gestione dei flussi di aria, che venendo alternativamente inviati a scambiatori diversi e attraverso diversi percorsi determinano le fasi del ciclo di funzionamento. La costruzione di un sistema di canalizzazioni aerauliche che permetta una tale gestione non è assolutamente una questione di banale soluzione, piuttosto è l'ostacolo tecnologico (ed economico) che maggiormente limita l'applicabilità di un sistema con scambiatori ECOS. Il concetto è chiarito nella Figura 235, in cui sono riportati gli schemi aeraulici della coppia di scambiatori durante le 4 fasi che costituiscono un ciclo completo di lavoro del sistema, e dove sono indicate 12 valvole a rappresentare le serrande attuate installate sui canali dell'aria.

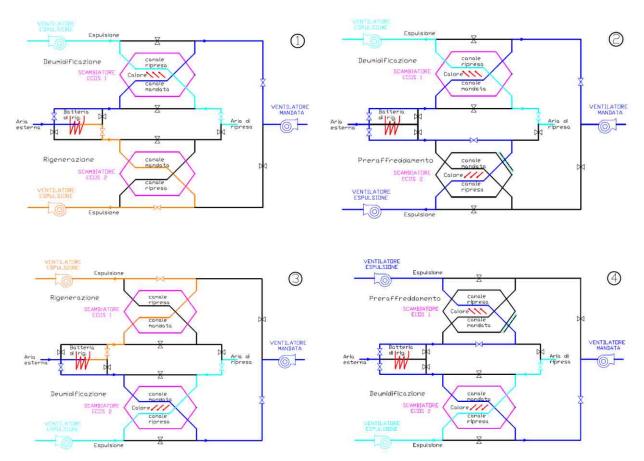


Figura 235. Schema aeraulico del sistema ECOS - Fasi del ciclo di funzionamento

Si noti che la presenza di due ventilatori di espulsione non è vincolante, ma può essere utile per gestire correttamente le 3 portate presenti contemporaneamente nel sistema: flusso deumidificato (mandata), flusso umidificato (ripresa), flusso di rigenerazione o preraffreddamento.

Il lavoro svolto ha confermato la validità del concetto teorico di partenza, e cioè l'effetto positivo che l'accoppiamento dei processi evaporativo e di adsorbimento produce sulla deumidificazione e il raffreddamento dell'aria esterna. Uno scambiatore aria-aria come quello analizzato rappresenta la tipologia ideale per massimizzare gli effetti di tale accoppiamento, ma presenta specifiche problematiche tecnologiche a fronte delle quali si ritiene necessario investigare strade alternative, ovvero di perseguire il medesimo obiettivo - il contenimento della temperatura nella fase di deumidificazione - attraverso soluzioni tecnologiche differenti.

I limiti maggiori della presente soluzione sono relativi alla complessità del sistema di canalizzazione dell'aria, alla sostanziale impossibilità di effettuare un recupero termico che contenga i consumi energetici dovuti alle fasi di riscaldamento/raffreddamento degli scambiatori, all'ingombro dei componenti e alla potenziale difficoltà pratica di bagnare in maniera uniforme e sufficiente i layer idrofili all'interno degli stretti canali di ripresa.

Alla luce di tali potenziali ostacoli di carattere tecnico non si è ritenuto utile approfondire ulteriormente la ricerca, andando cioè a valutare e sviluppare le tecnologie ottimali per la realizzazione del rivestimento di gel di silica (e dello scambiatore nel suo complesso), ultimo passo verso la costruzione di un prototipo e delle successive e necessarie prove sperimentali. Si ritiene piuttosto opportuno focalizzare lo studio su soluzioni che prevedano l'utilizzo di scambiatori aria/acqua, ad esempio a tubi alettati, in cui le funzioni di raffreddamento e rigenerazione siano delegate a un flusso di acqua:

- raffreddata indirettamente grazie a un processo evaporativo in un ulteriore scambiatore, bagnato dall'esterno e investito dal flusso di aria di ripresa;
- riscaldata da una qualsiasi fonte disponibile (calore di processo, collettori solari).

Una tale soluzione, tecnologicamente analoga al sistema utilizzato nei chiller ad adsorbimento, permetterebbe di ovviare ai principali problemi specifici del sistema aria-aria: la necessaria variazione di flussi tra le diverse fasi

operative sarebbe estremamente semplificata, in quanto relativa a canali idraulici invece che aeraulici, e sarebbe agevole realizzare il recupero di calore tra le fasi di rigenerazione e preraffreddamento.

Un potenziale limite di questa soluzione risiede nella resistenza termica del rivestimento di materiale adsorbente, che deve essere raffreddato o riscaldato per conduzione termica tramite le alette dello scambiatore, motivo per cui lo studio della tecnologia di coating assume in questo caso un'importanza ancora più critica. D'altro canto, tale soluzione permetterebbe una maggiore flessibilità nello sviluppo di modalità operative innovative, ad esempio realizzando un recupero del calore di adsorbimento ceduto al flusso di acqua e ottenendo quindi un sistema ECOS a doppio stadio che riduca sensibilmente e ulteriormente i consumi energetici.

Si ritiene quindi che tali sistemi di deumidificazione abbiano notevoli potenzialità di risparmio energetico ancora non adeguatamente sfruttate, e che sia assolutamente opportuno, se non addirittura necessario, proseguire nella ricerca della migliore soluzione tecnologica che ne permetta l'ottimizzazione, la realizzazione e la diffusione.

D.4 Logiche di controllo avanzate per sistemi desiccant

In precedenza presso il Dipartimento DREAM dell'Università di Palermo sono state portate avanti ricerche su sistemi solar cooling impiegati per la climatizzazione degli edifici.

La logica di regolazione e controllo dell'impianto precedentemente sviluppata (Figura 236), prevedeva sei modi di funzionamento per le diverse condizioni di carico sulla base dei quali venivano attivati o disattivati gli elementi che compongono il sistema. Le variabili sulla base delle quali viene effettuata la commutazione da una modalità di funzionamento ad un'altra, sono la temperatura e l'umidità relativa dell'aria di ritorno dall'edificio.

La nuova logica di controllo (Figura 237) differisce da quella precedentemente sviluppata per i seguenti aspetti:

- il ventilatore di rigenerazione può essere regolato indipendentemente da quello dell'aria di processo e spento in Mode = 1;
- la pompa di ricircolo impiegata negli scambiatori evaporativi viene attivata nelle modalità di funzionamento 2 e 3 e mantenuta spenta in tutte le altre.

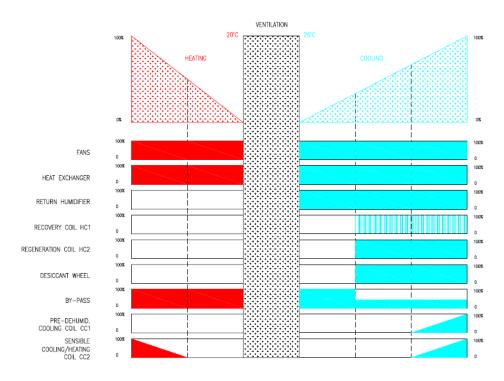


Figura 236. Modi di funzionamento per la configurazione DEC originaria

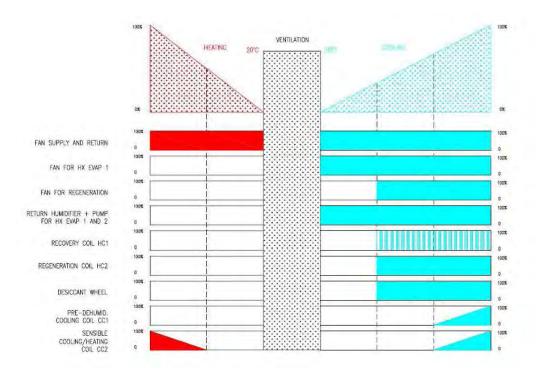


Figura 237. Modi di funzionamento per la nuova configurazione DEC con gli scambiatori evaporativi

In funzionamento estivo, il sistema parte in modalità ventilazione MODE=0 (ventilazione), nella quale non è realizzato alcun trattamento attivo o passivo dell'aria; se le condizioni di temperatura e umidità desiderate non sono raggiunte il sistema commuta in MODE=1 (raffreddamento evaporativo indiretto). Se le prestazioni del sistema in termini di temperatura e umidità raggiunte non sono ancora sufficienti, allora il sistema commuta nella modalità successiva MODE=2 (desiccant cooling) nel quale viene realizzato il ciclo di trattamento dell'aria desiccant cooling. Se, a causa dell'aumento del carico interno o dell'aggravarsi delle condizioni dell'aria esterna, il sistema non è più in grado di garantire le condizioni di progetto all'interno del locale, allora esso commuta in MODE=3 (raffreddamento con batterie ausiliarie) dove, al ciclo di trattamento desiccant cooling si aggiungono le due batterie di raffreddamento ausiliarie.

In funzionamento invernale, il sistema dal MODE=O commuta verso MODE=-1 attuando un recupero termico dal flusso d'aria di estrazione; se le condizioni lo richiedono, ovvero se la potenza termica richiesta all'UTA è maggiore, il sistema commuta in MODE=-2 in cui viene attivata la batteria di riscaldamento. La regolazione della potenza frigorifera di ognuna delle batterie è poi attuata per mezzo di un regolatore PID agendo sulla portata di acqua refrigerata all'interno di esse al fine di mantenere la temperatura o l'umidità assoluta più vicino possibile al valore di set-point.

E' da sottolineare che l'UTA è provvista di un sistema di serrande che permette il passaggio dell'aria di ritorno dall'edificio in entrambi gli scambiatori evaporativi (in serie). Questa modalità di funzionamento permette l'esclusione del ventilatore di estrazione dello scambiatore HX evap 1.

E. Partecipazione ai gruppi di lavoro IEA - Solar Heating and Cooling

E' stata assicurata la partecipazione italiana ai lavori degli Implementing Agreement (IA) della Agenzia Internazionale per l'Energia "Solar Heating and Cooling" e "Solar PACES, Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems".

In particolare per l'IA "Solar Heating and Cooling" è stato garantito il contributo italiano alle attività dei gruppi di lavoro "Solar Air-Conditioning of Buildings" (Task 38) e "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration" (Task 42).

E.1 <u>Implementing Agreement Solar Heating and Cooling</u>

L'accordo di collaborazione prevede la realizzazione di progetti comuni di ricerca e sviluppo nel campo delle tecnologie solari avanzate, per applicazioni in edifici o altre destinazioni d'uso. All'accordo partecipano 19 nazioni, compresa l'Italia, distribuite nei diversi gruppi e progetti di ricerca pluriennali (Task).

Le attività di ENEA all'interno dell'Implementing Agreement hanno riguardato:

- Monitoraggio e coordinamento delle Task in fase di definizione;
- Partecipazione con contributi scientifici alla conferenza Eurosun 2010, di cui IEA-Solar Heating and Cooling è co-organizzatore;
- Partecipazione ai meeting ufficiali del Comitato Esecutivo, con cadenza semestrale;
- Diffusione dell'informazione presso i principali referenti tecnico-scientifici a scala nazionale.

Durante il periodo 2009-2010 sono state definite le seguenti Task:

- Task 42: Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration. Il task è iniziato nel 2009 ed avrà durata triennale.
- Task 43: Solar Rating and Certification Procedures Advanced Solar Thermal Testing and Characterization for Certification of Collectors and Systems: Material Development and System Integration. Progetto partito nel luglio 2009 e con una durata prevista di tre anni.
- Task 44: Solar and heat pump systems. Systems using solar thermal energy in combination with heat pumps. Il progetto è partito ad inizio 2010 per terminare nel 2013.

E.2 <u>Partecipazione al gruppo di lavoro internazionale del Task 38 "Solar Air Conditioning and Refrigeration", IEA</u> Solar Heating and Cooling

L'obiettivo principale del Task 8 è la implementazione di misure per l'introduzione accelerata nel mercato di sistemi di raffreddamento e condizionamento dell'aria elioassistiti, puntando sul miglioramento dei componenti e dei "concept" di sistema. L'introduzione nel mercato va supportata attraverso le seguenti attività:

- attività di sviluppo e test di sistemi di condizionamento dell'aria per i settori residenziale e terziario;
- sviluppo di sistemi chiavi in mano per impianti di piccola e media taglia e sviluppo di schemi ottimizzati e standardizzati per sistemi su misura;
- relazioni sulle esperienze con nuovi impianti pilota e dimostrativi e sulla procedura di collaudo e di valutazione delle prestazioni;
- redazione di documenti a supporto della progettazione, installazione e collaudo di impianti solari di condizionamento dell'aria;
- analisi di concetti innovativi e tecnologie prestando particolare attenzione ai principi termodinamici e alla ricerca bibliografica;
- confronto tra i risultati degli strumenti di simulazione disponibili e loro applicabilità nella pianificazione e nell'analisi di sistemi;
- attività di market transfer, le quali includono lettere informative, work-shop, materiali di esercitazione, e la seconda edizione del manuale Handbook for Solar Cooling for Planners.

Per raggiungere questi obiettivi, il Task 38 svolge la sua ricerca e sviluppo secondo i seguenti Subtask:

- Subtask A: Sistemi compatti per applicazioni residenziali e piccolo terziario;
- Subtask B: Sistemi progettati su misura per applicazioni di grandi dimensioni non-residenziali e industriali;
- Subtask C: Analisi fondamentali e di modellazione;
- Subtask D: Attività di sensibilizzazione degli operatori del mercato (produttori, progettisti, installatori).

Per i dettagli selle attività svolte all'interno delle diverse subtask si rimanda nel rapporto completo disponibile sul sito ENEA.

E.3 <u>Partecipazione al gruppo di lavoro internazionale del Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration", IEA Solar Heating and Cooling</u>

Il Task 42-Annex 24 denominato "Energy Conservation through Energy Storage (ECES)" nasce dall'esigenza di sfruttare il fenomeno di accumulo termico per migliorare l'efficienza dei sistemi di trasformazione energetica e massimizzare lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili.

All'interno della Task 42 le attività svolte dal Dipartimento DREAM dell'Università Di Palermo mirano a definire un metodo per la valutazione del rendimento energetico di un pannello fotovoltaico che tenga adeguatamente conto delle variazioni indotte nel suo comportamento dalle molteplici condizioni operative, di tipo microclimatico ed elettrico.

E.4 <u>Partecipazione all'Implementing Agreement SolarPACES, "Concentrating Solar Power and Chemical Energy</u> Systems"

SolarPACES è l'Implementing Agreement dell'IEA che si occupa specificamente di tecnologia solare termodinamica e di produzione di idrogeno solare per via termica.

Lo scopo principale di SolarPACES è facilitare, coordinare e supportare la ricerca, lo sviluppo e la dimostrazione nel campo delle tecnologie solari a concentrazione, attraverso la collaborazione internazionale e lo scambio di informazioni, con l'obiettivo di sviluppare e commercializzare tecnologie solari sostenibili, affidabili, efficienti e competitive sul piano dei costi. La cooperazione con l'industria del settore è un elemento chiave nelle attività di SolarPaces; più di un quarto dei paesi aderenti hanno designato un soggetto industriale o una utility come Parte Contraente. Le attività di SolarPACES sono attualmente strutturate in 5 Task:

- Task I Impianti solari termodinamici per produzione elettrica
- Task II Ricerca nel campo della Chimica Solare
- Task III Ricerca nel campo delle Tecnologie solari a concentrazione
- Task VI Applicazioni industriali alla dissalazione e trattamento dell'acqua
- Task V Conoscenza delle Risorse solari.

Oltre alla partecipazione ai vari incontri dei Comitati Esecutivi, ENEA partecipa alle attività della Task I svolgendo attività focalizzate sulla realizzazione di un database gestito dall'NREL sugli impianti realizzati nel mondo e in progettazione, consultabile online (http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/).

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Per lo sviluppo delle attività di ricerca legate ai "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabile", l'ENEA ha ritenuto opportuno coinvolgere diversi soggetti esterni che hanno dato al lavoro svolto un importante contributo tecnico e scientifico. In seguito sono riportate le attività svolte dai diversi partner ed una breve descrizione dei lavori eseguiti.

A. Studi di fattibilità

ISES ITALIA che rappresenta, nel nostro paese, una delle principale associazione tecnico-scientifica non profit legalmente riconosciuta per la promozione dell'utilizzo delle Fonti Energetiche Rinnovabili (solare termico, solare fotovoltaico, energia eolica, energia da biomasse, bioclimatica, energia geotermica, energia idrica, energia dal mare) ha partecipato alle attività dell'obiettivo con lo "Studio sulla applicabilità di sistemi e componenti assistiti da fonti rinnovabili" (attività descritta al punto A.2).

L'Università degli Studi Roma TRE - Dipartimento di Scienze Geologiche che vanta una grande esperienza in studi condotti in ambiente G.I.S. mirati alla ricostruzione 3D del sottosuolo, ha portato avanti la "Strutturazione di una banca dati in ambiente G.I.S. per lo sviluppo di impianti innovativi finalizzati alla gestione delle georisorse" (attività descritta al punto A.2).

B. Ricognizione delle prestazioni di sistemi esistenti ed individuazione dei fattori di criticità

Il Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM) dell'Università degli Studi di Palermo che è stato costituito nel 1986 al fine di "organizzare e promuovere ricerche finalizzate alla produzione ed alla gestione delle fonti di energia e delle risorse energetiche ed ambientali, alla implicazione di esse nel rapporto uomo-ambiente ed alla conoscenza di fondamentali proprietà fisiche delle materie utili per le applicazioni nel campo energetico, astrofisico e spaziale" si è occupato della "Realizzazione di un nuovo set up sperimentale per il test e lo sviluppo di Nell'ambito dello stesso obiettivo ha inoltre condotto azioni finalizzate al "Miglioramento delle prestazioni energetiche impianto desiccant cooling del DREAM" (attività descritta al punto B.3).

D. Sviluppo di componenti innovativi

Il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, che ha come obiettivo quello di contribuire al progresso delle conoscenze tecnico-scientifiche nel settore dell'energia attraverso attività di formazione, ricerca di base e applicata, si è occupato della "Realizzazione di uno scambiatore di calore in controcorrente con layer adsorbenti e raffreddamento evaporativo indiretto (desiccant compatto: ECOS) (attività descritta al punto D.3).

Il Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM) dell'Università degli Studi di Palermo ha portato avanti attività relative a "Logiche di controllo avanzate per sistemi desiccant" (attività descritta al punto D.4).

E. Partecipazione ai gruppi di lavoro IEA – Solar Heating and Cooling

Alle attività dell'obiettivo hanno collaborato il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano (attività descritta al punto E.1) ed il Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM) dell'Università degli Studi di Palermo (attività descritta al punto E.2).

Elettrotecnologie innovative per i settori produttivi

Gli usi finali dell'energia nel settore industriale presentano, a livello nazionale e con particolare riferimento all'uso elettrico, una bipartizione: se da un lato l'efficienza energetica dei processi produttivi può considerarsi in genere buona, specie nei processi "energia intensive", esistono dall'altro margini rilevanti di miglioramento dell'efficienza energetica nella gestione integrata delle reti energetiche locali, a livello di stabilimento, di area industriale o di distretto.

Queste reti presentano varie problematiche, molte delle quali hanno aspetti riconducibili all'efficienza energetica, tra cui la gestione delle unità locali di generazione (spesso di cogenerazione o trigenerazione) nell'ambito più grande della gestione dei carichi, la copertura dei picchi di potenza, l'efficienza delle reti e degli apparecchi elettrici non di processo.

Parallelamente, esistono diffuse applicazioni di mercato di tecnologie elettriche che presentano un potenziale di miglioramento dell'efficienza, sia a livello di singoli sistemi e componenti efficienti, sia per quanto riguarda gli effetti dell'integrazione dei componenti/sistemi efficienti in una logica di gestione sistemica, da esprimere e da verificare con adatti dimostrativi, in particolare per quanto riguarda le applicazioni di tipo trasversale, ossia non specifiche per un comparto industriale.

Inoltre l'utilizzo di elettrotecnologie innovative in sostituzione, anche solo parziale, di alcuni carichi termici, può giovare all'ottimizzazione della gestione integrata della rete elettrica locale.

Anche i sistemi di accumulo elettrico, in particolare supercondensatori e batterie al litio, possono utilmente essere utilizzati nelle reti elettriche, sia lato utenza finale per il "peak shaving" in presenza di assorbimenti impulsivi di potenza intervallati da periodi a basso prelievo o per il "power quality", sia come accumulo dedicato ad impianti di generazione da rinnovabili. Solo attraverso indagini sperimentali in laboratorio, si possono selezionare i materiali, i processi produttivi, i componenti e le configurazioni più interessanti.

Il prodotto del programma di questa attività è rappresentato dalla realizzazione e dal successivo monitoraggio di applicazioni dimostrative su scala reale di tecnologie elettriche innovative ad elevata efficienza, che hanno raggiunto un grado di sviluppo completo o prototipale. I risultati ottenuti potranno servire anche come supporto all'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica per l'identificazione di nuove schede di intervento per la riduzione dei consumi finali di energia elettrica e gas naturale.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il programma del presente tema di ricerca prevede una fase iniziale di attività preparatorie finalizzate all'identificazione dei settori produttivi più orientati all'applicazione delle tecnologie efficienti dell'elettricità in sostituzione delle tradizionali tecnologie termiche, ed il coinvolgimento, nelle fasi successive, di partner industriali che metteranno a disposizione le loro imprese, presso i cui stabilimenti produttivi verranno realizzate le applicazioni dimostrative.

Il programma prevede una fase iniziale di attività preparatorie finalizzate all'identificazione dei settori produttivi più orientati all'applicazione delle tecnologie efficienti dell'elettricità in sostituzione delle tradizionali tecnologie termiche, ed il coinvolgimento, nelle fasi successive, di partner industriali che metteranno a disposizione le loro imprese, presso i cui stabilimenti produttivi verranno realizzate le applicazioni dimostrative.

Il programma di attività si articola nei seguenti punti:

- la ricognizione delle possibili applicazioni delle tecnologie elettriche nelle utenze industriali, con l'acquisizione di quanto già esiste nel mercato e l'individuazione dei settori di maggiore penetrazione delle elettrotecnologie;
- l'analisi delle potenzialità delle tecnologie elettriche efficienti negli usi finali e delle barriere all'ottenimento, in alcuni settori di utenza, realizzando modelli di simulazione;
- la realizzazione di 3-4 applicazioni dimostrative: a valle delle scelta delle tecnologie e dei settori di intervento, grazie al coinvolgimento delle associazioni di categoria, si intende contribuire insieme ai partner industriali al conseguimento di interventi pilota come dimostrativo della tecnologia;

• la definizione di linee guida e temi di ricerca; ci si propone di individuare i temi di ricerca e di sviluppo di maggiore rilevanza, richiesta dal settore industriale in questo settore, sui quali avviare programmi futuri.

Il Piano Annuale di Realizzazione 2007, ad integrazione di quanto già realizzato nel precedente PAR, prevede l'esecuzione di attività riconducibili ai primi tre punti, e si articola negli obiettivi descritti nel seguito.

A. Portale dell'efficienza energetica e delle elettrotecnologie innovative negli usi finali

L'obiettivo prevede la realizzazione preliminare di un portale dell'efficienza energetica che possa valorizzare quanto prodotto nel PAR 2006 e già disponibile su sito web dedicato; il portale diventa una risorsa dove tutte le tematiche sulla efficienza energetica possono essere trattate in modo sistemico e correlato, con lo scopo di coagulare gli sforzi di ricerca intorno ad una struttura capace di aggregare i contenuti per arrivare ad essere un riferimento per il sistema nazionale.

L'attività di ricognizione delle tecnologie elettriche utilizzate nelle utenze industriali svolta nella precedente annualitò ha fornito numerosi studi sulle principali tecnologie per l'ottimizzazione dei flussi energetici (elettrici e termici) nei processi produttivi, la riduzione dei consumi e l'aumento della efficienza energetica. Alcuni temi emersi dalla ricognizione giustificano attività di ricerca supplementari finalizzate ad approfondire aspetti giudicati di interesse nella fase di ricognizione.

Tra essi, è stato identificato l'uso razionale dell'energia nella produzione e gestione dell'aria compressa per alcuni settori industriali, che più di altri destinano una quota dei propri consumi elettrici a questo servizio. Lo studio viene condotto avvalendosi di dati storici sui consumi e di prove sul campo in aziende campione, analizzando la fattibilità tecnico-economica-ambientale degli interventi proposti (particolare attenzione viene dedicata all'applicazione degli azionamenti a velocità variabile sui compressori rotativi con potenze superiori ai 30 kW) e considerando anche la potenzialità energetica-economica del recupero termico del calore, sottoprodotto della generazione di aria compressa.

Inoltre ci si propone di investigare la possibilità e le problematiche dell'impiego di sistemi energetici innovativi, quali Stirling, micro-cicli Rankine a vapor d'acqua o a fluido organico (ORC), micromotori a combustione interna o microturbine a gas con IBC, microcogeneratori termofotovoltaici (TPV) nella produzione combinata di energia elettrica e calore, per taglie di potenza elettrica fino a 5 kW. Si valutano le potenzialità di tali sistemi nelle applicazioni di cogenerazione e/o trigenerazione per utenze con fabbisogni termici a medio/bassa temperatura e con richieste frigorifere tipiche del condizionamento. Vengono inoltre indagate le problematiche dell'interconnessione del sistema energetico in studio sia con la rete interna dell'utenza, sia con la rete nazionale o con sistemi di accumulo elettrochimico per l'installazione ad isola.

Infine, vengono avviate esperienze sul miglioramento della rete elettrica per aumentarne la flessibilità e la capacità di accogliere i contributi sia di tipo attivo, sia di tipo passivo degli utenti; occorre affrontare prima i problemi di media tensione e successivamente quelli della bassa tensione, non solo dal punto di vista della generazione distribuita, ma anche per gli aspetti di progettazione e gestione delle apparecchiature dell'utenza.

In particolare, con il coinvolgimento della Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE), si porta avanti uno studio sulla garanzia della fornitura e qualità del servizio elettrico nei centri di calcolo. I centri di calcolo sono caratterizzati dal funzionamento continuo (24 ore su 24, 7 giorni su 7); necessitano quindi di particolari sistemi per garantire la costanza della fornitura elettrica sia alle apparecchiature informatiche che agli impianti di condizionamento delle macchine stesse. Questa garanzia si effettua attraverso le unità di continuità o UPS (Uninterruptible Power Supply) e generatori di emergenza. Tradizionalmente è stata dedicata poca attenzione all'ottimizzazione energetica dell'intero sistema che può essere migliorata attraverso l'utilizzo di sistemi di cogenerazione ed attraverso la separazione del condizionamento degli edifici dal condizionamento dei componenti elettronici, che può avvenire attraverso un collegamento diretto all'interno delle apparecchiature informatiche, sfruttando il free-cooling. Sono monitorate alcune realizzazioni in corso in programmi già avviati da parte di imprese associate alla FIRE, evidenziando sia la riduzione dei consumi sia la qualità del servizio elettrico realizzato. Il prodotto dell'attività è costituito da linee guida per la progettazione energeticamente ottimizzata dei sistemi di supporto per i centri di calcolo.

B. Sviluppo di metodologie per la valutazione semplificata dei risparmi energetici in applicazioni tecnologiche innovative/efficienti nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica

L'obiettivo è lo sviluppo, in collaborazione con la Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE), il Comitato Termotecnica Italiano (CTI) ed alcuni istituti universitari, di metodologie per la definizione di indicatori di prestazione energetica in applicazioni tecnologiche nei settori industriali e terziario a supporto all'applicazione dei

decreti sull'efficienza energetica (certificati bianchi), anche sulla base di un confronto con le più significative esperienze internazionali disponibili (principalmente francesi).

C. Monitoraggio ed analisi prestazionale di un impianto di micro-cogenerazione; sviluppo di un modello di cogeneratore con motore a combustione interna

A partire dai risultati ottenuti durante il primo anno sul tema delle reti energetiche interattive ad alta integrazione, con inserite unità di micro-cogenerazione ($\leq 1~\text{MW}_{\text{el}}$) e l'utilizzo di tecnologie avanzate per il controllo delle reti termica ed elettrica, si procede con attività sperimentali volte al monitoraggio di un impianto cogenerativo, previa installazione di apposita strumentazione di acquisizione dati (sensorizzazione); per questo si rende necessario individuare una utenza finale presso cui eseguire l'attività di monitoraggio.

Parallelamente si effettua lo sviluppo di un modello dettagliato di microgenerazione con motore a combustione interna.

D. Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di supercondensatori a sistemi di movimentazione (carroponte) ed approfondimento teorico-sperimentale dell'utilizzo dell'accumulo in altri settori di applicazione

Con riferimento al tema relativo alle applicazioni di convertitori statici a semiconduttori per l'accumulo energetico e per il condizionamento della erogazione di energia elettrica (dalla rete) in presenza di carichi discontinui ed impulsivi nel corso del primo anno di attività sono state avviate due linee di attività, rispettivamente sull'accumulo con batterie e con supercondensatori.

Sulla scorta delle esperienze maturate sull'accumulo con supercondensatori (definizione delle strategie di controllo, loro influenza sul dimensionamento del sistema, valutazioni tecnico-economiche, progettazione ed esecuzione di una sezione di impianto "Carro ponte" in scala dell'attività sperimentale presso il centro ENEA Casaccia) si intendono verificare i risultati ottenuti in laboratorio con il coinvolgimento degli utenti finali dei settori industriale e del terziario presso cui è previsto la sperimentazione sul campo, in condizioni di esercizio reale.

Inoltre è previsto un approfondimento teorico-sperimentale dei temi trattati in precedenza, al fine di ampliare ad altri settori l'applicazione dell'accumulo elettrico e di migliorare, attraverso un ripensamento progettuale, la parte di conversione per ridurne i costi.

In particolare, si intende focalizzare l'attività sulla messa a punto e sulla validazione di modelli di sistemi di accumulo a supercondensatori in applicazioni idonee a conseguire il peak shaving in utenze caratterizzate da assorbimenti impulsivi di potenza intervallati da periodi a basso prelievo o in applicazioni di Power Quality.

Infine si intende sviluppare un convertitore dedicato per la riconversione di impianti esistenti, per ridurre il costo, la complessità e l'ingombro, aumentandone invece l'affidabilità dell'interfaccia di potenza. Tale sistema, dotato di una sua logica di gestione dell'accumulo eventualmente modificabile dall'esterno, deve essere realizzato in modo da non richiedere all'installatore nulla di più che collegarlo alla rete principale, al carico ed ai condensatori, senza la necessità di avere competenze di programmazione o di interfacciamento di sistemi elettronici di potenza.

E. Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di batterie a sistemi di trasporto a fune (funivia).

Analogamente a quanto previsto per l'applicazione dei supercondensatori di cui al punto precedente, sulla scorta delle esperienze maturate sull'accumulo con batterie (analisi comparata delle tecnologie di accumulo per l'applicazione ad una funivia, analisi dei cicli di lavoro, dimensionamento tecnico-economico dell'accumulo, ecc.), anche attraverso l'attività sperimentale svolta presso il centro ENEA Casaccia (prova vita), si intendono verificare i risultati ottenuti in laboratorio con il coinvolgimento di un utente finale (gestore impianto a fune) presso cui è prevista una sperimentazione sul campo, in condizioni di esercizio reale. Trasferire sul campo queste tecnologie pone numerosi problemi, che derivano dalle diverse condizioni al contorno (temperature, umidità, vibrazioni, ecc.) e dalle limitate informazioni disponibili sul comportamento della batteria e sugli effetti di taluni parametri (potenza, profondità di scarica, sovraccarica, temperatura) sulla vita utile, non tutti simulabili in laboratorio.

F. Valutazione dell'impatto dell'utilizzo delle batterie al litio nelle applicazioni stazionarie.

Le attività previste nel presente obiettivo sono finalizzate a porre le basi per un progetto nazionale di ampio respiro per lo sviluppo di batterie al litio per applicazioni nelle reti elettriche, con importanti implicazioni anche in altri settori applicativi. Le attività riguardano un'indagine completa sulle tipologie di celle al litio e sui materiali in esse utilizzate per definire delle priorità di scelta tenendo conto dei cicli di lavoro rappresentativi delle batterie nelle applicazioni alle reti elettriche più interessanti da un punto di vista energetico e/o economico. Sulla base di tale indagine viene quindi condotto uno studio di fattibilità scientifico (per individuare le principali necessità di ricerca di base), tecnologico (per definire le potenzialità applicative ed eventuali limitazioni ambientali) ed economico (per stimare costi attesi), assistito da alcune simulazioni con modelli semplificati delle applicazioni. I

risultati dello studio di fattibilità e delle simulazioni vengono quindi convalidati mediante una campagna sperimentale al banco di produti commerciali o pre-commerciali disponibili sul mercato di produzione straniera.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Portale dell'efficienza energetica e delle elettrotecnologie innovative negli usi finali

L'attività principale di questo obiettivo è la realizzazione preliminare di un portale dell'efficienza energetica. L'obiettivo del portale è diventare, attraverso un costante e continuo sviluppo ed arricchimento dei suoi contenuti tecnico-scientifici e dei servizi per l'utenza, una risorsa dove tutte le tematiche sull'efficienza energetica possano essere trattate in modo sistemico e correlato, con lo scopo di coagulare gli sforzi di ricerca intorno ad una struttura capace di aggregare i contenuti per arrivare ad essere un riferimento per il sistema nazionale.

Nel corso della presente annualità si è realizzata una versione preliminare, disponibile all'indirizzo www.efficienzaenergetica.enea.it. Si ritiene necessario, per poter proseguire nello sviluppo del portale, il coinvolgimento di soggetti esterni ad ENEA (incluso il MSE), in particolare per la realizzazione di alcune sue sezioni specifiche, così come previsto dal Piano straordinario per l'efficienza energetica.

La progettazione del portale si è dovuta inserire ed integrare nell'evoluzione del quadro generale dell'efficienza energetica, considerando il nuovo contesto legislativo/regolatorio nazionale e le indicazioni, spesso mutate nel corso del tempo e non sempre in completo accordo tra loro, derivanti dai relativi provvedimenti attuativi, tra cui appunto il Piano straordinario per l'efficienza energetica.

Si è principalmente tenuto conto delle indicazioni derivanti dal Decreto legislativo n. 115 del 30 maggio 2008 e s.m.i che descrive il ruolo dell'Agenzia (Unità) nazionale per l'efficienza energetica. Questo stabilisce un quadro di misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia, anche sotto il profilo costi-benefici.

Gli obiettivi indicativi nazionali di risparmio energetico sono individuati con i Piani di azione sull'efficienza energetica (PAEE). Il primo PAEE è stato consegnato dal MSE alla Commissione Europea nel luglio 2007; il secondo è entro il 30 giugno 2011; il terzo entro il 30 giugno 2014.

Un'esigenza primaria del portale è quella di integrarsi con il Piano di comunicazione sull'efficienza energetica di dell'Unità Tecnica Efficienza Energetica (UTEE) istituita in ENEA per promuovere le sue attività, con l'obiettivo di diventarne, nel tempo ed attraverso l'opportuno coordinamento con gli altri soggetti coinvolti esterni ad ENEA, il principale strumento di "dialogo" (inteso in senso ampio, quindi informazione, formazione, fornitura di servizi, piattaforma/strumento condiviso di lavoro) verso tutti i target da coinvolgere (cittadini, imprese, P.A., operatori economici).

Lunga è stata quindi la fase di analisi delle esigenze, che rappresenta già di per sé la fase più importante del lavoro di progettazione e realizzazione di un portale o di un qualsiasi applicativo web, ma diventa particolarmente delicata in un quadro di riferimento in costante evoluzione e che coinvolge molti soggetti con esigenze (derivanti dai ruoli e compiti specifici ad essi affidati) che richiedono l'individuazione degli strumenti informatici più idonei da utilizzare nell'ambito del portale.

In questa fase di analisi sono stati definiti:

- finalità generali del portale;
- target e finalità specifiche per target;
- contenuti principali, modalità di organizzazione dei contenuti e correlazioni tra contenuti;
- servizi che si intende erogare e problematiche tecniche ad essi correlati;
- strumenti di interazione, comunicazione, consulenza online e problematiche tecniche ad essi correlati;
- definizione workflow (redazione testi, autorizzazione e pubblicazione).

A valle di questa fase è stata definita la struttura del portale e realizzata la versione preliminare.

Per realizzare il portale "Obiettivo efficienza energetica" si è deciso di utilizzare un Content Management System (CMS). Questo tipo di strumento, il più utilizzato attualmente, consente di sviluppare portali di tipo avanzato la cui gestione e aggiornamento è oltremodo semplificata, in quanto garantisce che operatori non specialisti in informatica possano agevolmente inserire e modificare i contenuti delle sezioni e delle pagine dinamiche di propria competenza preservando le caratteristiche di fruibilità e accessibilità del sito.

Più in dettaglio, un CMS offre la possibilità di separare la struttura e il layout del sito dai contenuti. Una volta sviluppata (da parte di un gruppo di esperti) l'interfaccia (la "scatola", modulare ed aggiornabile, compresa di

grafica anche sofisticata) è possibile per chiunque modificare ed aggiornare i contenuti di propria competenza attraverso un semplice editor testuale, in piena autonomia e senza necessità di competenze informatiche.

Il CMS consente di organizzare, gestire e controllare in maniera ottimale il flusso di lavoro che porta alla pubblicazione dei contenuti, grazie all'assegnazione di specifici permessi e ruoli per accedere ad una determinata area del sito e: inserire o modificare contenuti (editori); approvare i contenuti (validatori); pubblicare i contenuti. Il CMS presenta, inoltre, molteplici funzionalità avanzate, tra cui la presenza di un motore di ricerca, la possibilità di implementare strumenti di interazione e comunicazione con i pubblici di riferimento, quali newsletter, form (es. format per iscrizione online agli eventi) ecc.

Il portale è realizzato secondo i criteri di usabilità e accessibilità previsti dalla legge 4/2004 "Disposizioni per favorire l'accesso dei soggetti disabili agli strumenti informatici" che sancisce per le Pubbliche Amministrazioni l'obbligo ad implementare siti web usabili e accessibili.

Il portale e l'interfaccia di gestione del CMS utilizzato per la sua realizzazione e gestione sono conformi ai requisiti di accessibilità ed usabilità richiesti dalla normativa in tutti gli aspetti: struttura e architettura del sito, completezza delle informazioni, stile adottato per la stesura dei contenuti, facilità di accesso. Tale conformità è in accordo con il DigitPA (ex CNIPA) e dovrà essere assicurata nel tempo, nella gestione e continua implementazione del portale.

All'interno del portale saranno sviluppate alcune applicazioni accessorie, quali:

- una Newsletter informativa che sarà inviata per e-mail e scaricabile dal portale (Figura 238);
- una banca dati per la gestione di Normativa;
- una banca dati per la gestione di Certificazioni energetiche;
- un form di iscrizione a eventi/corsi a campi predefiniti, con l'invio dei dati tramite e-mail. I dati che gli utenti immetteranno in tali form saranno mantenuti in un repository/database e sarà consentita l'interrogazione da parte di editors e/o amministratori di sistema;
- un form di iscrizione/cancellazione in mailing list con possibilità di integrazione con eventuale DB esterno.



Figura 238. Newsletter informativa del portale "Obiettivo efficienza energetica"

Il portale dell'efficienza energetica contribuirà a raccogliere e favorire la fruizione, massimizzandone la valorizzazione, di tutto il materiale prodotto nell'ambito RdS (Ricerca di Sistema Elettrico) sul tema dell'efficienza energetica.

L'attività di ricognizione delle tecnologie elettriche utilizzate nelle utenze industriali svolta nel corso del primo anno dell'Accordo di Programma ha fornito numerosi studi sulle principali tecnologie per l'ottimizzazione dei flussi energetici (elettrici e termici) nei processi produttivi, la riduzione dei consumi e l'aumento dell'efficienza energetica. Il presente obiettivo A, oltre alla realizzazione preliminare del portale per l'efficienza energetica, prevede un nutrito numero di attività di approfondimento e sviluppo di alcuni temi trattati nel corso del primo anno di attività. Alcune di queste attività di ricerca sono state svolte per consentire la predisposizione di alcune delle schede di valutazione dei risparmi energetici nell'ambito del meccanismo relativo ai Titoli di Efficienza Energetica, di cui al successivo obiettivo B.

Le attività di ricerca sono state svolte con questa logica, giustificata anche dall'esigenza di fornire prodotti di ricerca il più possibile di interesse e pronti all'utilizzazione da parte degli operatori di settore lato utenza finale (principale *target* individuato), e quindi aderenti alle esigenze del mercato delle tecnologie in continua evoluzione e adattamento alle nuove indicazioni normativo/legislative, con il coinvolgimento di alcuni Dipartimenti Universitari e della Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE).

E' stata avviata un'attività di ricerca volta ad approfondire il tema dell'uso razionale dell'energia nella produzione e gestione dell'aria compressa per alcuni settori industriali, che più di altri destinano una quota dei propri consumi elettrici a questo servizio. Lo studio, meglio specificato nel seguito, è stato condotto avvalendosi di dati storici sui

consumi e di prove sul campo in aziende campione, analizzando la fattibilità tecnico-economica-ambientale degli interventi proposti (particolare attenzione viene dedicata all'applicazione degli azionamenti a velocità variabile sui compressori rotativi con potenze superiori ai 30 kW) e considerando anche la potenzialità energetica-economica del recupero termico del calore, sottoprodotto della generazione di aria compressa.

Si è inoltre investigata la possibilità e le problematiche dell'impiego di sistemi energetici innovativi, quali *Stirling*, micro-cicli *Rankine* a vapor d'acqua o a fluido organico (ORC), micromotori a combustione interna o microturbine a gas con IBC, microcogeneratori termofotovoltaici (TPV) nella produzione combinata di energia elettrica e calore, per taglie di potenza elettrica fino a 5 kW. Si sono valutate le potenzialità di tali sistemi nelle applicazioni di cogenerazione e/o trigenerazione per utenze con fabbisogni termici a medio/bassa temperatura e con richieste frigorifere tipiche del condizionamento. Sono state indagate le problematiche dell'interconnessione del sistema energetico in studio sia con la rete interna dell'utenza, sia con la rete nazionale o con sistemi di accumulo elettrochimico per l'installazione ad isola.

Infine, sono state avviate esperienze sul miglioramento della rete elettrica per aumentarne la flessibilità e la capacità di accogliere i contributi sia di tipo attivo, sia di tipo passivo degli utenti; occorre affrontare prima i problemi di media tensione e successivamente quelli della bassa tensione, non solo dal punto di vista della generazione distribuita, ma anche per gli aspetti di progettazione e gestione delle apparecchiature dell'utenza.

In particolare, con il coinvolgimento della FIRE è stato eseguito uno studio sulla garanzia della fornitura e qualità del servizio elettrico nei centri di calcolo. I centri di calcolo sono caratterizzati dal funzionamento continuo (24 ore su 24, 7 giorni su 7); necessitano quindi di particolari sistemi per garantire la costanza della fornitura elettrica sia alle apparecchiature informatiche che agli impianti di condizionamento delle macchine stesse. Questa garanzia si effettua attraverso le unità di continuità o UPS (*Uninterruptible Power Supply*) e generatori di emergenza. Sono state prodotte delle linee guida per la progettazione energeticamente ottimizzata dei sistemi di supporto per i centri di calcolo.

Nel seguito si entra nel dettaglio delle attività svolte in collaborazione con le Università e la Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia.

A1. <u>Opportunità di ottimizzazione dei consumi nella produzione/distribuzione/utilizzo dell'aria compressa nei settori industriali più sensibili</u>

L'Università di Pavia ha sviluppato uno studio sull'uso razionale dell'energia nella produzione-trattamento-distribuzione-utilizzo dell'aria compressa per alcuni settori industriali, che destinano una quota rilevante dei propri consumi elettrici a questo servizio energetico.

I settori, da cui sono stati tratti i campioni oggetto degli audit e delle analisi, sono: alimentare, meccanico, lavorazione dei filati (calze), lavorazione delle materie plastiche, per il settore manifatturiero non di base. La chimica (farmaceutica) e l'editoria per l'industria manifatturiera di base. I primi 4 settori da soli coprono una quota di circa 44000 GWh/a su un totale di 55000 GWh/a del settore manifatturiero non di base (dati di sintesi sui consumi elettrici 2009, in calo del 12,7% rispetto al 2008). I due ultimi settori hanno consumi globali di circa 16000 GWh/a su un totale di 57000 (dati statistici 2009 da Terna in calo del 18% rispetto al 2008).

Lo studio ha compreso anche un'analisi dei sistemi di misura, monitoraggio e controllo delle prestazioni delle variabili di sistema, con esempi di corretto dimensionamento di tutto il sistema. In particolare, l'attenzione è stata rivolta a macchine di tipo rotativo a partire da 30 kW, trifasi alimentate sia in bassa sia in media tensione fino a qualche centinaio di kW, operanti sui livelli di pressione più comune nell'industria: da 0,5 fino a 1 MPa (da 5 a 10 bar). In questa parte si sono escluse considerazioni riguardanti macchine centrifughe. Il tipo di controllo più frequente è risultato essere quello che regola la portata facendo passare il compressore da un regime di "pieno" carico a quello di vuoto, in cui tuttavia il motore, che trascina il compressore, risulta alimentato con prelievi di potenza che raggiungono anche il 20-25% del valore a carico. Questo tipo di macchine dette anche a velocità fissa sono responsabili della maggior parte dei consumi.

A partire da dati AFISAF (2009) sul numero di pezzi venduti di elettrocompressori dai 2 kW fino ad oltre 250 kW, si propone nella Tabella 57 una stima dei consumi sul parco installato in Italia per classi di potenza. La potenza di riferimento è relativa alla potenza nominale del motore installato. La stima deriva dal considerare mediamente in servizio una macchina per 15 anni e un totale di ore di funzionamento pari a 2100 h/a per compressori al di sotto dei 22 kW, di 3780 h/a fino a 110 kW e 5040 h/a per potenze superiori. Trasversalmente nelle classi è stata considerata un'incidenza delle ore di vuoto pari al 20% di quelle a carico; per quanto riguarda la potenza a vuoto, fino a 90 kW si è considerata una potenza a vuoto dell'ordine del 25% rispetto a quella a carico. Oltre, è stato considerato un valore lievemente inferiore e pari al 20%.

Tabella 57. Stima dei consumi degli elettrompressori (> 2 kW) installati in Italia

	Totale consumi al 2009,
kW	inclusi VDS dal 2004
	(kWh/a)
2	21.310.717
4	125.405.010
5.5	391.036.863
7.5	978.397.123
11	1.418.054.321
15	1.046.109.430
18.5	674.179.298
22	1.154.211.540
.30	1.429.522.709
37	1.498.628.087
45	1.375.134.377
55	1.298.011.601
75	2.201.565.592
90	419.215.712
110	387.535.159
132	464.349.496
160	526.132.675
oltre 160	771.866.596
	16.180.666.303

Tabella 58. Ipotesi adottate su efficienza media motori e loro evoluzione nel periodo 1995-2009

lkw	Eff media motori a	Rate cresciuata eff media a
	carico	carico su 15 anni
2	0,85	2,00%
4	0,85	2,00%
5,5	0,85	2,00%
7,5	0,85	2,00%
11	0,87	2,00%
15	0,87	2,00%
18,5	0,87	2,00%
22	0,87	2,00%
30	0,9	1,50%
37	0,9	1,50%
45	0,9	1,50%
55	0,9	1,50%
75	0,9	1,50%
90	0,92	1,50%
110	0,92	1,50%
132	0,92	1,50%
160	0,9	1,50%
oltre 160	0,95	1,00%

La configurazione dello studio ha previsto di muoversi su due fronti: un diretto, in cui gli utenti sono stati coinvolti "ex novo" nelle campagne di misurazione ed uno indiretto in cui ci si è avvalsi di dati provenienti da campagne di misurazione già avvenute per cui si è avuta la liberatoria da parte dell'utente finale di poter analizzare i dati.

Lo studio è stato presentato nelle sue finalità avvalendosi dei contatti sopra citati e così portato a conoscenza degli utenti finali, che hanno potuto decidere se partecipare alla campagna di monitoraggio oppure, se la campagna si era già svolta negli ultimi 12 mesi, dare il consenso all'utilizzo dei dati.

Dall'analisi della configurazione del sistema si sono valutate le aree di intervento, anche facendo riferimento a simulazioni: è stata analizzata la fattibilità tecnico-economica-ambientale di interventi di razionaliz-zazione energetica sull'intero sistema produzione-distribuzione-uso. Particolare attenzione è stata dedicata all'applicazione degli azionamenti a velocità variabile sui compressori rotativi con potenze superiori ai 30 kW, in quanto tra i

Per quanto riguarda l'efficienza media dei motori si sono considerate le ipotesi presentate in Tabella 58, in cui si riporta anche il fattore di crescita media utilizzato, per classe di potenza, sul periodo 1995-2009, ossia su un orizzonte temporale di 15 anni, che è quello di interesse per il calcolo dei consumi.

Si è inoltre considerato che un 30% delle vendite per potenze superiori a 90 kW siano destinate a macchine di backup o turnazione, mentre per quanto riguarda i compressori a velocità variabile, è stato possibile redigere una stima dei consumi solo a partire dal 2004 e solo macchine superiori a 30 kW sono state inserite nel calcolo. Le percentuali di venduto a velocità variabile per classe di potenza si ha solo per gli anni 2004 e 2005. Per gli anni successivi si sono tenuti gli stessi trend di crescita (per macchine inferiori a 90 kW si passa da una quota di mercato, per classi di potenza, di circa il 14% nel 2004 al 24% del 2009; per macchine di potenza uguale o superiore la quota di mercato, per classe, passa da circa il 12% del 2004 al 26% del 2009). Questo è stato fatto ipotizzando una stima dei risparmi tra il 10 ed il 18% rispetto a quelli a velocità fissa. I dati sui consumi per compressori da 2 kW sono parziali e dipendono dal fatto che le vendite sono state registrate solo a partire dal 1998 (dunque non si hanno a disposizioni dati sull'intero periodo di 15 anni), i consumi sui compressori con potenza superiore a 160 kW hanno come riferimento una potenza di 315 kW.

Nel dettaglio sono stati calcolati i consumi dal 2005 al 2009, avendo a disposizione dati sul venduto a partire dal 1990. Riassumendo: si stima dunque che in Italia per la produzione di aria compressa si consumino oltre 16 TWh/a.

È stato analizzato lo stato dell'arte e le modalità di utilizzo dell'aria compressa nell'industria (e.g. livelli di pressione e configurazioni tipiche, ecc). Questo ha successivamente permesso di definire delle possibili baseline di prestazioni sull'attuale parco installato, di cui sono state proposte stime su consumi energetici e sulla consistenza (Tabella 59).

I contatti con le aziende sono stati presi attraverso diversi attori: sia società di vendita, sia esperti operati nel settore dell'aria compressa o delle diagnosi energetiche, sia associazioni di servizio e di categoria.

Tabella 59. Consistenza del parco elettrocompressori lubrificati

Potenza (kW)	Totali 1995-2009
2	
4	10.035
5.5	21.166
7.5	38.905
11	41.116
15	23.253
18.5	12.453
22	17.404
30	10.274
37	8.614
45	6.180
55	4.738
75	5.987
90	1.235
110	892
132	688
160	631
oltre 160	637

diversi interventi proposti è risultato spesso quello in grado di realizzare i risparmi maggiori.

Nelle valutazioni si è guardato anche alla potenzialità energetica-economica del recupero termico del calore, sottoprodotto della generazione di aria compressa. Per i settori merceologici interessati allo studio si è valutato il risparmio in energia finale e primaria e di emissioni di CO₂ equivalenti, fornendo anche una valutazione sull'ordine di grandezza degli investimenti più remunerativi e dei relativi tempi di ritorno.

A livello di settore si sono poi elaborati scenari di risparmio di energia primaria ed emissioni di CO₂ equivalenti al 2020. In Figura 239 e 240 sono riportati i risultati finali aggregati secondo le ipotesi dei due scenari analizzati: uno di minimo impatto (identificato con min) ed uno più aggressivo (identificato con MAX).

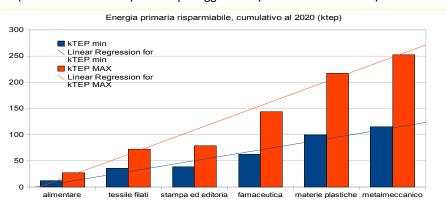


Figura 239. Risparmi conseguibili nell'ottimizzazione dei sistemi aria compressa per i settori indagati secondo due scenari: uno di minimo impatto (min), uno più aggressivo (MAX)

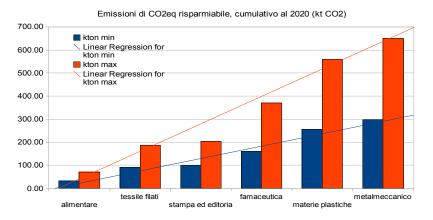


Figura 240. Risparmi conseguibili nell'ottimizzazione dei sistemi aria compressa per i settori indagati secondo due scenari: uno di minimo impatto (min), uno più aggressivo (MAX)

Essendo i grafici cumulativi le etichette dell'asse x vanno intese come settore che successivamente entra nel computo dei risparmi: più precisamente, si parte con il settore alimentare e man mano si inseriscono i contributi del settore tessile (in posizione 2), del settore stampa ed editoria (in posizione 3), fino ad arrivare ad aggiungere il contributo del settore meccanico (sesta posizione).

Lo scenario MIN e MAX sono stati ricavati dalla composizione delle ipotesi riportate nella Tabella 60 sui diversi settori. Ossia lo scenario MIN è creato dalla composizione delle seguenti ipotesi, derivanti dagli audit svolti sulle aziende campione: (i) minimo impatto della quota di consumi destinati alla produzione di aria compressa (AC) e (ii) minimo tasso di crescita (negativo -1%) della quota AC sui consumi di settore al 2020. Lo scenario MAX dall'applicazione delle ipotesi di (i) maggiore incidenza sui consumi elettrici di settore dell'AC e (ii) tasso di crescita di tali consumi al 2020 positivo e pari al 2%.

Gli scenari sono stati costruiti tenendo in considerazione il fatto che nei prossimi 10 anni il parco delle macchine attualmente installate dovrebbe essere sostituito per almeno 2/3, in accordo con le ipotesi di una vita media utile di 15 anni, rimanendo tuttavia in un campo di ipotesi di tipo tutelativo, che dunque non sovrastima i risparmi ottenibili. Si ricorda inoltre che le stime partono da dati sui consumi 2009, che rispetto al passato risentono della crisi economica.

Tabella 60. Dati di partenza per la costruzione dello scenario min e dello scenario MAX, che hanno determinato i cumulativi di risparmio di energia primaria e di emissioni di CO₂eq al 2020

							Tipo	ologia di inte	ervento		
Settore merceologico	Consumi elettrici globali al 2009 GWh/a	Stima 2009 % di consumo su AC min	Stima 2009 % di consumo su AC min	Consumi su aria compressa (stima 2009, GWh/a) min	Consumi su aria compressa (stima 2009, GWh/a) min	Generazione	Trattamento	Distribuzione di tipo concentrato	Distribuzione di tipo concentrato	monitoraggio	Media pesata (%)
Alimentare	12558,00	5,00%	8,00%	628	1004,64	15,00%	1,00%	2,00%	5,00%	1,00%	12.00%
Tessile filati e tessile confezionamento	4412,20	20,00 %	30.00%	882	1323,66	20,00%	2,00%	5,00%	5,00%	1,00%	15,00%
Stampa ed editoria	1736,40	8,00%	10,00%	139	173,64	20.00%	1,00%	2,00%	5,00%	1,00%	15,00%
Farmaceutica	14227,30	10,00%	20.00%	1.423	2845,46	15,00%	1,00%	2 ,00%	5,00%	1,00%	10,00%
Materie plastiche	7194,30	20,00%	30,00%	1.439	2158,29	20.00%	1,00%	2,00%	5,00%	1,00%	15,00%
Metalmeccanico	19105,50	5.00%	8,00%	955	1528,44	12.00%	1,00%	2,00%	5,00%	1,00%	10,00%

	Fattori di crescita	Fattori di crescita	'		Risparmi conseguibili al 2020 /GWh; MA consumi)		Fattori impiegati (AEEG, 2008) 0,481 kgCO ₂ /kWhe Tep/MWh 0,187	
Settore merceologico	del consumi AC su 10 anni (min)	del consumi AC su 10 anni (max)	Min crescita	Max crescita	Min crescita	Max crescita	Emissioni evitabili al 2020 (kteq di CO ₂) min	Emissioni evitabili al 2020 (kteq di CO ₂) MAX
Alimentare	-1,00%	2,00%	68,14	91,85	109,03	146,96	33	71
Tessile filati e tessile confezionamento	-1,00%	2,00%	110.71	161,35	179,56	242,03	58	116
Stampa ed editoria	-1,00%	2,00%	18,84	25,40	23,56	31,75	9	15
Farmaceutica	-1,00%	2,00%	128,67	173,43	257,34	346,86	62	167
Materie plastiche	-1,00%	2,00%	195,19	263,09	292,79	394,64	94	190
Metalmeccanico	-1,00%	2,00%	86,19	116,45	138,23	186,32	42	90

A livello informativo è inoltre stata allestita una pagina web, collegata al laboratorio prove consumi energetici aria compressa (LABAC), in cui si riassumono i dati più interessati dello studio. Si veda il sito http://www-3.unipv.it/energy/labac.

Lo studio condotto dall'Università di Pavia propone inoltre una metodologia di valutazione semplificata dei risparmi energetici conseguibili con l'applicazione della tecnologia degli azionamenti a velocità variabile su compressori rotativi di potenza superiore ai 30 kW. Viene proposta anche una scheda di valutazione dei risparmi ottenibili dal recupero termico sui gruppi funzionanti a regime, nell'ottica dei meccanismi per l'acquisizione dei certificati bianchi (CB) o titoli di efficienza energetica (TEE). L'attività rientra per competenza nel successivo obiettivo, ma è riportata in questa sezione per semplicità di lettura del documento.

Nelle due proposte si evidenziano le possibili problematiche e gli argomenti su cui prevedere delle consultazioni pubbliche da parte degli stakeholder (siano essi costruttori, distributori, ESCo o clienti finali).

In particolare per la scheda n.1 gli argomenti più interessanti riguardano: la lunghezza del periodo su cui produrre il monitoraggio, come valutare la potenza a vuoto senza sovrastimarne il ruolo, la valenza dell'indicazione sui cicli vuoto/carico. Per quanto riguarda la scheda n.2 (recupero termico su scambiatori aria/acqua) le questioni più controverse riguardano il corretto conteggio dei consumi degli ausiliari, la lunghezza del periodo su cui produrre il monitoraggio, valori di efficienza media dei generatori di calore, smaltimento del calore non utilizzato.

Sinteticamente, lo studio ha affrontato i seguenti temi: (i) si è inquadrato l'argomento tecnico ed analizzato le modalità più comuni nella produzione/trattamento/distribuzione/utilizzo e misura nell'ambito dell'aria compressa nel settore industriale; (ii) si sono organizzati e condotti gli audit con un partner industriale (Atlas Copco Italia, che ha fornito gli strumenti di misura ed il know how dei propri tecnici), (iii) si sono valutate le aree di intervento ed i risparmi conseguibili a fronte degli interventi ipotizzati; (iv) si è lavorato sulla predisposizione di schede metodologiche per la valorizzazione dei risparmi ottenibili (lato elettrico e lato termico); (v) si sono creati ed analizzati scenari possibili di interventi; (vi) a livello divulgativo sono state organizzate giornate ad hoc presso l'industria, nonché allestita una pagina web dei risultati raggiunti, collegata al sito del laboratorio sull'aria compressa presente presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Pavia.

A.2 <u>Integrazione di sistemi cogenererativi innovativi di piccolissima taglia nelle reti di distribuzione dell'energia elettrica, termica e frigorifera</u>

L'attività prevede una collaborazione congiunta di ENEA, del Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia dell'Università di Bologna (e del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara.

Scopo dell'attività è investigare la possibilità e le problematiche dell'impiego di sistemi energetici innovativi di piccola taglia nella produzione combinata di energia elettrica e calore e di valutare il risparmio di energia primaria conseguibile con queste tecnologie rispetto a soluzioni convenzionali.

o Analisi delle tecnologie di cogenerazione di piccola taglia

L'indagine ha evidenziato le soluzioni già disponibili e quelle innovative (Tabella 61), quali motori *Stirling*, micro cicli *Rankine* a vapor d'acqua o a fluido organico (MCR), micro motori a combustione interna (MCI), microturbine a gas (MTG) o microturbine a gas con IBC, microcogeneratori termofotovoltaici (TPV) nella produzione combinata di energia elettrica e calore.

Per tutte tecnologie nel rapporto completo, disponibile in rete, viene fornito un ampio quadro relativo alle specifiche caratteristiche funzionali, al campo di taglie di potenze disponibili e alle prestazioni energetiche ottenibili (si veda in particolare la Figura 241 relativa alle tecnologie disponibili).

Tabella 61. Tecnologia per la microgenerazione	Tabella 61. 7	Tecnologia	per la mi	icrogenerazi	ione
--	---------------	------------	-----------	--------------	------

Tecnologie già disponibili	Tecnologie non ancora disponibili
Motori a combustione interna alternativi (MCI)	Microturbine a ciclo di Brayton inverso (IBC)
Microturbine a gas (MTG)	Sistemi termo-fotovoltaici (TPV)
Micro Cicli Rankine (MRC)	
Motori Stirling	

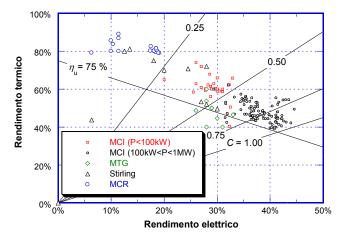


Figura 241. Punti rappresentativi dei diversi cogeneratori in commercio nelle condizioni di potenza elettrica di targa e massimo recupero termico, nella mappa rendimento termico-rendimento elettrico

 Analisi delle problematiche di integrazione dei sistemi microcogenerativi con le reti interne di distribuzione dell'energia

Sono state presentate le problematiche di connessione con la rete elettrica in bassa tensione e, dopo un excursus più generale sulle tipologie di connessioni possibili, si è esaminato in particolare l'interfacciamento con le reti di impianti di micro cogenerazione, illustrando le due principali configurazioni delle microreti, ossia: microreti connesse alla rete pubblica esterna e microreti funzionanti in isola di carico: Sono state analizzate le problematiche di protezione, le possibili connessioni delle diverse sorgenti, mediante convertitori elettronici di potenza, le proprietà degli inverter e le caratteristiche peculiari di alcuni sistemi di micro-cogenerazione.

Si è quindi proceduto ad analizzare in dettaglio le problematiche di esercizio ottimo di sistemi di cogenerazione di piccola taglia connessi a reti di distribuzione del calore a servizio di impianti di condizionamento ambientale (riscaldamento e raffrescamento). In particolare si sono analizzate le caratteristiche dei sottosistemi di un impianto di climatizzazione con il calcolo del rendimento dei sistemi di distribuzione, in base alle norme UNI TS 11300-2 (per il riscaldamento) e UNI TS 11300-3 (per il condizionamento) e le strategie per l'ottimizzazione di tale

rendimento. Sono state quindi studiate le caratteristiche delle principali tipologie di reti di distribuzione del calore connesse a centrali di cogenerazione per impiego civile e l'ottimizzazione delle reti stesse.

o Valutazione delle potenzialità della cogenerazione nell'applicazione civile residenziale nello scenario europeo

E' stata effettuata una valutazione di massima di tipo economico delle potenzialità di tecnologie di cogenerazione

di piccola/piccolissima taglia applicate al settore civile residenziale, in cui si è evidenziato da un lato il quadro degli scenari tariffari del gas naturale e dell'energia elettrica per utenti domestici europei, dall'altro il quadro del fabbisogno di energia elettrica e termica per le utenze domestiche.

In particolare il quadro tariffario si riferisce alle tariffe medie del gas naturale e dell'energia elettrica (al netto e al lordo delle tasse), per le varie classi di consumo riportate in Tabella 62, con riferimento al secondo semestre 2007.

Sono stati esaminati i principali fabbisogni di energia elettrica per l'illuminazione e le applicazioni elettriche di un'utenza residenziale e di energia termica, che sono essenzialmente quelli per il riscaldamento. I fabbisogni di calore sono riportabili in termini di fabbisogno di energia primaria,

Tabella 62. Classi tariffarie di gas naturale ed energia elettrica per consumatore domestico

Classe	Consumo		
Gas naturale [GJ/anno] ([Sm³/anno])			
D1	< 20 (525)		
D2	20 - 200 (525 ÷ 5254)		
D3	> 200 (5254)		
Energ	ia elettrica [kWh/anno]		
DA	< 1000		
DB	1000 ÷ 2500		
DC	2500 ÷ 5000		
DD	5000 ÷ 15000		
DE	> 15000		

Per la conversione GJ -> Sm³: PCI_{GN} = 35600 kJ/Sm³

seguendo le linee guida generali sull'efficienza energetica degli edifici che sono state stabilite dalla Direttiva Europea 2002/91/CE e sono state esaminate specificamente per i diversi paesi europei.

Il quadro del fabbisogno di energia elettrica si è basato su varie fonti, in particolare sui dati riportati nel progetto ODYSSEE dei consumi elettrici per abitazione nel decennio 1996-2005 in diversi paesi europei.

Sulla base dello scenario tariffario e dei fabbisogni energetici si è effettuata un'analisi parametrica consistente nella determinazione del tempo necessarioper recuperare i costi aggiuntivi del sistema di cogenerazione rispetto ad una caldaia tradizionale di pari potenzialità termica. A causa della molteplicità e dell'ampia variazione possibile dei parametri che influenzano la remuneratività dei sistemi micro-cogenerativi analizzati, quali, i fabbisogni energetici, i rendimenti del sistema cogenerativo, la tecnologia, la taglia, il costo e lo scenario tariffario, si è effettuata un'analisi di sensibilità finalizzata a determinare l'effetto dei principali parametri sulla remuneratività del sistema. L'analisi è stata svolta con un opportuno metodo di calcolo delle prestazioni energetiche e di ritorno dell'investimento.

I risultati ottenuti sono stati forniti sotto forma di mappe in cui, per dato tempo di ritorno, si fissa il costo addizionale della tecnologia cogenerativa e, per diversi valori del fabbisogno termico da soddisfare, si trovano i costi di combustibile e di energia elettrica che garantiscono quel tempo di ritorno. A titolo di esempio si riporta in Figura 242 la mappa relativa ad un micro-cogeneratore basato su mptore a combustione interna.

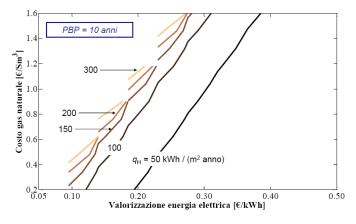


Figura 242. Micro-cogeneratore basato sul motore alternativo a combustione interna: $\eta_e = 25 \%$, $\eta^* = 75 \%$ (potenza termica specifica $p_t = 0.15 \text{ kW/m}^2$, costo addizionale $c_{\text{add}} = 100 \text{ €/kW}_f$)

 Valutazione delle prestazioni dei sistemi cogenerativi nell'applicazione civile residenziale nello scenario italiano

Sono state analizzate le prestazioni energetico/economiche delle diverse tecnologie di micro-cogenerazione attualmente disponibili in alcuni scenari di impiego nell'ambito civile residenziale; tali scenari sono rappresentativi delle tipiche condizioni in cui si può pensare di installare un cogeneratore in ambito civile residenziale, cioè supponendo che sia al servizio di un'abitazione monofamiliare o di un complesso di appartamenti. La richiesta di energia termica è univocamente ricostruibile sulla base di alcuni parametri oggettivi legati allo specifico caso (dimensioni delle unità abitative, caratteristiche dell'involucro, zona climatica), ma per alcuni aspetti, quale in particolare la distribuzione oraria dei carichi, è qui generalizzata a prescindere dal singolo caso specifico di abitazione.

La configurazione del sistema cogenerativo integrato alle reti elettrica e di distribuzione del calore di un'utenza civile viene schematizzato in Figura 243. Si è supposto che il sistema cogenerativo, che comprende l'accumulo e la

caldaia integrativa, venga esercito in modalità ON/OFF, senza modulazione del carico e senza dissipazioni di calore.

Nello studio, sulla base della zona climatica e della dimensione dell'utenza, sono state ottenute delle correlazioni tra la potenza termica di picco richiesta dall'utenza, la potenza termica fornita dal cogeneratore, le sue ore di funzionamento e la capacità del sistema di accumulo dell'energia termica.

Quindi, considerando alcune ipotesi generali riferite al panorama tariffario italiano, sono state determinate le prestazioni di diversi cogeneratori in commercio operanti in due scenari tipici

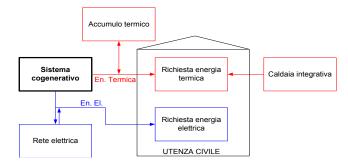


Figura 243. Configurazione del sistema cogenerativo integrato alle reti elettrica e di distribuzione del calore di un'utenza civile

corrispondenti al caso di una villetta unifamiliare e ad un gruppo di appartamenti, considerando sia il sistema cogenerativo con accumulo termico sia senza.

In particolare è stato determinato l'andamento dei costi specifici minimi ammissibili che rendono remunerativo l'investimento nella cogenerazione rispetto alla produzione separata del calore con caldaia più il prelevamento dell'energia elettrica dalla rete. Infine si sono valutati i vantaggi energetico ambientali della cogenerazione secondo l'espressione dell'IRE_{mod}, parametro introdotto nella Scheda Tecnica 21 e aggiornato nella 21-bis dell'AEEG.

 Sviluppo di un metodo di calcolo per la valutazione del risparmio di energia primaria ottenuto con impianti di microcogenerazione per la climatizzazione invernale degli edifici

Questa attività rientra per competenza nel successivo obiettivo B, ma è qui riportata per semplicità di lettura del documento.

Sulla base dei risultati a cui si è pervenuti ai punti precedenti, è stata sviluppata e proposta una metodologia di calcolo semplificato per la valutazione del risparmio di energia primaria che un micro-cogeneratore consente di ottenere.

Il metodo proposto fornisce una valutazione ex-ante dei risparmi conseguibili, ovvero basata non sui dati di esercizio, ma quelli di targa dell'impianto cogenerativo e del sistema di distribuzione. Il metodo è applicabile a impianti di taglia inferiore ai 50 kW elettrici (ovvero di "micro cogenerazione" secondo il DLgs 20/2007) e ad utenze di tipo civile ubicate nelle zone climatiche C, D ed E.

In particolare il metodo consente di determinare il risparmio di energia primaria in funzione di pochi semplici parametri funzionali di targa ed operativi caratteristici del sistema cogenerativo (rendimento termico del cogeneratore e di distribuzione, taglia di potenza termica, rapporto tra potenza elettrica e termica, capacità del sistema di accumulo, ore di esercizio del cogeneratore) e della specifica utenza (fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento).

A.3 <u>La garanzia della fornitura e qualità del servizio elettrico nei centri di calcolo e le metodologie per la definizione di indicatori di prestazione energetica in applicazioni tecnologiche nei settori industriali e terziario a supporto all'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica (FIRE)</u>

I centri di calcolo sono utenze in continua crescita per la sempre maggior diffusione di servizi web e moltissime altre applicazioni in tutti i settori che richiedono risorse di calcoli o gestione di database.

Rimanendo accesi 24 ore al giorno, 7 giorni alla settimana tutto l'anno, con carichi spesso costanti, hanno costi energetici tipicamente dello stesso ordine di grandezza dei costi di acquisto e di gestione. Sono quindi dei carichi che, anche per utenti per i quali i data center non sono core business o rappresentano una piccola frazione dei consumi, dovrebbero essere valutati con attenzione: infatti, un centro di calcolo efficiente, oltre ai minori consumi, ha minori costi totali valutati sull'intero ciclo di vita (LCCA). Inoltre la sempre maggior attenzione alle tematiche ambientali che ha aperto a livello internazionale il filone dei "green data center" fa si che in questo campo le scelte efficienti siano premianti anche dal punto di vista dell'immagine.

Un centro di calcolo efficiente è un insieme di tecnologie efficienti, di progettazione razionale e di attenta gestione, che possono stabilizzare i consumi al continuo aumentare delle prestazioni richieste o addirittura ridurli. Permangono però una serie di ostacoli strutturali, comportamentali e gestionali alla diffusione di centri di calcolo o componenti efficienti come è stato evidenziato anche da un'indagine condotta per questo studio.

La conoscenza dei reali dati di consumo e dei parametri di funzionamento permette di valutare e tenere sotto controllo gli indici di efficienza e la loro evoluzione nel tempo, strumenti indispensabili per mantenere e migliorare l'efficienza energetica. La conoscenza dei carichi reali e il loro andamento nel tempo non serve solo alla gestione efficiente, ma anche a poter pianificare e ottimizzare la numerosità dei server e per poter progettare al meglio interventi strutturali o la progettazione ex novo.

I data center sono composti da 3 parti principali: IT, sistemi ausiliari e alimentazione, in ordine di consumi decrescenti. La parte IT, la più energivora ma anche quella che produce "lavoro utile", richiede per funzionare la presenza delle altre e la sua efficienza ne influenza il dimensionamento e i consumi. Lo studio fornisce una panoramica sui componenti efficienti e dei programmi volontari che ne stimolano la scelta, partendo da quelli IT come processori, memorie, sistemi storage e apparati di rete, per poi passare all'alimentazione con i sistemi di continuità e la distribuzione e infine i sistemi ausiliari, passando in rassegna i componenti dei sistemi di raffreddamento.

I soli componenti efficienti sono però solo una parte della ricetta, si deve procedere a una scelta e progettazione razionale. In alcuni casi piccoli interventi di tipo strutturale possono portare a un sensibile miglioramento, mentre in altri è necessaria la completa ristrutturazione ed il riconcepimento del data center. In entrambi i casi va salvaguardato il requisito fondamentale dell'affidabilità del sistema. La ridondanza è fondamentale per garantire la disponibilità, ma influenza i costi di investimento e di gestione, nonché l'architettura del sistema, deve quindi essere valutata in base alle reali necessità di livello di servizio.

Se il centro di calcolo deve ancora essere costruito, dovrà essere armonizzato al meglio con l'edificio che lo ospita oppure si potrà optare per la progettazione di un edificio ad hoc, al limite destinato solo a questo uso. Le scelte che riguardano la disposizione interna degli armadi e la struttura del sistema di alimentazione sono molto importanti ma non si deve trascurare anche il cablaggio e l'impianto di illuminazione.

Il sistema di raffreddamento assorbe in media un terzo dei consumi totali, per questo deve essere progettato e gestito razionalmente; può essere *ad hoc* o integrato negli impianti dell'edificio e una grossa influenza sull'efficienza la hanno anche la distribuzione, la gestione dei flussi d'aria e la scelta della temperatura di *set point*. Sempre in tema di raffreddamento il *free-cooling*, permette di sfruttare condizioni esterne favorevoli per raffreddare o pre-raffreddare con bassissimi consumi; è una soluzione molto efficiente, utilizzata negli impianti moderni ma che può essere introdotta anche in molti impianti esistenti con limitate modifiche e tempi di ritorno molto interessanti.

La virtualizzazione infine, benché possa essere considerata una scelta *software*, influenza le scelte delle macchine e la loro disposizione; è un sistema che permette di distribuire e gestire meglio i carichi e può portare elevati benefici in termini di efficienza, permettendo di spostare su un'unica macchina il lavoro di più macchine separate e spesso poco utilizzate.

La parte finale dello studio ha riguardato la gestione del sistema, aspetto fondamentale per mantenere e in alcuni casi aumentare il livello di affidabilità, prestazioni ed efficienza. Vengono toccati il sovradimensionamento che può affliggere gli impianti, la pratica del consolidamento sia dal punto di vista gestionale che per l'ammodernamento del parco macchine, e i software di controllo e registrazione dei parametri di funzionamento del sistema.

Realizzare e gestire un centro di calcolo efficiente richiede un intervento sinergico di diverse figure, dal Direttore generale fino al gestore della sala calcolo e al manutentore delle apparecchiature e una visione completa e generale di tutte le variabili.

Dallo studio eseguito e riportato nel rapporto "Uso razionale dell'energia nei centri di calcolo" (disponibile sul sito ENEA) deriva un secondo documento, "Linee guida per la progettazione di datacenter ad alta efficienza", finalizzato alla progettazione di centri di calcolo siti all'interno di altre strutture (è la situazione più comune) o di appositi data center dedicati. In entrambi i casi è importante valutare correttamente i flussi di energia interni, elettrici e termici.

I tre fattori principali da tenere in considerazione nella progettazione di un data center sono:

- l'affidabilità, caratteristica che viene garantita dalla ridondanza delle apparecchiature;
- la scalabilità, aspetto assicurato dall'uso di componenti modulari, in grado di permettere l'adattamento a situazioni che possono mutare nel tempo e di evitare inutili sovradimensionamenti;
- la scelta di macchine e strumentazioni ad alta efficienza.

Tali caratteristiche devono essere prese in considerazione nella selezione di tutti i componenti, che si tratti di IT Equipment, di componenti della catena di alimentazione, o di parti dell'impianto di condizionamento.

B. Sviluppo di metodologie per la valutazione semplificata dei risparmi energetici in applicazioni tecnologiche innovative/efficienti nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica

In collaborazione con i soggetti che operano nei settori dell'energia e dell'efficienza energetica, già coinvolti nelle attività di cui al precedente obiettivo A (istituti universitari e Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia) e sulla base degli studi di approfondimento (ma non solo) eseguiti con essi, sono state sviluppate metodologie per la definizione di indicatori di prestazione energetica in applicazioni tecnologiche nei settori industriali e terziario a supporto all'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica (certificati bianchi), anche sulla base di un confronto con le più significative esperienze internazionali disponibili.

A monte della predisposizione di schede semplificate di valutazione dei risparmi energetici, obiettivo ultimo dell'attività, sono stati svolti approfondimenti sulle principali esperienze di meccanismi di *cap and trade* rivolti alla promozione dell'efficienza energetica a livello internazionale, con individuazione di eventuali soluzioni adatte al contesto italiano in grado di migliorare l'efficacia del sistema dei titoli di efficienza energetica, nonché sull'evoluzione del meccanismo anche attraverso il coinvolgimento degli *energy manager* e la diffusione di soluzioni inedite di valutazione dei risparmi.

Tali studi sono stati eseguiti con la FIRE che si è avvalsa delle proprie competenze, anche attivando le reti dei soci e degli *energy manager*, oltreché le associazioni di categoria e gli operatori di riferimento, al fine di assicurare il miglior raccordo fra i dati desumibili dalla letteratura, quelli illustrati nelle buone pratiche raccolte e le esperienze di *energy manager* e operatori di settore.

In particolare, per quanto riguarda la situazione internazionale di meccanismi analoghi a quello italiano dei Certificati Bianchi è stato definito il seguente quadro.

In alcuni paesi la liberalizzazione sta già raggiungendo i risultati sperati, riuscendo a portare l'attenzione sul risparmio energetico da parte dei fornitori di energia che considerano l'approvvigionamento di energia essenziale per la loro attività; ma nella maggior parte dei mercati europei i clienti finali sono ancora cauti e le aspettative al momento sono che la domanda di servizi energetici diventerà significativa solo dopo la totale liberalizzazione del mercato. Per il momento, il livello di apertura del mercato non ha ancora raggiunto il massimo delle sue totali potenzialità. Lo scopo di adottare un meccanismo come quello dei certificati bianchi, è quello di creare un mercato per degli investimenti in efficienza energetica che altrimenti non si svilupperebbero, data la loro bassa convenienza economica contingente.

L'Unione Europea ha cominciato a spingere sull'efficienza energetica a partire dal 2005, con la direttiva europea sull'efficienza energetica negli usi finali e sui servizi energetici, che introduce e definisce i certificati bianchi come "certificati emessi da enti certificatori indipendenti che attestano i risparmi energetici degli attori del mercato come conseguenza di misure di miglioramento dell'efficienza energetica"⁵. Essi sono una possibile strada da percorrere a livello comunitario per avere dei risultati di efficienza attraverso la creazione di un mercato.

310

⁵ Direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici.

Il meccanismo dei certificati bianchi ha trovato applicazione in diversi Paesi Membri dell'Unione come una delle alternative più diffuse per l'incentivazione dell'efficienza energetica, sostenuta dalla Commissione Europea nella vasta legislazione prodotta negli ultimi anni.

In Gran Bretagna è stato adottato il primo esempio di tale schema già nel 2002, seguito dall'esperienza belga (nella regione delle Fiandre), italiana e francese. Il meccanismo che viene proposto è quasi sempre lo stesso: un obbligo di risparmi annuali viene definito a livello nazionale e ripartito in capo a diversi soggetti, obbligati a produrre e a presentare anno per anno un certo quantitativo di risparmi. La tipologia di "soggetto obbligato" varia a seconda dello schema adottato dallo stato; ciascuno dei paesi ha dato una propria definizione di tali individui. I progetti di risparmio possono essere sostenuti e proposti dai medesimi soggetti obbligati, come nel caso dello schema inglese, oppure in altri casi sostenuti da società di servizi energetici, come nello schema italiano. I certificati bianchi, che come dice il nome stesso, devono andare a certificare l'entità dei risparmi conseguiti, e possono essere acquistati dai soggetti obbligati, per adempiere l'obbligo imposto per legge, che non possano o vogliano agire direttamente. Ogni paese dunque deve per prima cosa definire una categoria di soggetti obbligati (la domanda), e un certo target di risparmi e di certificati bianchi che ogni anno vorrà raggiungere (l'offerta), e suddividere tale somma tra i soggetti obbligati; in un secondo momento, si deve delineare lo share di obbligo che ciascuno di essi deve rispettare anno per anno.

Altri paesi europei, oltre a quelli sopra citati, stanno considerando la possibilità di introdurre il meccanismo in un prossimo futuro, adattandolo ciascuno alle proprie specifiche nazionali. Lo studio fornisce una visione di quello che è lo stato dell'arte dell'incentivazione dell'efficienza energetica in alcuni paesi dell'Unione, attraverso la descrizione dei singoli sistemi così come sono stati adottati in Gran Bretagna, Francia e nella Regione delle Fiandre in Belgio, cercando alla fine di delineare un quadro il più possibile completo della situazione attuale.

Il confronto tra i diversi sistemi analizzati è stato cosa non facile, date le varie differenze dell'organizzazione del meccanismo, della ripartizione degli obblighi tra diverse parti del mercato energetico a seconda del tipo di schema adottato in ciascun paese. Lo stesso vale per il confronto sull'efficacia dal punto di vista dei risultati; anche se si può con certezza essere d'accordo che sul primo periodo di incentivazione i risultati di risparmio energetico che ci si era prefissati sono stati non solo raggiunti ma addirittura superati. Per quanto riguarda i costi del sistema, in Gran Bretagna il governo aveva fornito una valutazione ex ante dell'intero meccanismo, che nel 2008 si è rivelato ben al di sotto - di circa il 20% - di tale previsione; bisogna aggiungere che sempre secondo dati risalenti al 2008, era stato stimato che a fronte di un investimento pari a 0,9 miliardi di euro, era stato generato un beneficio economico pari a 3 miliardi di euro. Per quanto riguarda il sistema francese e quello della regione belga delle Fiandre, i dati riguardanti il primo periodo di incentivazione da poco conclusosi hanno fatto registrare che i costi dell'energia risparmiata risultano essere inferiori dei costi dell'energia altrimenti fornita: è quindi risultato essere un meccanismo *cost-effective*. Dai dati che sono stati presentati si evince dunque che quanto meno nei meccanismi adottati dai tre paesi dell'Unione presi in considerazione, ci sia stato un rapporto costi/benefici decisamente buono, tenendo presente i risultati alla fine raggiunti e gli investimenti effettuati.

Considerando l'aspetto tecnico degli interventi fino ad oggi effettuati, non si può non sottolineare il fatto che sono stati preponderanti interventi basici di efficienza energetica negli edifici residenziali. In tutti e tre i paesi presi in considerazione, sebbene i sistemi emersi siano diversi in termini di liberalizzazione/concentrazione del mercato, è stata la creazione di una regolamentazione nazionale che ha permesso in ciascun paese la diffusione di interventi di efficienza nel mercato energetico. La creazione dell'obbligo ha avuto lo scopo di aumentare e diffondere il livello degli investimenti in misure di efficienza cost effective, e bisogna ammettere dai numeri e dall'entità degli investimenti e dei risultati emersi che il meccanismo ha avuto successo. Si è già affermato come ciascun paese dell'Unione nel recepire la direttiva comunitaria sull'efficienza energetica negli usi finali e sui servizi energetici abbia avuto la libertà di applicare o meno il meccanismo dei certificati bianchi come mezzo per arrivare a raggiungere degli obiettivi annuali di risparmi. Nel caso di paesi con uno schema di certificati bianchi esistente e funzionante (Italia e Danimarca, per fare altri due nomi), ciascun paese ha adottato a suo modo il sistema di incentivazione che sembrava essere più adattabile alla propria situazione nazionale; adesso ormai sarebbe impossibile cercare di uniformare ed unificare i meccanismi esistenti per creare un mercato comune, anche se la Commissione ha espresso più volte tale volontà. Ma data l'impossibilità per l'Unione di poter contare su di un sistema unico di certificati bianchi a livello europeo che permetta lo scambio di certificati tra i diversi stati membri che hanno adottato tale meccanismo di incentivazione, almeno sul breve periodo, si è deciso di rimandare ogni possibile dibattito al futuro.

Per quanto riguarda l'analisi del quadro evolutivo del meccanismo, è stato predisposto, con il coinvolgimento della rete degli energy manager, un documento che, sulla base delle osservazioni raccolte da alcuni operatori del mercato dei TEE e sintetizzate dalla FIRE, fornisce spunti per l'aggiornamento del meccanismo stesso. Il documento analizza principalmente la situazione di domanda/offerta dei TEE alla luce dei più recenti dati forniti da AEEG, GME, ecc., gli effetti del meccanismo sul più ampio mercato dell'efficienza energetica e, in particolare, il

fenomeno di incentivazione selettiva solo di alcune tecnologie, il ruolo delle istituzioni coinvolte, e come migliorarlo. Tra le indicazioni suggerite per la possibile modifica del meccanismo, si riportano le seguenti:

• Miglioramento dell'efficacia della promozione degli interventi

Si tratta di un concetto teoricamente accettabile, ma in grado di creare notevoli problemi in fase attuativa, a causa delle difficoltà di valutazione e della riduzione dei risparmi rispetto a quelli effettivi. La ragione principale delle complicazioni in fase di definizione risiedono nella scarsità di dati di mercato e nella mancanza di attitudine in tal senso da parte delle associazioni di categoria. Tanto che spesso è difficile reperire dati sulle vendite complessive e risulta impossibile ottenere informazioni precise circa la classificazione del venduto in funzione del rendimento. Il premio legato all'accesso ai certificati è del resto troppo basso per giustificare uno sforzo da parte delle associazioni stesse.

La riduzione dei risparmi riconosciuti rispetto a quelli effettivi valutati con riferimento alla situazione exante, d'altra parte, ha il duplice effetto di rendere inefficace il meccanismo con alcuni interventi – in quanto a capacità di promuovere la realizzazione degli stessi – e di rendere difficile la valutazione dei risparmi di efficienza energetica sul fronte statistico e del rispetto dei programmi europei.

Per finire l'addizionalità non tiene conto della possibilità di stimolare la sostituzione anticipata dei componenti.

Modificare il criterio di riconoscimento dei risparmi introdurrebbe d'altra parte una discontinuità importante nel meccanismo, con distorsioni rispetto agli interventi già realizzati.

Una possibile soluzione potrebbe essere rappresentata dal mantenimento dei criteri attuali, resi però più semplici da attuare attraverso la destinazione di una parte delle risorse raccolte grazie agli oneri tariffari al finanziamento della raccolta di dati statistici, aspetto che avrebbe ricadute positive sul fronte della politica energetica. Per ovviare al problema dello scarso incentivo, si potrebbero introdurre dei coefficienti moltiplicativi dei risparmi, da far valere per un massimo di due-tre anni, utili per promuovere efficacemente interventi dall'addizionalità non elevata, ma dal forte potenziale di sostituzione anticipata.

Lo strumento dell'incremento degli anni di riconoscimento dell'incentivo si può invece usare per quegli interventi che presentano comunque una buona addizionalità.

Schede e progetti a consuntivo

Il 2010 ha segnato una ripresa dell'emanazione di schede semplificate, per cui risulta importante continuare su questa via. Si segnala l'opportunità di una maggiore collaborazione fra le Istituzioni per ridurre sovrapposizioni e ottimizzare le tempistiche.

In aggiunta si ritiene utile iniziare a pubblicare linee guida per le proposte a consuntivo, al fine di semplificare la presentazione degli interventi complessi e di quelli industriali, spesso poco adatti alle schede semplificate. Una tale previsione è già in via di realizzazione da parte dell'ENEA.

Statistiche

Il fatto che tutti i progetti vengano presentati attraverso la piattaforma informatica dell'Autorità rende fattibile una presentazione in tempo reale dei dati su:

- i titoli emessi nell'anno e quelli complessivi (GME);
- i titoli annullati (GME);
- i titoli richiesti all'Autorità e ancora in fase di verifica, distinti per scheda con l'aggiunta di una categoria per quelli a consuntivo (AEEG).

Questo consentirebbe agli operatori di regolarsi meglio sui potenziali andamenti dei prezzi e delle quantità disponibili.

Infine, per quanto riguarda lo sviluppo di metodologie per la valutazione semplificata dei risparmi energetici in applicazioni tecnologiche innovative/efficienti nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica, attraverso la fattiva collaborazione con le reti degli *energy manager*, oltre che il coinvolgimento degli operatori del mercato (lato produttori di tecnologie) e le relative associazioni di categoria, si è predisposto un documento che raccoglie le valutazioni sui dati di mercato e sui risparmi conseguibili, propedeutiche allo sviluppo di quattro schede semplificate.

L'esigenza di sviluppare nuove metodologie semplificate di quantificazione dei risparmi energetici derivanti da interventi nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica deriva principalmente dall'esigenza di incrementare il numero di schede semplificate a disposizione dei proponenti; tale tipologia di schede risulta essere premiante ai fini del raggiungimento degli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico previsti, non

obbligando i proponenti alla predisposizione di programmi di misura, costosi sia in termini di componenti/ strumenti di misura, sia in termini di competenze e risorse da dedicare.

Infatti il meccanismo, che premia i risparmi conseguiti negli usi finali attraverso l'attribuzione (per 5 anni, nella maggior parte dei casi) di un numero di titoli di efficienza energetica pari alle tonnellate equivalenti di petrolio (tep) di energia primaria risparmiata annualmente, prevede il riconoscimento del risparmio energetico attraverso due metodi: uno a consuntivo, che richiede complessi progetti e relativi programmi di monitoraggio, e il secondo, attraverso schede semplificate che attribuiscono risparmi energetici specifici alle "unità fisiche di riferimento" installate.

La presenza o meno di una scheda semplificata (nella cui definizione rientrano sia le *analitiche*, sia le *standardizzate*) implica la possibilità o meno di partecipare al meccanismo per tecnologie delle quali è necessario un numero elevato di unità per raggiungere qualche decina di tep annui di risparmio.

A metà 2010 le schede semplificate pubblicate dall'AEEG sono 26, considerando le schede divise in più parti, e riescono a coprire un numero limitato di tecnologie. Gli attuali obiettivi previsti dal meccanismo dei TEE e quelli ancora più ambiziosi che si prospettano con il futuro potenziamento del meccanismo per adeguarsi agli impegni assunti a livello europeo, rendono necessaria la presenza di un numero molto maggiore di schede semplificate. Per avere un ordine di grandezza, il simile ma ben più giovane meccanismo francese dei CEE (certificats d'économie d'énergie) conta oltre 200 schede.

Le quattro schede semplificate predisposte sono le seguenti:

- Proposta di scheda tecnica per la valutazione dei risparmi ottenibili con l'applicazione della norma UNI EN 15232 negli edifici;
- Proposta di scheda tecnica per l'istallazione di gruppi statici di continuità ad alta efficienza;
- Proposta di scheda tecnica per l'installazione di dispositivi a biomasse per uso domestico;
- Proposta di scheda tecnica per l'installazione di dispositivi a led per pubblica illuminazione.

Il dettaglio delle schede è disponibile nel rapporto "Metodologie per la definizione di risparmi energetici, nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica, attraverso metodologie semplificai" disponibile sul sito ENEA.

C. Monitoraggio ed analisi prestazionale di un impianto di micro-cogenerazione; sviluppo di un modello di cogeneratore con motore a combustione interna

L'attività relativa alla seconda annualità prevede lo sviluppo, in ambiente Simulink, di algoritmi matematici descrittivi il funzionamento in regime dinamico di un motore a combustione interna in assetto cogenerativo (CHP), seguendo i modelli e le relazioni proposte dall'IEA nell'Annex 42: The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems.

La struttura del modello, oggetto dell'attività di ricerca, permette l'integrazione nella piattaforma di simulazione del sistema edificio-impianto ODESSE (sviluppata da ENEA) tramite un'interfaccia utente semplificata, in modo che il cittadino possa effettuare una stima accurata dell'effettivo vantaggio nell'utilizzo della tecnologia cogenerativa nel confronto con le tecnologie tradizionali.

L'attività prevede inoltre la validazione del modello matematico tramite dati reali acquisiti da installazioni in servizio e già monitorate, o utilizzando misure storiche effettuate su impianti precedentemente monitorati, anche presenti in letteratura, aventi caratteristiche simili al modello implementato. Il modello è stato testato simulando diversi assetti in condizioni reali di funzionamento, valutando i principali indici energetici ed economici dell'impianto in servizio durante la stagione di riscaldamento.

Il modello matematico sviluppato consente la previsione della performance energetica ed economica per un intero anno di utilizzo del cogeneratore, quando lo si impieghi per inseguire un carico elettrico o termico, sia se definito dall'utente (pre caricato), sia se generato dal modello dell'edificio progettato in ODESSE.

In particolare, si è realizzato un modello di simulazione "user friendly", utilizzabile con semplicità dalla maggior parte degli utenti tecnici che normalmente si trovano a dover far fronte al calcolo delle performance energetiche ed economiche di un impianto di cogenerazione.

La progettualità del software consente infatti di inserire un set minimo di dati, tipicamente dati di targa dei cogeneratori in commercio facilmente reperibili dai costruttori, con i quali è possibile ottenere, con buona approssimazione, una stima dei risparmi energetici e della redditività dell'impianto, su un periodo temporale di utilizzo impostabile dall'utente.

o Sviluppo dei modello matematico

In Figura 244 è riportato il modello a blocchi implementato in Simulink del motore a combustione interna in assetto cogenerativo.

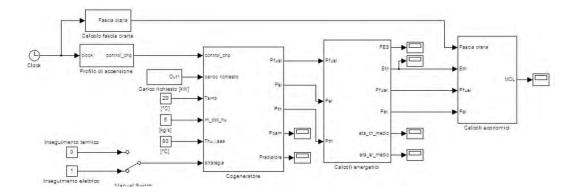


Figura 244. Modello in Simulink del cogeneratore con motore a combustione interna

Come si evince dall'immagine, il modello è strutturato in diversi blocchi:

- cogeneratore;
- selettore del funzionamento inseguimento elettrico / termico;
- definizione del profilo di accensione;
- definizione del carico richiesto;
- calcolo della fascia oraria;
- calcoli energetici;
- calcoli economici.

Le condizioni di carico del cogeneratore dipendono dalla scelta iniziale, fatta dall'utente, sul tipo di funzionamento:

- inseguimento carico elettrico;
- inseguimento carico termico;
- funzionamento a potenza nominale con diagramma di accensione orario giornaliero prestabilito.

o Struttura, input e output

Il blocco cogeneratore è strutturato come mostrato nella seguente Figura 245.

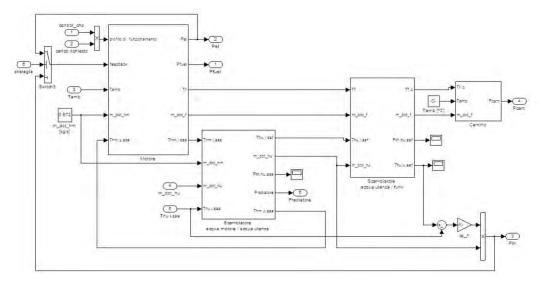


Figura 245. Struttura modello cogeneratore in Simulink

Esso prevede i seguenti input e output:

Input	Output
 Profilo di accensione; Profilo di carico dell'utenza; Strategia di funzionamento (inseguimento elettrico / termico); Portata acqua utenza termica; Temperatura ritorno acqua utenza termica (ingresso scambiatore acqua/acqua); Stato di funzionamento (acceso – spento). 	 Potenza termica del combustibile consumato; Potenza elettrica erogata; Potenza termica recuperata da acqua motore; Potenza termica recuperata dai fumi; Potenza termica dispersa al radiatore; Potenza termica dispersa al camino; Temperatura acqua motore in ingresso / uscita scambiatore acqua/acqua; Temperatura acqua utenza in uscita dallo scambiatore acqua/acqua; Temperatura acqua utenza in uscita dallo scambiatore acqua/fumi; Emissioni di CO2: media oraria (kg/h) e quantità totali (kg); Rendimento elettrico – medio orario; Rendimento termico – medio; Ore totali di funzionamento

Parametri di funzionamento

I principali parametri selezionabili dall'utente relativi al dimensionamento del cogeneratore e alle modalità di esercizio sono di seguito elencati:

- Potenza elettrica nominale (massima potenza elettrica erogata);
- Rendimento elettrico nominale;
- Perdite di calore verso l'esterno non altrimenti conteggiate (% della potenza termica del combustibile in ingresso);
- Potere calorifico inferiore del gas di alimentazione;
- Temperatura massima dell'acqua di raffreddamento motore;
- Portata acqua di raffreddamento del motore;
- Efficienza di scambio termico degli scambiatori di calore acqua/acqua e fumi/acqua;

I suddetti parametri vengono inseriti in apposite maschere cui si accede dai blocchi Cogeneratore, Scambiatore acqua/acqua e Scambiatore acqua/fumi. A titolo di esempio si riporta in Figura 246 la maschera di inserimento dati relativa al cogeneratore.

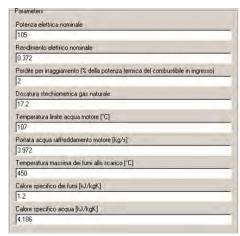


Figura 246. Parametri di configurazione del cogeneratore

Modalità di controllo

Le modalità attraverso le quali avviene il controllo del sistema sono:

- impianto acceso a potenza costante funzionante tra il valore massimo e il valore minimo;
- inseguimento carico elettrico;
- inseguimento carico termico;
- controllo sulla temperatura dell'acqua motore di ritorno dallo scambiatore: allo scopo di implementare un esempio di sistema di controllo atto a simulare il reale funzionamento del cogeneratore, è stato aggiunto un semplice sistema di termostatizzazione che si basa sul controllo della temperatura dell'acqua motore di ritorno dallo scambiatore acqua/acqua, e che simula l'attivazione di un radiatore atto alla limitazione di tale temperatura; il valore limite è impostabile come parametro dall'utente;
- controllo sulla potenza minima erogata: quando la richiesta dell'utenza è inferiore al 30% della potenza nominale del motore, sia in inseguimento elettrico che termico, il cogeneratore si spegne.

Motore e generatore elettrico

La Figura 247 mostra il blocco motore e generatore elettrico, deputato alla produzione della potenza elettrica. Questo blocco prevede gli input e output riportati di seguito.

Input	Output
 Profilo di funzionamento (prodotto del profilo di accensione per il carico utenza); Feedback del segnale di controllo; Temperatura ambiente; Portata acqua di refrigerazione del motore; Temperatura acqua di refrigerazione (uscita scambiatore acqua/acqua) 	 Potenza termica del combustibile consumato; Potenza elettrica erogata ai morsetti del generatore elettrico; Temperatura dei fumi allo scarico; Portata aria comburente, portata del combustibile e portata fumi; Emissioni di CO2 (media oraria e kg totali)

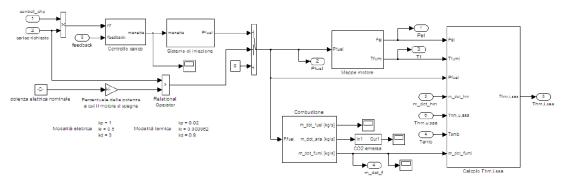


Figura 247. Blocco motore e generatore elettrico: blocchi Simulink

Controllo carico

Il blocco del modello deputato al controllo del carico è mostrato in Figura 348. È stato implementato un controllore PID (proporzionale - integrativo - derivativo). È necessario sottolineare che poiché il controllo opera sulla stessa variabile, ovvero la potenza richiesta, che può però essere sia elettrica che termica, e poiché sulla parte termica sono stati implementati dei ritardi di risposta, assenti invece sulla parte elettrica, si rende indispensabile variare le costanti di configurazione del PID (Kp, Ki, Kd) a seconda che si voglia operare in modalità inseguimento elettrico, o inseguimento termico.

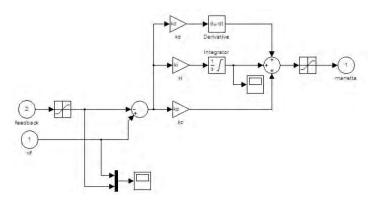


Figura 248. Blocco Simulink: controllore del carico elettrico-termico

Mappa motore

Il modello richiede le mappe sperimentali del motore che si intende simulare. In particolare, sono necessarie:

- mappa della potenza elettrica erogata in funzione della potenza termica del combustibile;
- mappa della temperatura fumi allo scarico in funzione della potenza termica del combustibile.

Usualmente, i produttori forniscono le mappe del rendimento elettrico in funzione della potenza elettrica. Tale mappa è facilmente riconvertibile nel formato richiesto dividendo la potenza elettrica fornita per il relativo rendimento elettrico; si calcola in tal modo la potenza termica del combustibile, che può essere inserita nell'apposita *look-up table*, in funzione della potenza elettrica. Il medesimo approccio vale anche per la curva relativa alla temperatura dei fumi allo scarico.

Entrambe le mappe sono state adimensionalizzate (Figura 249), in modo da rendere il modello sufficientemente flessibile a descrivere il funzionamento di diversi cogeneratori di piccola taglia. La mappa della potenza elettrica è adimensionalizzata rispetto alla potenza elettrica e potenza termica del combustibile nominali, mentre la mappa della temperatura dei fumi è adimensionalizzata rispetto alla temperatura massima dei fumi allo scarico (parametro inseribile dall'utente), e alla potenza termica del combustibile nominale.

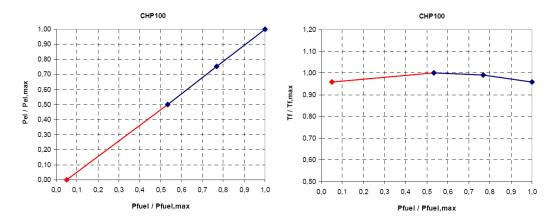


Figura 249. Mappe di potenza elettrica e temperatura dei fumi in funzione della potenza termica del combustibile

Entrambe le mappe vengono inserite nel blocco Simulink riportato di seguito:

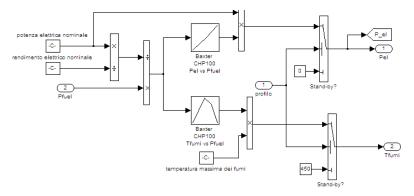


Figura 250. Blocco Simulink per il calcolo della potenza elettrica del motore e la temperatura fumi

o Calcolo della temperatura acqua di refrigerazione in uscita dal motore

Dal bilancio energetico sul blocco motore, viene calcolata la temperatura dell'acqua di refrigerazione all'uscita del motore, cioè all'ingresso dello scambiatore acqua/acqua.

Il procedimento adottato è il seguente:

- nota la potenza elettrica erogata e il rendimento dell'alternatore si calcola la potenza meccanica all'albero motore;
- note portata e temperatura dei fumi, e temperatura ambiente, si calcola la potenza termica nei fumi;
- nota la potenza termica introdotta con il combustibile, si calcola la potenza termica dispersa;
- dal bilancio energetico sul sottosistema motore si calcola la potenza termica all'acqua motore;
- nota la portata d'acqua di refrigerazione del motore, e la sua temperatura di ritorno al motore, se ne calcola la temperatura in uscita dal motore stesso.
- Sistema di recupero termico e sua architettura

Il recupero della potenza termica prodotta dal cogeneratore è stato modellato con tre blocchi funzionali distinti:

- motore a combustione interna stechiometrico;
- scambiatore acqua motore / acqua utenza;
- scambiatore fumi motore / acqua utenza.

Lo schema funzionale dell'architettura del sistema di recupero termico è riportato di seguito:

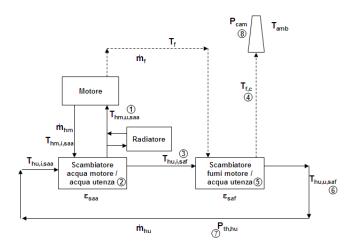


Figura 251. architettura funzionale sistema di recupero termico del cogeneratore

o Carico dell'utenza, profilo di accensione e definizione della potenza erogata e del consumo di combustibile

Il profilo orario dei carichi elettrico e termico dell'utenza servita dal cogeneratore è un input al modello matematico, fornito tramite una mappa ricavabile da file *Excel* impostabile dall'utente, o direttamente dal modello dell'edificio simulato nella piattaforma ODESSE.

Il tempo di simulazione (minuti) viene convertito in ore in modo da poter leggere, nella mappa, lo stato di funzionamento del cogeneratore. In tale blocco vengono anche calcolate le ore totali di funzionamento del cogeneratore, impiegate per la valorizzazione del costo di manutenzione dello stesso.

Per quanto concerne il calcolo della potenza erogata dal cogeneratore, noti il carico dell'utenza e il profilo di accensione del cogeneratore, si ha che:

 quando il cogeneratore è su ON (Stato 1), esso è in grado di erogare la potenza elettrica (o termica) richiesta dall'utenza, con limite superiore pari alla potenza elettrica nominale (e alla relativa potenza termica) della macchina. La potenza del combustibile viene calcolata tramite la mappa del motore, in modo tale da ottenere il carico desiderato;

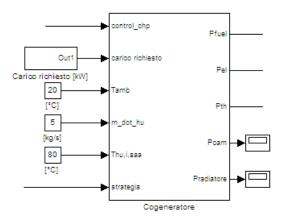


Figura 252. Modello cogeneratore con in input il profilo elettrico e termico dell'utenza

- quando il cogeneratore è su OFF (Stato 0), la potenza elettrica (o termica) e la potenza termica del combustibile sono pari a zero.
- o Calcolo della fascia oraria

La struttura del mercato elettrico italiano è organizzata in fasce orarie: essa prevede cioè che l'energia elettrica abbia un costo maggiore quando maggiore è la sua richiesta, ovvero in fascia F1 (nei giorni feriali dalle 8.00 alle 18.59). Esiste poi una fascia intermedia, denominata F2, nei giorni feriali dalle 7.00 alle 7.59 e dalle 19.00 alle 22.59, e il sabato dalle 7.00 alle 22.59. Le rimanenti ore della settimana, e i giorni festivi, ricadono nella fascia più economica, la F3.

Tali indicazioni provengono dalla Delibera n. 181/06 pubblicata sul sito www.autorita.energia.it in data 4 agosto 2006, GU n. 211 del 11 settembre 2006: Aggiornamento delle fasce orarie con decorrenza 1 gennaio 2007.

All'interno del modello è stata pertanto inserita una mappa, ricavabile da file *Excel*, dalla quale viene letta per ogni ora dell'anno, la fascia elettrica corrispondente. L'indicazione della fascia oraria è impiegata nei calcoli economici per la valorizzazione dell'energia elettrica prodotta dal cogeneratore.

Calcoli energetici

Il blocco di calcolo deputato all'analisi energetica dell'impianto contempla i seguenti input e output.

Input:

- Potenza termica del combustibile in ingresso [kW];
- Potenza termica recuperata dal cogeneratore [kW];
- Potenza elettrica generata [kW].

Output:

- Energia elettrica totale recuperata nel periodo considerato [kWh];
- Energia termica totale recuperata nel periodo considerato [kWh];
- Rendimento elettrico del cogeneratore;
- Rendimento termico del cogeneratore;
- Primary Energy Savings (PES).
- o Calcoli economici

L'analisi economica dell'esercizio del cogeneratore è stata implementata per mezzo del metodo dei flussi di cassa annuali. Tali flussi sono calcolati conoscendo i ricavi, e i costi. Il blocco deputato alla valutazione della redditività economica dell'esercizio dell'impianto si compone pertanto di tre sottosistemi:

- Calcolo dei ricavi [€];
- Calcolo delle spese, suddiviso in:
 - calcolo dei costi variabili [€] (costo del combustibile; costo di manutenzione)
 - calcolo dei costi fissi [€](costi di gestione e conduzione dell'impianto; costi amministrativi; imprevisti e contingenze, assunti pari al 5% del totale costi, escludendo i costi per l'acquisto del combustibile).

Gli input/output del blocco sono i seguenti:

Input:

- Potenza termica del combustibile in ingresso al cogeneratore [kW];
- Potenza termica complessiva recuperata dal cogeneratore [kW];
- Potenza elettrica prodotta [kW].

Output:

 Margine Operativo Lordo d'esercizio (MOL) realizzato dall'impianto, nel periodo di tempo selezionato nella simulazione.

I risultati qui sopra sintetizzati, sono meglio dettagliati nel rapporto "Microcogenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di motori a combustione interna: sviluppo di un modello matematico per la simulazione oraria e analisi di un caso reale " disponibile sul sito ENEA.

D. Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di supercondensatori a sistemi di movimentazione (carroponte) ed approfondimento teorico-sperimentale dell'utilizzo dell'accumulo in altri settori di applicazione

Nel corso delle attività della prima annualità dell'AdP, relative a questa particolare tecnologia d'accumulo, è stato riprodotto in ENEA un carro ponte da 20 kW, alimentato dalla rete e completato da un banco di supercondensatori, quale intervento rappresentativo delle applicazioni dei sistemi di accumulo elettrico basati su questa tecnologia. L'impianto realizzato è una parte reale (l'azionamento completo) di un vero carroponte e, collegato ad un freno motore, consente di eseguire sperimentazioni estremamente aderenti alla realtà operativa dell'oggetto, anche per la scala di potenza scelta che ne permette l'estensione ad oggetti di taglia maggiore.

Le attività della seconda annualità sono state quindi di due tipologie:

- 1. di approfondimento teorico-sperimentale dei temi trattati nella prima annualità, anche al fine di ampliare ad altri settori l'applicazione dell'accumulo elettrico. In particolare, si è inteso focalizzare l'attività:
 - sull'ottimizzazione delle scelte tecnologiche e del dimensionamento delle diverse parti dell'impianto in funzione dei diversi diagrammi di carico e dell'eventuale presenza contemporanea di utenze diverse, anche attraverso lo sviluppo di un software di simulazione in Simulink della singola utenza;

- sulla validazione di modelli di sistemi di accumulo a supercondensatori in applicazioni idonee a conseguire il *peak shaving* in utenze caratterizzate da assorbimenti impulsivi di potenza intervallati da periodi a basso prelievo o in applicazioni di *Power Quality*.
- di sperimentazione e diffusione dei risultati della ricerca applicata le tecnologie oggetto di studio nel primo anno.

in seguito a problemi insorti con il partner industriale prescelto per la sperimentazione in una fase molto avanzata del progetto, parte delle attività di cui al punto 2) sono state spostate in ENEA, con l'effettuazione in loco di una sperimentazione finalizzata alla valutazione della validità della tecnologia proposta dal punto di vista dei risparmi energetici conseguibili.

Per l'attività, l'ENEA si è avvalsa dell'impegno coordinato di tre gruppi universitari:

- il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli "Federico II" (di seguito UniNA);
- il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano (di seguito PoliMI);
- il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università Roma Tre (di seguito UniRM3).

Viene di seguito riportata la descrizione delle attività svolte e dei relativi risultati per le due tipologie rientranti nel presente obiettivo.

o Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di supercondensatori a sistemi di movimentazione (carroponte)

Le attività svolte sono state le seguenti:

- Individuazione dell'utilizzatore finale, Thyssen, e delle società in grado di fornire apparecchiature ed equipaggiamenti (Elettronica Santerno per i convertitori e DIMAC per i supercondensatori) e di realizzare l'impianto (SiderPiombino);
- 2. Dimensionamento del sistema da installare presso lo stabilimento Thyssen e stesura del progetto esecutivo, con emissione delle specifiche d'ordine e la definizione dei costi di realizzazione;
- 3. Stesura degli accordi di collaborazione con Thyssen per l'esecuzione dei lavori e la gestione in sicurezza della sperimentazione.
- 4. A seguito della impossibilità di addivenire ad un accordo con Thyssen per l'installazione del predetto sistema in tempi compatibili con la chiusura delle attività entro la data di scadenza del progetto, si sono avviati i passi successivi con l'adattamento all'impianto presente in Casaccia e per effettuare nel Centro di Ricerca ENEA la sperimentazione prevista presso l'acciaieria. In particolare si è reso necessario un ampliamento delle capacità del sistema di acquisizione dati del laboratorio ENEA, ideazione ed esecuzione di una serie di cicli-test per la quantificazione dei vantaggi ottenibili con l'adozione dei supercondensatori, valutazione dei risultati;
- 5. Studio relativo allo scenario italiano con la redazione di un questionario sulle caratteristiche ed impiego dei carroponti industriali ed individuazione delle società interessate, distribuzione dello stesso ed elaborazione dei risultati ottenuti.
- Approfondimento teorico-sperimentale dell'utilizzo dell'accumulo in altri settori di applicazione"
 - 1. Sperimentazione comparata di moduli di supercondensatori e batterie litio ione, per consentire una migliore individuazione dei rispettivi campi di applicazione.
 - Sono stati analizzati in termini di prestazioni i risultati sperimentali eseguiti su due dispositivi di accumulo commercialmente disponibili: supercondensatori (SC) e batterie al litio-polimero ad alta potenza. Questi dispositivi sono spesso oggetto di comparazione; lo scopo di questo studio è esplorare le loro performance e fornire una guida per la scelta del giusto dispositivo in funzione dell'applicazione. I risultati sono espressi principalmente in termini di efficienza in funzione del relativo tempo di carica e scarica. Si nota in particolare che le batterie al litio-polimero ad alta potenza sono una valida soluzione per applicazioni che richiedono alte densità di energia e dove i picchi di potenza possono essere erogati senza l'ausilio di sistemi di accumulo addizionali; il loro limite risiede nel limitato numero dei cicli di vita. I supercondensatori, a differenza, mostrano elevate densità di potenza con un numero di cicli di vita due ordini di grandezza maggiori rispetto le batterie al litio. Il loro limite risiede nella densità di energia che è due ordini di grandezza inferiori rispetto alle batterie al litio.

Ulteriori analisi sono state condotte per verificare prestazioni ed efficienza delle batterie al litio-polimero ad alta potenza in cicli ad alta potenza di carica e scarica molto vicini a quelli tipici dei supercondensatori. Per maggiori dettagli, si rimanda al rapporto redatto dal Politecnico di Milano disponibile in rete.

- 2. Modellistica degli accumuli elettrici, con sperimentazione in ENEA di moduli di supercondensatori di taglia industriale (64F/125V)
 - E' stata sviluppata un'analisi modellistica che, attraverso una procedura di ottimizzazione, porta alla stima delle caratteristiche di un semplice schema elettrico equivalente in grado di simulare efficacemente il componente. Il modello di supercondensatore preso in esame per l'attività è stato sviluppato presso il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano.
 - Il modello, costituito da 3 rami paralleli, ha la peculiarità di rappresentare il comportamento dinamico del dispositivo nell'ampio *range* di frequenza che spazia dalla continua sino a 1kHz. Per la identificazione dei parametri del modello ci si è avvalsi di prove eseguite in ENEA su di un modulo Maxwell BMOD0063 di capacità 63F e tensione a vuoto 125V, sottoposto a prove di carica e scarica rapida, limitando la corrente massima di prova a quella consentita dal costruttore per applicazioni continuative (150 A). La procedura seguita è stata il più possibile aderente alla "Specification of Test Procedures for Supercapacitors in Electric Vehicle Application" elaborata dall'EUCAR Traction Battery Working Group (BMW, DaimlerChrysler, FIAT, Opel, PSA, Renault, Volkswagen, Volvo). Nrl rapporto completo sono riportate sinteticamente le caratteristiche della catena di misura allestita e le principali misure effettuate, nonché i principali dettagli del modello utilizzato e della procedura di calibrazione dello stesso.
- 3. Messa a punto su piattaforma *Matlab/Simulink* di un modello dell'impianto di sollevamento/sistema di alimentazione con recupero energetico, implementazione e sperimentazione in ENEA delle strategie di controllo così sviluppate.
 - Il prototipo di carro ponte è stato simulato considerando il motore controllato secondo la tecnica del controllo diretto di coppia e l'inverter di alimentazione regolato secondo la tecnica SVM. Le grandezze di macchina sono quelle vere dell'azionamento esaminato, mentre per velocizzare il lavoro computazionale del calcolatore si è inizialmente scelto un profilo di missione di durata inferiore. Sono state individuate e quindi eseguite le prove più idonee da effettuare su tali sistemi di accumulo per determinare i parametri da introdurre nel modello. Il modello così definito consentirà quindi, in associazione con gli algoritmi per la valutazione economica dell'investimento, sviluppati nel corso delle attività del primo anno, valutazioni più precise sulle possibilità di applicazione di questa tecnologia, e sarà di supporto per la progettazione/ sviluppo degli impianti stessi.

Per maggiori dettagli si rimanda nel rapporto tecnico dell'Università di Roma Tre.

- 4. Realizzazione di un *tool* di progettazione per il dimensionamento su basi statistiche di un sistema di accumulo a supercondensatori
 - E' stata definita una formalizzazione di tipo probabilistico del problema del dimensionamento di sistemi di accumulo associati a numerosi azionamenti con frenatura a recupero energetico. Gli azionamenti sono identici e funzionano contemporaneamente in modo indipendente. Analizziamo in particolare il caso in cui l'energia scambiata da ciascun azionamento segue ripetutamente un ciclo fissato, ma in modo sfasato casualmente rispetto agli altri azionamenti, cosicché l'energia recuperata accumulabile in un ciclo diviene una variabile aleatoria. La conoscenza della distribuzione di probabilità di quest'ultima consente di impostare l'ottimizzazione dell'accumulo come un problema di minimizzazione di una opportuna funzione di costo atteso.

Per maggiori dettagli si rimanda nel rapporto tecnico del Politecnico di Milano.

E. Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di batterie a sistemi di trasporto a fune (funivia)

Le attività del primo anno si erano concluse con l'acquisto di un sistema di accumulo (una batteria al litio completa di tecnologia avanzata), di caratteristiche tali da poter essere utilizzato come sistema pilota per effettuare una campagna di sperimentazione in laboratorio. Nel secondo anno, la scelta iniziale di installazione del sistema di accumulo in un impianto a fune del tipo funivia è stata modificata, avendo individuato la possibilità di spostare la sperimentazione su una tipologia analoga di impianto a fune del tipo però funicolare. Quest'applicazione è adibita, nel caso specifico, al trasporto persone in ambito urbano per l'intero anno e presenta quindi un maggiore interesse sperimentale per la valutazione del sistema di accumulo e dei vantaggi energetici ad esso collegati, rispetto alla funivia che prevedeva un uso prevalentemente stagionale. All'inizio del secondo anno è stata completata la campagna di sperimentazione sulla batteria acquisita per comprendere la sua utilizzabilità nella nuova applicazione. In base ai risultati di tale sperimentazione, integrati dalle indagini sperimentali sulla funicolare selezionate, è stato eseguito il dimensionamento definitivo del sistema di accumulo anche in base alla scelta del fornitore in grado di soddisfare le caratteristiche tecniche, economiche ed operative del sistema prescelto. Il

sistema è stato quindi acquistato ed è ora in fase di test presso il laboratorio di prova batterie del Centro Ricerche ENEA Casaccia, in previsione della prossima installazione e collaudo presso l'utenza finale, identificata nell'impianto funicolare di Bergamo – S. Virgilio, messo a disposizione dalla società ATB (Azienda Trasporti Bergamo), che gestisce il trasporto urbano nella città di Bergamo e che ha intrapreso da tempo un percorso volto a massimizzare l'impiego di fonti di energia a basso impatto ambientale e a favorire la riduzione dell'utilizzo dell'auto privata.

La prevista campagna sperimentale sull'impianto dimostrativo troverà la sua piena esecuzione nel corso della prossima annualità dell'Accordo di Programma, in quanto la funicolare non è stata disponibile, a causa di interventi di manutenzione, programmati per motivi di sicurezza, .

Entrando più nel dettaglio delle attività svolte e dei relativi risultati ottenuti nel corso del secondo anno dell'Accordo di Programma, è necessario collegarsi a quanto svolto in precedenza. Infatti, le attività dell'anno precedente si erano concluse con l'acquisto di un sistema batterie completo, costituito dalla connessione in serie di 74 celle agli ioni di litio da 3,7 V nominali – 12 Ah ciascuna, di marca Kokam, e relativo sistema elettronico "battery management system" (BMS) di monitoraggio, gestione e controllo, fornito dalla ditta italiana fornitrice della batteria. La tipologia delle celle al litio, "high power – large capacity", garantiva al sistema di possedere le caratteristiche peculiari richieste dall'applicazione su impianti a fune e quindi ne faceva un ottimo banco di prova per effettuare una sperimentazione di laboratorio, sulla base della quale effettuare il dimensionamento definitivo ed emettere le specifiche per l'acquisto. Lo stesso sistema, replicato in più unità connesse in serie per raggiungere il livello di tensione richiesto dall'applicazione, poteva essere un candidato per l'installazione presso l'impianto di destinazione finale (Figura 253).



Figura 253. Il sistema batterie usato come "pilota"

L'inizio delle attività di laboratorio ha richiesto una lunga fase di messa a punto del sistema elettronico BMS,

costituito da una serie di schede elettroniche TX (una per ogni pacchetto di 6 celle) che vengono utilizzate per trasmettere via radio ad una unità centrale RX le tensioni e le temperature delle singole celle. L'unità centrale RX gestisce tali dati e attiva gli allarmi predisposti quando si è in prossimità del raggiungimento delle condizioni limite di tensione e/o temperatura per una qualunque delle celle, garantendo in tal modo condizioni di esercizio in sicurezza. Nel nostro caso, il primo problema esaminato, e poi risolto mediante modifiche successive all'acquisto e alla fornitura di alcuni componenti aggiuntivi appositamente richiesti, è stato quello di consentire all'unità centrale RX di dialogare con le attrezzature sperimentali ENEA (ciclatori, Figura 254) utilizzate per l'esecuzione delle prove al banco, di gestire in sicurezza, per gli utilizzatori e la stessa batteria, la prova interrompendola o



Figura 254. Dispositivi impiegati per le prove sul sistema "pilota": camera climatica (sinistra), ciclatore (destra), sistema di acquisizione dati (centro)

passando a condizioni di funzionamento meno impegnative in prossimità del raggiungimento delle condizioni limite di sicurezza.

Un altro problema tecnico affrontato è stato quello relativo al sistema di trasmissione wireless, che si è dimostrato facilmente vulnerabile, dando luogo spesso a situazioni di assenza di trasmissione, che rendevano impossibile il controllo del sistema e quindi l'esecuzione dei test. Si è resa necessaria quindi un'attività di miglioramento della trasmissione, anch'essa attuata mediante interventi in loco e presso il fornitore. La successiva campagna di prove ha messo in evidenza una riduzione della capacità del sistema batterie rispetto a quella dichiarata dal costruttore per le singole celle, a causa di fenomeni di disequalizzazione, cioè di dispersione dei valori di tensione delle singole celle (Figura 255), rispetto al valore nominale.

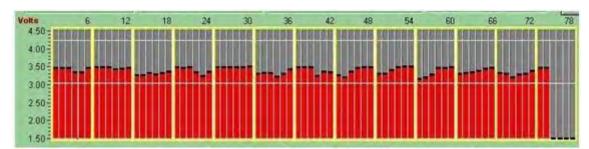


Figura 255. Dispersione dei valori di tensione delle singole celle

Tali fenomeni possono essere contrastati, e quindi le prestazioni del sistema batterie ottimizzate, se il sistema elettronico di controllo e gestione svolge, oltre alle funzioni di monitoraggio e protezione, anche quella di bilanciamento. Nel caso del nostro sistema pilota, quest'ultima funzione non viene eseguita, per cui la disequalizzazione è stata particolarmente evidente. Nel dimensionamento definitivo che ne è conseguito, è stata pertanto richiesta la presenza di un sistema di controllo e gestione con funzione di equalizzazione. Gli esiti dei test, uniti agli affinamenti dei calcoli, hanno inoltre suggerito un incremento di capacità per garantire una maggiore vita delle batterie. Alla luce di quanto emerso dalle prove e dall'affinamento dei calcoli, sono state emesse le specifiche definitive del sistema d'accumulo.

Tali specifiche sono state sottoposte a verifica da parte dell'Università di Pisa, Dipartimento di Sistemi Elettrici ed Automazione, che ha parallelamente condotto studi sulla potenza reattiva e conseguentemente eseguito il dimensionamento preliminare di un banco capacitivo, facente parte anch'esso del sistema d'accumulo. Il banco capacitivo installato all'interno del quadro elettrico dell'impianto e, mediante un'azione di rifasamento e filtraggio delle armoniche di corrente, consente di attenuare le distorsioni indotte sulla rete di distribuzione dall'azionamento nel suo insieme: l'impianto così risulta più funzionale e meglio integrato con la rete elettrica secondo le logiche di "smart grid".

La funicolare di Bergamo "Colle Aperto – San Virgilio" (Figura 256) della società ATB, unisce Bergamo bassa a Bergamo alta. Presenta una corsa di circa 620 metri e un dislivello di circa 90 m fra le due stazioni di partenza e di arrivo, senza stazioni intermedie. La linea è percorsa da una sola vettura, collegata ad una fune traente ad anello. Ogni corsa dura circa 2 minuti e mezzo, quindi in circa 6 minuti è possibile completare un intero ciclo di andata-ritorno.

La situazione attuale prevede una fornitura trifase in bassa tensione (400 V) con un picco di potenza richiesta di circa 220 kW. La tensione alternata trifase viene quindi trasformata in tensione continua tramite un doppio ponte raddrizzatore a



Figura 256. Funicolare di Bergamo "Colle Aperto - San Vigilio"

tiristori, mediante il quale si alimenta il circuito di armatura del motore elettrico di trazione. Tale motore è un motore in corrente continua tradizionale (Pn = 160 kW, Vn = 400 V), il cui albero risulta accoppiato mediate un riduttore di giri all'albero lento della puleggia che movimenta la fune di trazione. Il carico meccanico è costituito prevalentemente dall'unica carrozza facente parte della funicolare, che presenta una massa a vuoto di 7 tonnellate, e a pieno carico di circa 11 tonnellate. La massa a pieno carico risulta da considerazioni relative al numero massimo di persone che la carrozza è in grado di portare (55) e da un peso medio stimato per persona pari a 75 kg. Per il dimensionamento dell'intero sistema sono determinanti le prestazioni dinamiche richieste alla

funicolare stessa, in particolare il profilo di velocità. Dal grafico si è ricavato il valore dell'accelerazione che è pari a 0,4 m/s².

Dal profilo di velocità e dal profilo di progetto della potenza a pieno carico (Figura 257) è stato possibile stimare la pendenza puntuale del percorso. Conoscere il profilo del percorso è determinante in quanto, una volta nota la

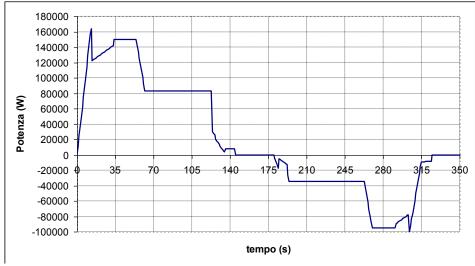


Figura 257. Profilo della potenza meccanica alle ruote a pieno carico

pendenza dello stesso, è possibile costruire un semplice modello fisico del sistema (massa su piano inclinato a pendenza variabile), dal quale ricavare i profili di potenza a carico intermedio e a vuoto. Tali andamenti risultano importanti da conoscere, in quanto, nella stima finale delle prestazioni del sistema di accumulo, è necessario tenere conto del fatto che molte corse vengono effettuate con pochi passeggeri, ed alcune (per esempio le prime della mattina e le ultime della sera) praticamente a vuoto.

Nella settimana dal 12 al 18 luglio 2010 sono stati misurati gli assorbimenti reali di potenza attiva e reattiva della funicolare in oggetto. In particolare nel seguito sono riportati i dati relativi ad una finestra temporale di 12 ore misurati dalle 12:00 alle 24:00 di sabato 17 luglio 2010. Nella Figura 258 è riportato l'assorbimento di potenza attiva nell'intera finestra temporale di 12 ore. In tale figura è possibile rendersi conto della frequenza delle corse (circa 4 l'ora in media) e del valore medio dei picchi di potenza sia durante le accelerazioni che durante le frenate. E' inoltre evidente come con un tale diagramma di assorbimento un sistema di accumulo sia una soluzione ottimale dal punto di vista sia economico sia tecnologico.

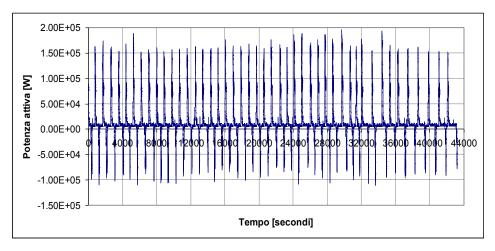


Figura 258. Andamento della potenza attiva misurata su 12 ore

La Figura 259 riporta lo stesso diagramma su una sola ora, fra le 20 e le 21.

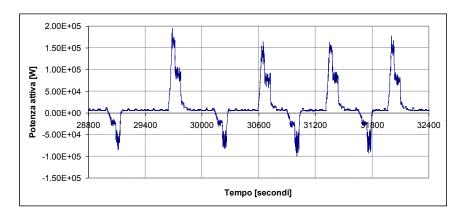


Figura 259. Andamento della potenza attiva misurata su una finestra oraria

Il primo assorbimento raffigurato in Figura 259 è stato considerato come una corsa a pieno carico, e il suo picco di assorbimento è molto vicino a 200 kW, come già stimato in sede preliminare.

Nella fase successiva si è proceduto all'acquisto del sistema batterie: la maggiore difficoltà è stata quella di trovare un fornitore in grado di garantire che l'unità elettronica di controllo e gestione fosse affidabile e rispondente alle specifiche (vedi soprattutto la funzione di equalizzazione). Il sistema acquistato è costituito dalla serie di 5 moduli standard da 86,4 V nominali – 40 Ah, ciascuno ottenuto mediante la connessione in serie di 24 unità da 3,65 V nominali – 40 Ah, ogni singola unità essendo costituita dall'accoppiamento in parallelo di 2 celle da 3,65 V nominali – 20 Ah. Il sistema complessivo è quindi composto dalla connessione serie-parallelo di 240 celle da 20 Ah – 3,65 V nominali agli ioni di litio (Figura 260). L'elettronica di controllo è costituita da 5 schede slave, una per ogni modulo, ed un'unità *master*.



Figura 260. Sistema batterie

Sul sistema batterie, fornito dalla Micro-Vett, sono state eseguite quindi le verifiche di accettazione ed alcuni test preliminari.

La società E.E.I. S.r.I. (Equipaggiamenti Elettronici Industriali) ha dato corso ai lavori di realizzazione del convertitore e di installazione unitamente a quella del sistema batterie.

F. Valutazione dell'impatto dell'utilizzo delle batterie al litio nelle applicazioni stazionarie

L'indagine sullo stato dell'arte delle batterie al litio ha anche comportato una verifica sulla situazione di sviluppo ed applicativa di altri sistemi di accumulo, già utilizzati o proposti nelle reti elettriche. Le caratteristiche principali di un sistema di accumulo riguardano essenzialmente le proprietà proprie di accumulo e quelle operative, e sono: densità di energia e di potenza, efficienza energetica in carica e scarica, autoscarica, tempi di carica e scarica, comportamento in diverse condizioni di stato di carica, vita utile (in anni e cicli), tempi di realizzazione, affidabilità, materiali utilizzati, costo e sicurezza nell'uso, nella realizzazione e nell'eventuale smaltimento. L'importanza delle caratteristiche sopra indicate è fortemente condizionata dall'applicazione e dal metodo di accumulo. Queste caratteristiche diventano criteri di valutazione in fase di progettazione e scelta del sistema di accumulo, che prevalentemente mirano a favorire gli aspetti economici ed anche ambientali del sistema individuato.

Attualmente, nelle reti elettriche, si utilizzano con diverse possibili funzioni diverse tipologie di accumulo: pompaggio d'acqua in bacini di accumulo di elevate dimensioni, aria compressa in serbatoi naturali (CAES - compressed air energy storage), volani (fly wheel), magneti superconduttori (SMES - superconducting magnets energy storage), accumulatori elettrochimici (vari tipi di batterie: sodiozolfo; NaNiCl₂-ZEBRA; ZrBr; Piombo-Acido), accumulo di energia termica, supercondensatori. La Figura 261 riassume alcune caratteristiche peculiari dei principali sistemi di accumulo attualmente utilizzati o studiati, che sono meglio dettagliate nella Tabella 63.

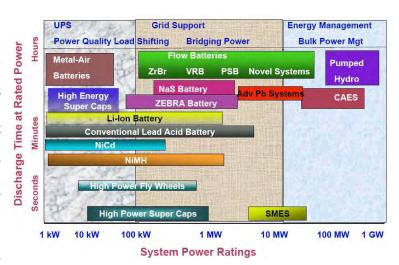


Figura 261. Caratteristiche di diversi sistemi di accumulo (Fonte EPRI, 2008)

Tabella 63. Confronto di diversi sistemi di accumulo per applicazioni in reti elettriche

Accumulo	Potenza	Durata della scarica	Efficienza (%)	Vita utile, anni	Total Capital Cost (USD/kW)
CAES (100–300 MW, Underground)	15–400 MW	2–24 h	54 (EffNG=1) 76 (EffNG=0.54) 88 (EffNG=0.39)	35	600–750
Pompaggio acqua	250 MW >1 GW	12 h	87	30	2700–3300 Upgrade:300
Li lone	5 MW	15 min a diverse h	90 (CC)	15	4000–5000
Piombo acido	3–20 MW	10 min a diverse h	75–80 (CC) 70–75 (CA) 4– 8		1740–2580
NaS	35 MW	8 h	80-85 (CC)	15	1850-2150
VRB Flow Cell	4 MW	4–8 h	75–80 (CC) 63–68 (CA)	10	7000–8200
ZnBr Flow Cell	Flow Cell 40–100 kW, 2 MW 2–4 h		75–80 (CC) 60–70 (CA)	20	5100–5600
Volani ad alta potenza	750– 1650 kW	15 s a 15 min	93	20	3695–4313
ZEBRA	<10 MW	Fino a 8 h	80–85 (CC)	Oltre 1500 cicli	1500–2000
Fe/Cr Flow Battery	<10 MW	2–4 h	50–65	20	200–2500
Zn/Air	20 kW- 10 MW	3–4 h	40–60	Alcune centinaia di cicli	3000–5000
SMES	1–3 MW	1–3 s	90	>30,000 cicli	380–490
SMES di grande taglia	100 MW- 200 MW	100 s (MWh) 0.5–1h (100MWh) 5–10 hr (GWh)	90	>30,000 ciclic	700–2000
Supercondensatori	10 MW	Fino a 30 s	90	>500,000 cicli	1500–2500

 $NG = gas\ naturale;\ CC = corrente\ continua;\ CA = corrente\ alternata$

Le prospettive di mercato dei sistemi di accumulo stanno rapidamente crescendo con l'evoluzione tecnologica del sistema elettrico, che mira, tra l'altro, ad aggiungere maggiore "intelligenza" (con le smart grids and la generazione distribuita) ed ad aumentare considerevolmente il contributo delle fonti rinnovabili nei prossimi anni. In realtà, però, la diversificazione dei sistemi di accumulo nelle reti elettriche è un processo ancora lento in cui finora è prevalente il ruolo svolto dai sistemi di pompaggio e marginale quello degli altri metodi di accumulo, come risulta dalla Figura 262, che riassume l'evoluzione mondiale dei sistemi di accumulo fino al 2007.

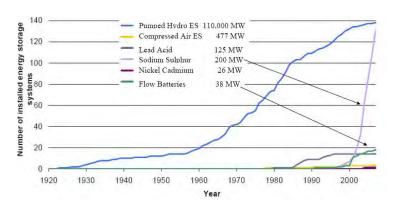


Figura 262. Evoluzione mondiale dei sistemi di accumulo fino al 2007 (Fonte: Fraunhofer Institute)

L'accumulatore al litio è l'ultima e più promettente generazione di accumulatori per le applicazioni più diverse. Le batterie al litio utilizzano una varietà di materiali elettrodici ed elettrolitici, dando vita ad un elevato numero di coppie elettrochimiche, e conseguentemente ad una classe di prodotti "al litio", oggi commercialmente disponibili od in fase di avanzata ricerca e sviluppo. Tra le batterie ricaricabili, quelle al litio hanno, con esclusione forse delle metallo-aria, le prestazioni potenzialmente più interessanti. La Figura 263 riassume la molteplicità di materiali che possono essere utilizzati nelle batterie al litio.

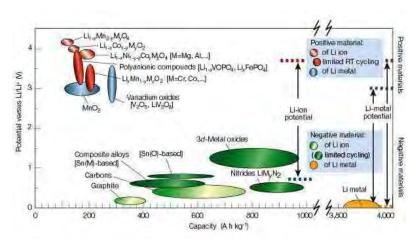


Figura 263. Possibili materiali per diverse batterie al litio (Fonte Nature, 2001)

Le batterie al litio ricaricabili si possono grossolanamente suddividere in batterie al litio metallico e litio-ioni (polimeriche e non).

Nella prima tipologia, l'anodo è litio metallico, mentre l'elettrolita può essere sia liquido che solido, come materiali ceramici, vetrosi o polimerici. Questa soluzione presenta notevoli vantaggi in termini di bassa resistenza interna, elevata capacità e conseguentemente elevate potenze ed energie specifiche, ma, per l'estrema reattività del litio metallico, ha posto alcuni limiti di sicurezza che hanno reso arduo il cammino commerciale di questo prodotto.

Nella seconda tipologia, detta appunto litio-ione (a volte anche polimerica), vengono usati materiali elettrodici ad intercalazione, che possono accumulare e rilasciare elevate quantità di litio in maniera reversibile. L'anodo ha prestazioni inferiori a quelle del litio metallico, ma essendo meno reattivo, offre maggiore stabilità e sicurezza in

La scelta dei materiali anodici e catodici e dell'elettrolita determina la tensione di lavoro e ha effetto sull'energia specifica della singola cella: la maggiore parte delle celle a litio superano facilmente i 3 V di tensione a vuoto.

Attualmente l'indagine svolta ha confermato che i sistemi al litio più promettenti, in parte commercializzati o prossimi all'industrializzazione, sono quelli riportati in Tabella 64. Questi sistemi sono studiati e sviluppati principalmente per applicazioni all'elettronica di consumo ed alla trazione elettrica con ingenti investimenti pubblici e privati. Pertanto le batterie al litio rispetto ad altri tipi di batterie ed anche rispetto ad altri sistemi di accumulo presentano un importante vantaggio che li rende in qualche modo preferibili ai sistemi di accumulo alternativi: la disponibilità e realistica certezza di vari campi di applicazione con ampi mercati collegati, che ne possono quindi garantire un continuo sviluppo e miglioramenti sia in termini tecnici che economici in quanto si possono realizzare ampie economie di scala produttiva.

Tabella 64. Caratteristiche di alcune batterie al litio-ione prevalentemente per applicazioni veicolari

Sistema	NCA Grafite	LFP Grafite	MS TiO	MNS TiO	MN Grafite
Elettrodi Positivo Negativo	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} Grafite	LiFePO₄ Grafite	LiMn ₂ O ₄ Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LiMn _{1.5} Ni _{0.5} O ₄ Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	Li _{1.2} Mn _{0.6} Ni _{0.2} O ₂ Grafite
Capacità, mAh/g Positivo Negativo	155 290	162 290	100 170	130 170	275 290
Tensione, V a 50% SOC	3,6	3,35	2,52	3,14	3,9
Sicurezza	Discreta	Buona	Eccellente	Eccellente	Eccellente
Potenziale vita	Buono	Buono	Eccellente	Sconosciuto	Sconosciuto
Costo	Moderato	Moderato	Basso	Moderato	Moderato
Stato dell'arte	Scala pilota	Scala pilota	Sviluppo	Ricerca	Ricerca

NCA = Nichel-Cobalto, Alluminio; LFP = Litio Ferro Fosfato; MNS = Manganese Spinello; MN = Manganese ossido

La molteplicità di soluzioni costruttive dei sistemi al litio offre una notevole flessibilità di scelta, giacché i sistemi di accumulo realizzati con queste batterie possono svolgere funzioni estremamente diversificate e specializzate. Ci sono, per esempio, batterie al litio che possiedono una potenza specifica (potenza per unità di peso, come quelle con ossido di titanio nel materiale anodico, in Tabella 63) molto elevata che può essere utilizzata per far fronte ad applicazioni in cui è necessario fornire elevate quantità di energia in tempi molto brevi, mentre, di contro, ci sono batterie al litio con elevata energia specifica che sono in grado di fornire l'energia accumulata in tempi lunghi, non compatibili con prestazioni di potenza. L'indagine ha, quindi, reso evidente, che la batteria al litio ha prestazioni e costi variabili con i materiali prescelti e che, come non esiste un sistema di accumulo ideale per tutte le applicazioni alle reti elettriche, altrettanto si può dire per le batterie al litio che necessitano ancora di attività di ricerca, sviluppo e industrializzazione per valutare le effettive potenzialità in sistemi di taglie molto più elevate, non ancora sviluppate ed ancora in fase di limitati progetti dimostrativi sperimentali.

L'indagine e l'analisi svolte hanno anche riguardato le effettive applicazioni alle reti elettriche con batterie al litio ed a possibili fornitori di celle e moduli per l'avvio di una preliminare campagna sperimentale da svolgersi in laboratorio per verificare in condizioni simulate la compatibilità tecnica delle prestazioni misurate con quelle previste ed avere un primo confronto economico, seppur non ancora basato su taglie e produzioni in scala significativa.

In questo momento, a livello nazionale le batterie al litio sono proposte in alcune sperimentazioni all'interno della Ricerca di Sistema, su taglie abbastanza limitate. Sono, inoltre, svolte alcune attività di caratterizzazione di laboratorio in alcuni progetti dimostrativi negli Stati Uniti, promossi dal DOE (Department of Energy) e EPRI (Electric Power Research Institute), insieme ad alcune aziende elettriche locali. A livello applicativo, sono stati realizzati alcuni impianti di grande taglia (fino a circa 10 MW) con batterie convenzionali (al piombo-acido) ed innovative (sodio-zolfo, zinco-bromo), ma l'uso delle batterie al litio è ancora limitato. Un impianto dimostrativo è stato realizzato dall'AEP (American Electric Power) da 2 MW con lo scopo di regolare la frequenza, mentre altri impianti dimostrativi sono in fase di realizzazione. La scelta del tipo di batteria al litio è varia e le attività dimostrative su sistemi di grandi dimensioni sono appunto finalizzate alla valutazione tecnica ed economica della tecnologia. Fino al 2007, la società canadese AVESTOR, successivamente acquistata dalla francese Bollorè per sviluppare batterie per veicoli elettrici, ha prodotto batterie al litio metallico per applicazioni stazionarie, prevalentemente per sistemi di telecomunicazioni, con capacità intorno ai 3 kWh per sistemi completi.

Le batterie al litio sono ormai un prodotto commerciale per le applicazioni all'elettronica di consumo (sistemi portatili come, ad esempio, telefoni cellulari, notebook, videocamere digitali e così via), mentre è ormai prossima l'estesa utilizzazione nei veicoli a trazione elettrica. Pertanto l'offerta commerciale e prototipale di queste batterie è estesa a numerosi costruttori europei, americani e asiatici (qualche esempio: Johnson Controls-Saft, Batscap, LITEC, Gaia-Lithium Tech, Enerdel, LGChem, CPI, A123, Boston Power, Valence Technologies, Kokam, Thundersky, BYD, ALEEES, EIG, Panasonic-Sanyo, Toshiba, Yuasa ecc.). Per le applicazioni diverse dall'elettronica di consumo, sono offerte sul mercato batterie Li-ione non ancora oggetto di produzioni di massa e quindi a costi abbastanza elevati, con energia specifica fino a circa 185 Wh/kg e potenze specifiche fino a qualche kW (in funzione delle condizioni di scarica). La vita ciclica, in funzione delle profondità di scarica considerata, varia da 1000-2000 cicli (per scariche complete fino al 100% della capacità nominale) fino ad alcune decine o centinaia di migliaia di cicli (per scariche poco profonde di qualche percento della capacità totale).

L'indagine ha anche evidenziato quali sono le sfide scientifiche e tecnologiche attuali per il pieno sviluppo e la diffusione di tali batterie a tutti i settori potenzialmente interessati. In aggiunta è risultato abbastanza evidente dalle esperienze e conoscenze attuali, che le batterie a base di litio presentano problemi di sicurezza nelle fasi di fabbricazione, uso e riciclaggio. Nelle applicazioni è quindi necessario utilizzare dispositivi elettronici, non ancora pienamente sviluppati, di gestione e controllo di ogni singola cella (o piccoli gruppi fino ai moduli), insieme ad un sistema di controllo termico per garantire il mantenimento delle condizioni ottimali di funzionamento (solitamente un determinato intervallo di temperatura) delle singole celle nelle diverse condizioni operative, anche estreme. Questi problemi sono ancora non ben esplorati nel caso in cui si tratta di produrre ed assemblare sistemi di grandi dimensioni, che sono quelli che potranno utilizzarsi nelle reti elettriche.

Per meglio comprendere i requisiti tecnici ed economici ed i limiti di applicabilità delle batterie al litio nelle reti elettriche, è stato poi effettuata un'analisi comparativa delle diverse funzioni che questi sistemi possono svolgere, anche in impianti con fonti rinnovabili. Infatti, negli ultimi anni si è assistito, a livello mondiale, ad un rinnovato sforzo volto allo sviluppo ed incremento delle energie rinnovabili, fattore che ha portato alla necessità di sviluppo delle tecnologie e delle strategie di utilizzo degli accumuli, vista la disponibilità aleatoria di molte di tali fonti. La presenza di sistemi di accumulo espressamente progettati per fare fronte alla natura non programmabile del contributo di molte delle energie rinnovabili sarà indispensabile per la corretta gestione dell'intero sistema elettrico. Infatti, se le nuove forme di generazione di energia (eolico, solare, ecc.) non saranno dispacciabili, nascerà l'esigenza di una maggiore modulazione, basata su un criterio del tipo "just-in-time", sia di altre forme di generazione, sia della domanda. In questo quadro, il contributo che può venire dai sistemi di accumulo è l'introduzione di un'importante forma di flessibilità, che si estrinseca nella possibilità di disaccoppiare temporalmente e spazialmente una quota dei diagrammi di generazione e carico.

Spostando l'ottica sul singolo operatore di produzione e/o consumo, da un punto di vista prettamente economico i sistemi di accumulo possono permettere di immagazzinare energia prodotta a basso costo (o acquistabile a basso prezzo) al momento non necessaria, per recuperarla in seguito evitando forme più onerose di acquisto o di produzione.

Per esempio, a livello domestico, una famiglia potrebbe, tramite un impianto fotovoltaico o una microturbina eolica energeticamente dimensionati, fare fronte ai consumi domestici annui, accumulare in alcune ore l'energia momentaneamente prodotta in esubero, anziché doverla poi comprare in seguito al momento del bisogno.

In generale la decisione di fattibilità può dipendere da fattori economici o da fattori quali i miglioramenti di prestazioni del sistema, la sostenibilità ambientale. A titolo esemplificativo è riportata di seguito la Tabella 65 contenente una semplice classificazione delle taglie e delle possibili applicazioni dei sistemi di accumulo.

Tabella 65. Possibile classificazione di taglie e funzioni dei sistemi di accumulo

Settore	Taglia	Applicazione		
Domestico	0,5-10 kW	Ottimizzazione dell'auto-produzione, alimentazione anche in caso di distacco da rete.		
Commercio e piccola industria	5-500 kW	Integrazione dell'auto-produzione, peak-shaving, possibile semplice commercio dell'energia		
Commercio e industria	0,5-5MW	Pianificazione delle tariffe, UPS, co-generazione o auto-produzione in loco.		
Utility	0,5-5MW	Differimento dell'ampliamento degli asset di distribuzione		
Grande taglia	5-50 MW	Commercio dell'energia, commercio dei servizi ausiliari		

Le possibili applicazioni dei sistemi di accumulo sono molteplici, e spesso non sono facilmente ed univocamente identificabili, in quanto una stessa funzione svolta da un sistema di accumulo può essere vista e catalogata sotto differenti aspetti, relativi ai servizi, vantaggi, benefici apportati dal sistema di accumulo in esame.

I servizi che un sistema di accumulo gestionale in grado di fornire si dividono i "Servizi di Potenza" e i "Servizi di Energia". I primi riguardano gli aspetti relativi alla potenza del sistema di accumulo, alla velocità di risposta dello stesso e ai benefici apportati dal sistema di accumulo relativamente allo scambio di potenza della rete elettrica cui è connesso. I secondi riguardano gli aspetti energetici, quindi sono intrinsecamente legati allo scambio di potenza che si protrae su intervalli di tempo maggiori rispetto ai primi. Entrambi i servizi sopra definiti sono a loro volta scomponibili, in base alle funzioni svolte e ai criteri di dimensionamento e impiego, in quattro sotto-sezioni, che risultano essere i seguenti: security; power quality; mercato; accesso (differimento degli investimenti).

SERVIZI DI POTENZA

- a) <u>Security</u>: per quanto riguarda la security del sistema elettrico, i sistemi di accumulo sono in grado di apportare significativi benefici in termini di:
 - 1) Peak shaving: il sistema di accumulo è in grado di erogare potenza per breve tempo per sopperire ad eventuali picchi di carico mantenendo più regolare l'erogazione di potenza da parte dei generatori del sistema. Questo è certamente un aspetto di security del sistema, in quanto in questo caso l'accumulo consente al sistema di funzionare correttamente. Fenomeno del tutto speculare è il valley filling, che riveste però più interesse nell'ambito dei servizi per l'energia di load levelling.
 - 2) UPS: nel caso di interruzione di breve durata un sistema di accumulo può funzionare come UPS (Uninterruptible Power System), per carichi sensibili per i quali non si può ammettere alcuna disalimentazione. E', tuttavia, da notare che, in generale, questa è una funzione di PQ. Diventa di security se l'apparecchiatura da mantenere alimentata è funzionale al sistema elettrico (es. alimentazione attuatori di manovra durante black out)
 - 3) Isola (difesa): con "isola" si intende una porzione del sistema elettrico scollegata dal resto della rete, all'interno della quale è necessario che venga mantenuto l'equilibrio fra generazione e carico. La stabilità dipende dalla capacità o meno dell'isola di raggiungere questo equilibrio in breve tempo e con la minima perdita di carico. In fase di difesa, il rischio in questo caso è che si venga a creare una porzione di rete con insufficiente capacità di generazione o con capacità di distacco di carico inadeguate in entità e modulabilità: questa situazione porterebbe ad un veloce degrado della frequenza, con il conseguente collasso del sistema. La presenza di idonei sistemi di accumulo, in grado di svolgere funzioni simili alla regolazione primaria e al load-shedding, può facilitare il mantenimento dell'equilibrio, aiutando peraltro l'isola a rientrare in parallelo con la rete principale. In un'isola venutasi a creare (intenzionalmente o meno) in fase di difesa, il mantenimento dell'equilibrio fra produzione e carico è prioritario rispetto a quello della qualità del vettore, per cui si accettano tolleranze piuttosto ampie sul valore di frequenza e si possono ritenere prevalenti gli aspetti di Security rispetto a quelli di Power Quality.
 - 4) Rampa: il servizio di rampa consiste nel fare fronte agli incrementi e decrementi rapidi di carico che non possono essere seguiti dalle unità termoelettriche. Questo servizio è molto agevole da effettuare con i sistemi di accumulo, data la loro rapidità di risposta.
 - 5) Black start: dotando di opportuni sistemi di accumulo le alimentazioni dei sistemi ausiliari delle centrali di produzione si possono avviare o i gruppi elettrogeni predisposti per il Black Start o direttamente tutti i servizi ausiliari del gruppo di produzione per permetterne l'avviamento.
- b) <u>Power Quality</u>: un sistema di accumulo ben dimensionato potrebbe migliorare la power quality intervenendo in vari modi.
 - 1) Un primo obiettivo potrebbe essere quello di contenere le interruzioni di breve durata (buchi di tensione) presenti sulla rete a causa di energizzazioni o di guasti. Ciò è possibile mediante l'uso di UPS (per i carici da questi alimentati) o mediante sistemi booster (con accumulo) inseriti in serie ai feeder alimentanti i carichi sensibili.
 - 2) Gli accumuli possono agevolare la regolazione della frequenza nei sistemi strutturalmente isolati, ovvero concepiti per funzionare separati da una grande rete; tali sistemi presentano tipicamente bassi valori di energia regolante e quindi sono esposti ad ampie variazioni di frequenza dovute a contingency o anche alla naturale evoluzione temporale del carico. In questo caso la condizione di isola elettrica è strutturale e non di emergenza, quindi oltre al già citato aspetto di security (l'accumulo aiuta la riserva rotante nel mantenimento dell'equilibrio) esiste anche quello della

- qualità del vettore, associato alla possibilità di mantenere la frequenza in una banda di oscillazione più ristretta.
- 3) Nell'ultimo decennio si è assistito al sempre più massiccio utilizzo di convertitori elettronici lato utenza, fatto che ha deteriorato il THD (tasso di distorsione armonica) presente sulla rete. Di conseguenza molti sforzi sono stati fatti nel campo del filtraggio attivo, che necessariamente ha bisogno di un sistema di accumulo, seppur minimo, per un corretto funzionamento. Questo si presenta come uno degli utilizzi più promettenti dei sistemi di accumulo in particolare nella nuova visione delle "smart grids".
- 4) Un altro modo di incrementare la power quality mediante i sistemi di accumulo può essere quello della regolazione della tensione: durante l'energizzazione di apparecchiature collocate su porte a bassa potenza (relativamente a cosa si sta energizzando), il mantenimento del modulo di V va supportato mediante una rapida e transitoria erogazione di energia (e anche di potenza, nel caso di reti MT e BT con componente resistiva non trascurabile o addirittura preponderante e questo accade prevalentemente nei sistemi di media e bassa tensione).
- 5) Un'ultima applicazione dei sistemi di accumulo potrebbe essere quella relativa al contenimento del flicker, sia di origine industriale, sia legato a fonti energetiche discontinue come quella eolica. Il flicker è un fenomeno di abbassamento della tensione di rete che si ripropone con periodicità e si traduce in una ripetuta variazione dell'intensità delle sorgenti luminose, su frequenze a cui l'occhio umano è particolarmente sensibile. Anche in questo caso, un sistema di accumulo appositamente dimensionato potrebbe aiutare a compensare il fenomeno.
- c) <u>Mercato</u>: i servizi di potenza descritti ai punti A e B (tutti, sia Security che PQ) <u>valgono molto</u> o potranno valere molto sui "mercati dei servizi ancillari". Non soltanto gli ISO (per gli aspetti di security) o i Distributori (per quelli di P.Quality) potrebbero essere interessati all'installazione in proprio degli accumuli, ma anche vari fornitori di servizi alla rete (come investimento da remunerare sui mercati).
 - 1) Riserva: un sistema di accumulo può essere utilizzato come riserva in caso di necessità. L'energia rilasciata dal dispositivo viene remunerata attraverso un opportuno mercato. In base al tempo di risposta ed alla capacità di fornire entro certi tempi la potenza nominale si distinguono due tipi di riserva differenti, la "riserva rotante" e la "riserva sostitutiva". Per gli aspetti relativi ai servizi di potenza viene presa in considerazione soltanto la riserva rotante, intesa come l'insieme di tutte quelle sorgenti di potenza, connesse alla rete e sincronizzate con essa, che aumentino immediatamente la loro produzione a seguito di un abbassamento di frequenza, e che siano in grado di raggiungere la loro piena potenza entro i 10 minuti. I sistemi di accumulo elettrochimici quali le batterie sono sicuramente molto indicati come "riserva rotante", grazie ai loro generalmente rapidissimi tempi di risposta, molto inferiori di quelli dei grandi impianti di produzione convenzionali.
 - 2) Distacco di carico: un sistema di accumulo può apportare benefici per esempio evitando i distacchi di carico. Questa opzione è abbastanza chiara nella natura insita del sistema di accumulo, cioè quella di potersi momentaneamente sostituire alla sorgente di energia. All'interno di questa particolare applicazione è possibile distinguere due tipologie molto differenti di accumuli: l'accumulo esterno, progettato ed espressamente dimensionato per evitare il distacco di carico, e l'accumulo interno, detta anche "accumulo di processo". Con il termine "accumulo di processo" si indica una quantità di energia intrinsecamente presente nel processo produttivo, e che può essere utilizzata per sostenere il processo stesso per brevi intervalli di tempo senza deterioramento delle prestazioni produttive.
- d) Accesso: la disponibilità dell'accumulo su una rete può, come precedentemente detto, "tagliare" i picchi di potenza e quindi permette di non utilizzare tutta la capacità di una linea aumentando la possibilità di connettere altri utenti evitando il raddoppio della stessa. Questa logica può essere applicata anche lato utente: l'utente può predisporre sulla sua rete interna accumuli in grado di tagliare i picchi e quindi chiedere meno potenza nell'accesso alla rete. Se l'utente è attivo l'installare un accumulo può permettere di essere meno variabile ed anche meno aleatorio migliorando l'accettabilità da parte della rete.

SERVIZI DI ENERGIA

- a) <u>Security</u>: relativamente alla security riguardante i servizi di energia, un sistema di accumulo può essere utile per:
 - 1) Load levelling: con tale termine si intende il livellamento del profilo di carico lungo un intervallo di tempo lungo, quale può essere una giornata, una settimana, un mese. Un sistema di accumulo che si ricarichi durante le ore vuote (notturne) e si scarichi durante le ore di punta (diurne) certamente

- produce un load levelling giornaliero, ma lo stesso ragionamento può essere esteso a periodi più lunghi variando i parametri di scarica e di ricarica.
- 2) Speculare è il valley filling: il carico notturno scende improvvisamente sotto il minimo tecnico dei gruppi in giri e ci sono problemi di over generation.
- b) Power Quality: per quanto riguarda la power quality dal punto di vista energetico i sistemi di accumulo possono evitare le lunghe interruzioni, aumentando di conseguenza la qualità di sistema. In questo caso non sono richieste ai sistemi di accumulo prestazioni in potenza o prontezza di risposta, bensì performance di natura energetica, e saranno queste a formare i vincoli progettuali del sistema di accumulo stesso.
- c) Mercato: la visione in energia anziché in potenza permette di evidenziare un vero vantaggio che l'accumulo potrebbe avere sul mercato (e non viceversa). L'accumulo costituisce una forma di flessibilità che può permettere un vantaggio per la domanda e l'offerta.
- d) Accesso: certamente un accumulo potrebbe favorire l'accettabilità di un carico sulla rete, permettendo di differire o addirittura eliminare gli onerosi investimenti volti ad adeguare reti deboli alla presenza di nuovi carichi impulsivi, o comunque temporanei. Un esempio può essere quello di un cantiere che necessiti di una potenza eccedente quella della linea di alimentazione disponibile. Un sistema di accumulo portatile potrebbe benissimo ricaricarsi durante le ore notturne, per poi rilasciare l'energia necessaria a coprire le esigenze di funzionamento del cantiere durante le ore diurne, permettendo al gestore di rete di evitare la ristrutturazione della linea di alimentazione insufficiente.

La valutazione dei costi di investimento di capitale (e quindi dell'esposizione finanziaria) legata alle varie tecnologie dei sistemi di accumulo è estremamente difficile, poiché dipende da numerose considerazioni estremamente variabili, quali la configurazione territoriale, vincoli o incentivi politici, taglia del sistema, area geografica, ecc. I dati che è stato possibile reperire sono i seguenti:

- 1) Accumulo elettrochimico in generale: per le batterie a flusso si hanno costi inferiori a 1000 \$/kW per sistemi dimensionati su una capacità pari ad 1 ora. I costi marginali di capitale sono pari a 250 \$/kWh addizionale, e dipendono fortemente dal fatto che l'elettrolita aggiuntivo costa molto in quanto è un preparato molto specifico. Per le batterie tradizionali sono previsti costi di installazione compresi fra i 2000 e i 4500 \$/kW per progetti con durata di scarica di 5-10 ore, con in testa le batterie NaS. D'altro canto i sistemi elettrochimici hanno un ingombro praticamente nullo se comparato al pompaggio d'acqua o al CAES, e quindi sono molto più facili da posizionare, con tutta la serie di vantaggi che questo comporta. Inoltre sono anche trasportabili al bisogno. I costi di manutenzione dovrebbero essere ridotti, nell'ordine del 1 \$/kW al minimo, ma più probabilmente fra i 2 e gli 8 \$/kW (quanti un bacino con pompaggio di acqua).
- 2) Accumulo elettrochimico con batterie agli ioni di litio: sul mercato europeo al momento si trovano batterie agli ioni di litio ad un prezzo oscillante sui 750 €/kWh, cui però va aggiunto un costo fisso del sistema BMS (battery management unit), monitoraggio e controllo dello stato da cui può derivare un limite di flussi controllati e ottenuti dall'interfaccia di potenza. Il costo di tale sistema non varia apprezzabilmente con la dimensione, e quindi può essere trascurabile per sistemi di grossa energia, mentre può essere anche dello stesso ordine di grandezza del costo del sistema di accumulo per impianti di energia ridotta. Per esempio, un sistema da 20 kWh costa circa 15000 € di batterie e circa altrettanti di BMS.

È stata poi fatta una valutazione di massima dei vantaggi associati all'uso di un sistema di accumulo in batterie in un impianto eolico.

I dati raccolti e le valutazioni fatte sulle potenziali applicazioni e sulle possibili funzioni da svolgere da parte dei sistemi di accumulo sono i dati di partenza per una valutazione delle possibilità applicative e dei limiti tecnologici delle batterie al litio.

Per verificare anche sperimentalmente le reali prestazioni delle attuali batterie al litio e più compiutamente analizzare i limiti operativi in relazione alle applicazioni individuate, è stata progettata ed acquisita una nuova postazione di prova con valenza duplice: assistere la ricerca di nuove celle a litio in un intervallo di prestazioni molto ampio su più canali con l'aggiunta di funzionalità prevalentemente elettrochimiche (come la possibilità di fare misure di impedenza); permettere la caratterizzazione di prodotti commerciali o pre-serie industriali in taglie significative (moduli fino a 60-70 V con correnti fino ad oltre 300 A).

Le specifiche tecniche di un ciclatore multicanale sono state chiaramente definite con lo scopo si poter provare celle, moduli e batterie complete di elettronica di gestione e controllo per la fornitura di un ciclatore multiplo per batterie e/o moduli. Tale ciclatore deve essere dotato di 8 canali indipendenti (ciascuno capace di testare singole celle o moduli di batterie negli intervalli 0-80 Volt e 0-50 Ampere) in grado di essere connessi in parallelo al fine di poter sostenere una corrente pari a 400 Ampere. Sono stati contattati ed incontrati diversi fornitori nazionali, europei ed americani: PEC, BITRODE, Digatron, MACCOR ed altri. È stata preparata un'offerta dettagliata ed è stata effettuata una gara per la selezione del sistema più adeguato, con la selezione del sistema proposto dalla americana MACCOR.

In parallelo, sono stati contattati diversi produttori e fornitori di celle e batterie al litio, per poter disporre di alcuni



Figura 264. Celle al litio EIG da 20 Ah per prove di laboratorio

sistemi di caratterizzare sperimentalmente in laboratorio. Oltre alle celle Kokam (celle litio-ione polimeriche da 3,7 V e 12 Ah di capacità), acquistate e caratterizzate per la dimostrazione sugli impianti a fune, già descritte precedentemente, sono state acquisite celle della EIG, disponibili sia in forma di celle che in moduli da circa 1 kWh, completi di sistema elettronico di gestione e controllo. Le celle EIG sono celle polimeriche a ioni di litio con elettrodo positivo a base di leghe di nichel-cobalto-manganese con capacità nominale da 20 Ah ed una tensione di lavoro di 3,65 V. Alcune celle, come quella di Figura 264, sono state caratterizzate in laboratorio, in condizioni di funzionamento variabile. Le prove hanno avuto il duplice obiettivo di verificarne le prestazione nominali e di valutarne il comportamento ciclico secondo profili standard.

Le celle provate (in totale 10) da 20 Ah (al regime nominale da C2 a C/10), presentano caratteristiche di capacità ed efficienza coulombica prossime a quelle attese, particolarmente a bassi regimi di scarica. Le Figure 265 ed 266 riassumono alcuni risultati sperimentali. La Figura 265 riporta il comportamento elettrico di due celle al litio EIG nel tempo durante alcuni cicli di carica scarica. Il regime di corrente è pari a C/2 (con capacità nominale della

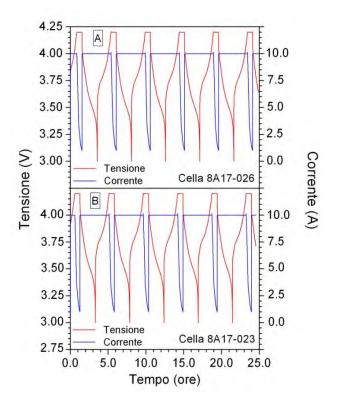


Figura 265. Andamento della tensione nel tempo di una cella EIG

singola cella), che corrisponde a 10 A. La Figura 266 mostra l'evoluzione della capacità in funzione del numero di cicli per tutte le celle provate (10 in totale).

Le batterie sono state provate alla temperatura di 20 °C con variazioni di tensione comprese tra 4,2 e 3,0 V nel seguente modo: carica galvanostatica a C/2 (10 A) + carica potenziostatica (4,2 V) sino ad una corrente < C/20, scarica C/2.

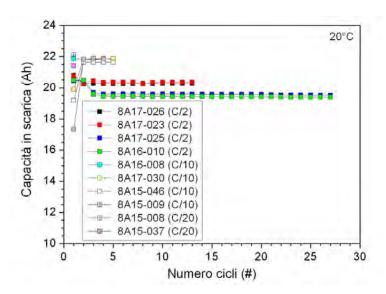


Figura 266. Prove di vita ciclica delle varie celle EIG

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

A. Portale dell'efficienza energetica e delle elettrotecnologie innovative negli usi finali

Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE) è stata coinvolta in attività di ricerca riguardanti "La garanzia della fornitura e qualità del servizio elettrico nei centri di calcolo e le metodologie per la definizione di indicatori di prestazione energetica in applicazioni tecnologiche nei settori industriali e terziario a supporto all'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica".

Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università degli Studi di Pavia, le attività di ricerca hanno riguardato "Opportunità di ottimizzazione dei consumi nella produzione/distribuzione/utilizzo dell'aria compressa nei settori industriali più sensibili"; nello specifico scopo dello studio è stata la valutazione delle potenzialità di razionalizzazione dei consumi elettrici nell'ambito del servizio aria compressa per l'industria, da eseguirsi principalmente attraverso l'analisi della catena di generazione/distribuzione/utilizzo dell'aria, ossia valutazione delle prestazioni del sistema e individuazione del ruolo giocato dai diversi elementi della catena e l'individuazione di proposte di intervento, creazione di scenari per i settori industriali maggiormente interessati, valutazione dell'energia primaria risparmiabile e delle emissioni di CO₂ equivalente evitabili.

Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia (DIEM) dell'Università degli Studi di Bologna (di seguito UniBO) la collaborazione ha avuto per oggetto l'integrazione di sistemi cogenererativi innovativi di piccolissima taglia nelle reti di distribuzione dell'energia elettrica, termica e frigorifera. Nello specifico, oltre all'analisi delle prestazioni energetiche (Balance of plant) ottenibili dallo scaledown di tecnologie note o da soluzioni innovative (ovvero motori Stirling, microcicli Rankine, a vapor d'acqua o a fluido organico, micro motori a combustione interna o microturbine a gas con IBC, microcogeneratori termofotovoltaici) nella produzione combinata di energia elettrica e calore, per taglie di potenza elettrica fino a 5 kW, svolta in collaborazione con l'Università di Ferrara, UniBO ha analizzato le prestazioni energetiche ed ambientali conseguibili (in termini di risparmio di energia primaria e di emissioni ad impatto globale e locale) con tali sistemi, comparandoli tra loro e mettendoli in relazione a quelle che sono le soluzioni convenzionali esistenti, ovvero la produzione centralizzata di elettricità e distribuita di calore e freddo, e le problematiche dell'integrazione dei sistemi cogenerativi con la rete di distribuzione del calore e del freddo, prevedendo ed ottimizzando la presenza e il dimensionamento di sistemi di accumulo termico e/o di caldaie integrative, con l'obiettivo di minimizzare, e possibilmente eliminare, la dissipazione del calore cogenerato in eccesso, attraverso l'uso di dissipatori di calore.

Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Ferrara (di seguito UniFF), coinvolta sullo stesso tema dell'Università di Bologna, l'Università di Ferrara ha analizzato, anche, le potenzialità dei sistemi nelle applicazioni di cogenerazione e/o trigenerazione per utenze con fabbisogni termici a medio/bassa temperatura e con richieste frigorifere tipiche del condizionamento e le problematiche della connessione e integrazione con la rete elettrica.

B. Sviluppo di metodologie per la valutazione semplificata dei risparmi energetici in applicazioni tecnologiche innovative/efficienti nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica

Le attività di ricerca svolte da **FIRE** con i dipartimenti universitari citati al precedente punto (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Pavia, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia dell'Università di Bologna e Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara), oltre che all'approfondimento tecnico-scientifico di aspetti di interesse relativi alle tecnologie esaminate, sono state finalizzate all'individuazione di metodologie di valutazione semplificata dei risparmi energetici conseguibili con l'applicazione delle tecnologie analizzate per la predisposizione di nuove schede semplificate (standardizzate) ai fini del meccanismo dei TEE. Tale contributo, sviluppato sulla base di quanto richiesto dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas ai fini della predisposizione di nuove proposte di schede tecniche, risulta estremamente utile a convogliare le migliori competenze presenti nel Paese su iniziative condivise che possano rappresentare un'ampia base di potenziali proponenti di nuove schede.

C. Monitoraggio ed analisi prestazionale di un impianto di micro-cogenerazione; sviluppo di un modello di cogeneratore con motore a combustione interna

Dipartimento di Energetica (DENER) del Politecnico di Torino, si è occupato dell'implementazione del modello matematico secondo le indicazioni preliminari fornite da ENEA e seguendo le relazioni, già implementate dall'IEA nell'ambito dell'attività Annex 42 riportate nel documento "A Generic Model Specification for Combustion-based Residential CHP Devices".

In particolare l'attività del DENER ha rifguardato le seguenti fasi:

- analisi critica degli algoritmi e del modello di motore a combustione interna come implementato nell'ambito dell'attività Annex 42; definizione degli algoritmi definitivi da implementare nel modello,
- sviluppo in ambiente *Matlab/Simulink* del modello dinamico di motore a combustione interna per cogenerazione di piccola taglia (fino a 1 MWe),
- implementazione di layout di impianto e profili di carico elettrico e termico reali.

D. Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di supercondensatori a sistemi di movimentazione (carroponte) ed approfondimento teorico-sperimentale dell'utilizzo dell'accumulo in altri settori di applicazione

Per tale attività, l'ENEA si è avvalsa dell'impegno coordinato e sinergico di tre gruppi Universitari:

- il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli "Federico II" che è stato coinvolto in attività relative alla realizzazione dell'installazione sperimentale di supercondensatori su di un carroponte, che hanno riguardato nello specifico:
 - o dimensionamento dell'elettronica, dei conduttori, delle protezioni ecc. su specifiche Thyssen/ SiderPiombino, nonché sviluppo del software di gestione del sistema sperimentale pilota da installare presso la Thyssen:
 - o ideazione di una serie di cicli-test per la quantificazione dei vantaggi ottenibili con l'adozione dei supercondensatori e valutazione dei risultati ottenuti tramite le apparecchiature sperimentali disponibili in ENEA.

Con riferimento all'impianto citato qui sopra, la società **SiderPiombino** ha progettato l'installazione con le modifiche alla struttura del carroponte, mentre **Thyssen**, proprietaria del sito produttivo presso cui era previsto in origine installare l'impianto, ha partecipato alla definizione delle specifiche di gestione.

- il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano, è stato coinvolto nelle seguenti attività:
 - o sperimentazione comparata di moduli di supercondensatori e batterie litio ione, per consentire una migliore individuazione dei rispettivi campi di applicazione;
 - modellistica degli accumuli elettrici e calibrazione dello stesso tramite sperimentazione in ENEA di moduli di supercondensatori di taglia industriale (64F/125V);
 - o realizzazione di un tool di progettazione per il dimensionamento su basi statistiche di un sistema di accumulo a supercondensatori.
- il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università di Roma Tre, è stato impegnato in attività di messa a punto su piattaforma Matlab/Simulink di un modello dell'impianto di sollevamento /sistema di alimentazione con recupero energetico, implementazione e sperimentazione in ENEA delle strategie di controllo sviluppate.
- il Dipartimento di Sistemi elettrici e Automazione dell'Università di Pisa è stato coinvolto per la valutazione comparata delle prestazioni di batterie e supercondensatori.

E. Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di batterie a sistemi di trasporto a fune (funivia)

Le attività svolte dal Dipartimento di Sistemi elettrici e Automazione dell'Università di Pisa hanno riguardato:

- o verifica delle specifiche definitive del sistema d'accumulo fornite da ENEA a seguito del dimensionamento definitivo e dei sistemi batterie proposto da ENEA;
- o studi sulla potenza reattiva e conseguente dimensionamento preliminare del banco capacitivo.

La società E.E.I. S.r.I. (Equipaggiamneti Elettronici Industriali) (subcontraente) è stata impegnata nella progettazione e realizzazione del convertitore per il recupero dell'energia e riduzione dei picchi di assorbimento. Entro il 2[^] anno di attività verrà fornita la prima macchina prototipo, a cui seguirà la macchina definitiva.

la società ATB (Azienda Trasporti Bergamo) (partner industriale senza contributo) ha messo a disposizione l'impianto presso cui eseguire l'installazione (funicolare di Bergamo – S. Virgilio).

Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica

Lo scenario di riferimento per quest'attività è il Piano d'Azione per l'Efficienza energetica (luglio 2007), che individuava nell'illuminazione pubblica uno dei settori primari su cui agire, con un risparmio potenziale al 2016 di 1290 GWh.

Il consumo attuale del settore è di circa 6 TWh su un consumo totale di energia di circa 300 TWh (Figura 267). La situazione nazionale è piuttosto complessa e le informazioni di dettaglio sono frammentarie. Nella pura illuminazione "stradale", le tecnologie più in uso sono ancora le sorgenti a vapori di mercurio, in progressiva

sostituzione con lampade a vapori di sodio ad alta pressione, apparecchi a rendimento ottico più elevato ed alimentazione a maggior efficienza energetica. La tendenza attuale è verso la "luce bianca", con ioduri metallici ad arco ceramico e, in forte espansione, LED.

L'evoluzione del mercato è condizionata anche dalle legislazione comunitaria, in particolare dalla Direttiva Ecodesign⁶, di cui sono stati emessi due Regolamenti, che fissano requisiti minimi di efficienza e funzionalità per l'immissione di nuovi prodotti di illuminazione sul mercato; il

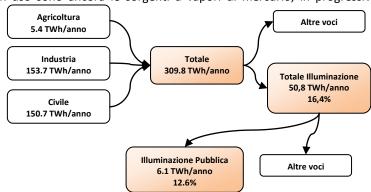


Figura 267. Consumi finali di energia elettrica in Italia nei diversi settori (Fonte: Terna)

Regolamento 245/2009 comprende tipologie di lampade, apparecchi, alimentatori usati in illuminazione pubblica⁷.

Molti studi dimostrano un ritorno dell'investimento in tempi brevi utilizzando tecnologie consolidate, ma è carente un approccio di sistema per integrare le tecnologie innovative con quelle tradizionali. Perché l'efficienza energetica nell'illuminazione pubblica possa svilupparsi e centrare in pratica gli obiettivi del Piano d'Azione, è necessario, oltre all'aspetto di sviluppo tecnologico, lo sviluppo di modelli di intervento e casi pilota, team sinergici di aziende produttori, gestori ed istituti finanziari, conoscenze nel contesto della pubblica amministrazione.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Con la presente attività si intende sviluppare tecnologie in grado di contribuire al contenimento dei consumi energetici, all'aumento dell'efficienza nell'illuminazione pubblica: tutto questo nel rispetto delle esigenze degli utilizzatori finali e delle amministrazioni pubbliche che tali esigenze gestiscono.

L'attività si articola in cinque obiettivi intermedi

A. Sviluppo software per progettazione illuminotecnica assistita mirata all'efficienza energetica

L'obiettivo prevede la realizzazione di una piattaforma per progettazione illuminotecnica assistita, particolarmente mirata all'efficienza energetica. Tale piattaforma sarà usata anche come base per studi di ottimizzazione dinamica e per visualizzazioni in realtà virtuale come aiuto ai progettisti e ai potenziali decisori.

Nel precedente Piano di Pealizzazione 2006 era stata già implementata una piattaforma per la progettazione illuminotecnica mirata all'efficienza energetica, con particolare attenzione all'illuminazione di ambienti interni e specialmente in applicazioni industriali. L'attività prosegue con lo sviluppo del software, aggiungendo nuove funzionalità alla piattaforma esistente, allargando il campo di applicazione all'illuminazione pubblica.

⁶ La Direttiva originale era la 2005/32/EC, legata agli Energy Using Products ("EUP"). Il 21 ottobre 2009 è stata emessa la nuova Direttiva 2009/125/EC, che rispetto alla precedente si caratterizza per campo di applicazione più vasto, legata agli Energy Related Products ("ERP").

⁷ L'altro Regolamento, il 244/2009, è molto più famoso per i "non addetti ai lavori", nei suoi effetti pratici e nell'immaginario collettivo: è quello sulle "lampadine domestiche".

Prosegue la fase di diffusione verso la comunità scientifica e i professionisti, anch'essa iniziata nella precedente annualità.

B. Ricerca sperimentale su prodotti innovativi, sviluppo di sistema di controllo intelligente, test di laboratorio su prototipi

L'attività di ricerca sperimentale è finalizzata a migliorare le prestazioni di dispositivi innovativi (apparecchi di illuminazione, sistemi di controllo, ecc.).

Vengono identificate le strategie di controllo per il "sistema-illuminazione" di una realtà territoriale complessa (un Comune, un Distretto, ecc.) basato su sensori e su regolatori di flusso a controllo remoto, comprendendo anche diagnostica e monitoraggio, per pilotare il sistema in funzione delle ore del giorno, delle stagioni, delle condizioni climatiche, del grado di funzionalità degli impianti.

In particolare, ai fini di un'ottimizzazione del servizio è necessario che i regolatori di flusso siano dotati di dispositivi di telecontrollo; ciò apre uno scenario innovativo nei sistemi di illuminazione pubblica consentendo la gestione e il controllo dell'unità anche a notevole distanza, per verificarne il corretto funzionamento o per modificarne i parametri in base alle varie necessità.

Un intervento che va nella direzione di un'ottimizzazione della manutenzione degli impianti di illuminazione, è quello di dotare ogni regolatore di flusso luminoso di un sistema atto a notificare, in modo asincrono ed immediato, le eventuali condizioni di errore dovute ad un malfunzionamento accidentale, attraverso l'emissione automatica di segnalazioni di guasto (emissione di "trouble ticket") al servizio di supervisione di impianti di illuminazione. Ciò consente di ridurre il numero degli interventi di "manutenzione preventiva" degli impianti, attivando le squadre di intervento per la "manutenzione correttiva" in modo mirato e tempestivo, solo in corrispondenza di reali situazioni di guasto. Oltre a ciò, attraverso l'analisi dei dati ricevuti, relativi a tensioni e correnti di lavoro dell'apparecchiatura, è possibile estrarre informazioni qualitative riguardanti la funzionalità delle lampade; un'indicazione puntuale della funzionalità delle lampade potrebbe ottenersi dotando ognuna di esse di un dispositivo sensibile alla loro corrente di alimentazione; la trasmissione dei dati lampada-regolatore può avvenire attraverso la linea di alimentazione durante le ore diurne, o durante il funzionamento delle lampade in momenti opportuni della sinusoide di alimentazione. La trasmissione dei dati tra i vari regolatori e il servizio di supervisione potrebbe ottenersi attraverso rete cablata o Wi-Fi. Tali accorgimenti migliorerebbero il servizio e ridurrebbero ulteriormente le spese di manutenzione.

Nell'ambito dell'obiettivo sono previsti test di funzionalità e misure secondo normativa su prototipi di dispositivi innovativi (apparecchi di illuminazione, sistemi di controllo...) presso laboratori ENEA (in particolare CORVO, il laboratorio di prova per le verifiche energetico-ambientali di sistemi di illuminazione) o esterni. Questa attività è propedeutica all'utilizzo in applicazioni sperimentali. Oltre alla finalità conoscitiva intrinseca, i risultati dei test permetteranno la modellazione dei prototipi e quindi l'inserimento degli stessi nella fase di progettazione assistita di impianti. I test sono diversi secondo il tipo di dispositivo: ad esempio per gli apparecchi di illuminazione sono previste caratterizzazioni fotometriche, quali il solido fotometrico, cioè la distribuzione dell'intensità della luce emessa nelle varie direzioni; nel caso di regolatori di flusso luminoso, è importante identificare la curva di risposta delle varie sorgenti luminose alle variazioni dell'alimentazione elettrica.

C. Realizzazione pilota di illuminazione efficiente in una situazione applicativa complessa

È prevista la realizzazione di un impianto sperimentale pilota in una situazione applicativa complessa (Comune, distretto terziario, modulo autostradale o altro). Sono privilegiate realtà rappresentative di diversi tipi di utilizzo: ad esempio zone di transito, grandi aree, percorsi pedonali, oppure utilizzi specifici e molto ripetibili, come un tratto autostradale. In tale realizzazione si utilizzano varie tecnologie, comprese alcuni brevetti ENEA, e viene sperimentato il sistema intelligente di gestione. Vengono identificate le tecnologie innovative utilizzabili e il loro campo di applicazione.

L'impianto viene monitorato in condizioni di reale funzionamento, eseguendo, eventualmente, anche altre campagne sperimentali su specifici aspetti della realtà "illuminazione pubblica", quali l'inquinamento luminoso e la protezione di siti (ad esempio osservatori astronomici, zone ad elevato valore ambientale).

La fase di progettazione avviene anche con l'ausilio della piattaforma software in sviluppo.

D. Trasferimento tecnologico e diffusione verso realtà territoriali ed ESCO

Nella fase di trasferimento tecnologico è prevista la costituzione di due network: uno di realtà territoriali (ad esempio Comuni) interessati a seguire la realizzazione pilota (quindi ad avere informazioni) e uno di ESCO potenzialmente interessate ad effettuare audit energetici del sistema di illuminazione dei paesi del network. È previsto almeno un evento conclusivo verso il network dei comuni ed il network delle ESCO con lo scopo di dare

informazione sullo sviluppo del "paese pilota", sullo sviluppo delle tecnologie, sulle modalità (contrattistica) di realizzazione degli interventi.

E. Contributo alle attività prenormativa e normativa

ENEA partecipa ai Comitati UNI su illuminazione (in diversi gruppi di lavoro). In programma nel 2009 c'è uno studio particolare sui regolatori di flusso luminoso che può prevedere anche attività sperimentali. E' in corso anche la revisione della norma sull'illuminazione dei luoghi di lavoro in interni, con l'inserimento di un capitolo dedicato alla verifica (misure) del progetto illuminotecnico.

Si intende consolidare la partecipazione ENEA al gruppo italiano CIE, partecipazione già avviata a livello informale, e garantire il supporto tecnico per l'Italia nel Comitato Tecnico per la Direttiva 2005/32/EC (Ecodesign) sull'illuminazione.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Sviluppo software per progettazione illuminotecnica assistita mirata all'efficienza energetica

A1. Sviluppo software per progettazione

Nella precedente annualità è stata implementata una piattaforma per la progettazione illuminotecnica mirata all'efficienza energetica, con particolare attenzione all'illuminazione di ambienti interni e specialmente in applicazioni industriali⁸. Nel corso del secondo anno attraverso un'attività di sviluppo software sono state aggiunte nuove funzionalità alla piattaforma esistente, allargando il campo di applicazione all'illuminazione pubblica.

La valutazione e la misura dei possibili risparmi nella pubblica illuminazione deve considerare due diversi aspetti, il cui studio congiunto consente di effettuare una valutazione consapevole ed affidabile dei possibili risparmi connessi ad un investimento:

- l'efficienza energetica dell'impianto che si raggiunge attraverso la scelta di apparecchi, lampade, geometrie di impianto e relativi sistemi di controllo adatte all'applicazione e che consentano di soddisfare i requisiti della norma UNI 11248;
- l'aspetto economico dell'investimento che deve tenere conto di tutte le possibili voci di costo del progetto (LCCA, Life Cycle Cost Analysis). Vengono quindi presi in esame i costi iniziali (investimenti, installazioni, acquisizioni), i costi futuri (manutenzione, spese energetiche, oneri finanziari), fino ad arrivare allo smaltimento e al recupero.

E' stato analizzato quanto già disponibile nella piattaforma esistente e sono state quindi definite alcune caratteristiche importanti per poter valutare le prestazioni e i consumi di un impianto di illuminazione pubblica, anche in situazioni dinamiche:

- 1. la possibilità di immettere curve di risposta di regolatori di flusso luminoso;
- 2. l'introduzione di un indice di efficienza di impianto.

Tali caratteristiche sono state implementate a cura di COLOR CONSULTING s.r.l., in collaborazione con Oxytech s.r.l. in un modulo software, chiamato EnergiaCalc, complementare alla piattaforma esistente.

Curva di risposta di regolatori di flusso luminoso: nei software per illuminotecnica del mercato, è possibile "simulare" la riduzione di luce di un apparecchio, tuttavia tale simulazione non permette una corretta valutazione della riduzione di potenza dovuta alla presenza di regolatore di flusso. E' necessario conoscere, a fronte di una riduzione della potenza elettrica, quale sarà la variazione di luce corrispondente o viceversa. Questa curva di risposta dipende da diversi fattori, legati al funzionamento del regolatore stesso, alla sorgente da regolare e alla strategia scelta per questa regolazione. E' quindi stato introdotto un metodo grafico per immettere i dati di targa dei simulatori e poterli utilizzare nella simulazione/progettazione.

⁸ il software era LITESTAR11, che nel corso dell'anno è stato arricchito di ulteriori funzionalità, LITESTAR 4D. Scaricabile gratuitamente in rete, ad es. dal sito di Oxytech s.r.l.

Indice di efficienza di impianto: attualmente non esiste un indice di efficienza di impianto riconosciuto a livello europeo e ci sono vari gruppi di lavoro su questo argomento. E' stato scelto di utilizzare un indice utilizzato dal governo spagnolo, a sua volta legato a formule negli studi preparatori ai Regolamenti della Direttiva Ecodesign.

A2. Modello per visualizzazione in realtà virtuale

La piattaforma è stata usata come base per una visualizzazione in realtà virtuale come aiuto ai progettisti e ai potenziali decisori. L'aspetto innovativo consiste nella possibilità di "navigare" in un modello dell'ambiente oggetto dello studio illuminotecnico (ad esempio una stanza, un parco...) e "vedere" l'ambiente illuminato con tutto il campo visivo, ricevendone quindi un'impressione

100% 80% 60% 10D 250 w SAP 250 w 10D 250 w SAP 400 w 10D 400 w

% Flusso luminoso

Esempio di curva di risposta di regolatore di flusso luminoso: variazione del flusso luminoso di sorgenti a scarica (Sodio Alta Pressione e loduri Metallici) in funzione della tensione di alimentazione. Misure eseguite presso Laboratorio ENEA di Ispra con Regolatore LUCE brevetto ENEA

più realistica rispetto all'osservazione su una superficie piana e di piccole dimensioni (es. schermo di un PC, uno stampato). Si è stabilito di predisporre un evento presso il Teatro Virtuale dell'Università di Milano relativo alla piazza di pregio del "paese pilota" scelto per la realizzazione sperimentale (Piazza Italia nel Comune di Marcallo

con Casone, MI). Il processo consiste nell'utilizzo di un software per la modellazione 3D, l'interfacciamento del modello con la piattaforma illuminotecnica e quindi il passaggio dell'output della simulazione illuminotecnica al motore di rendering per la visualizzazione interattiva in modalità stereoscopica.

La piazza è stata modellata (per ora in forma semplificata, Figura 268) nei suoi elementi architettonici (chiesa, case, alberi...). Sono già state inserite le caratteristiche illuminotecniche dell'impianto attuale e analogamente saranno inserite quelle dell'impianto sperimentale. Il modulo software per la navigazione e visualizzazione nel Teatro Virtuale è stato implementato e testato su versioni di prova del modello semplificato: sono in corso gli ultimi aggiustamenti del software e poi l'evento sarà realizzato come momento di diffusione oltre che di studio.

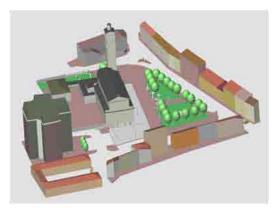


Figura 268. Modello semplificato della piazza

A3. Confronto software

Sono stati confrontati diversi software utilizzati dalla comunità illuminotecnica. I software considerati sono stati scelti tra software a carattere commerciale e software generalmente impiegati per la ricerca scientifica, confrontando le potenzialità, la precisione nella determinazione delle grandezze illuminotecniche impiegate nella pratica progettuale e nella ricerca, la qualità delle immagini restituite in fase di renderizzazione. La piattaforma in sviluppo è stata inserita tra i software analizzati, mettendone in luce i pregi e i difetti.

È stato inoltre redatto uno stato dell'arte sui metodi di ottimizzazione innovativi, con particolare attenzione al metodo degli algoritmi genetici. È stato infine fatto cenno ad esempi di applicazione illuminotecnica con ottimizzazione tramite algoritmi genetici presenti in bibliografia.

B. Ricerca sperimentale su prodotti innovativi, sviluppo di sistema di controllo intelligente, test di laboratorio su prototipi

B1. <u>Stapelia</u>

E' stata svolta attività di ricerca sperimentale per migliorare le prestazioni di un dispositivo innovativo con brevetto ENEA: Stapelia.



Figura 269. Stapelia

Stapelia è un componente multifunzionale per l'inserimento in contesti sensibili, con alimentazione fotovoltaica. Ha una struttura, a forma stilizzata del fiore dell'omonima pianta (figura 259), progettata anche per illuminare parchi, strade, aree pubbliche anche in modalità stand-alone, cioè senza allacciamento alla rete elettrica. Stapelia è integrabile con sorgenti luminose di diverso tipo, ma la sua ideale dotazione è un sistema a LED.

Originariamente i LED di potenza erano situati nella "corolla" di Stapelia, dietro uno schermo diffusore in plexiglas. Tuttavia il limite di potenza / energia in uscita dal sistema fotovoltaico, l'efficienza dei LED usati, la loro posizione e l'assenza di ottiche secondarie rendevano di fatto Stapelia un oggetto di grande valenza estetica ma poco adatto per una utilizzazione anche funzionale.

Si è quindi deciso di studiare una ottimizzazione illuminotecnica di Stapelia, che nel corso dell'attività si è trasformato anche in uno studio dell'elettronica di controllo dei moduli fotovoltaici, in funzione della diversa orientazione degli stessi e della variabilità delle modalità di captazione della radiazione solare, della conversione elettrica e della funzionalità dell'accumulo. Tutto questo per poter sfruttare quanto più possibile l'elettricità prodotta dai pannelli in modalità standalone, e comunque per rendere intrinsecamente più



Figura 270. Nuova Stapelia

efficiente Stapelia.

Nella nuova configurazione il "fiore" di Stapelia è la parte captatrice di energia mentre particolari "foglie" fissate al palo di sostegno portano gli elementi illuminanti. La retroilluminazione del fiore è conservata, a fini estetici (Figura 270).

La struttura può essere impiegata anche per altri scopi oltre a quello dell'illuminazione, quali sistemi di video sorveglianza, raccolta dati ambientali e/o meteorologici, viabilità, scopi ricreativi nei parchi giochi, ponti ripetitori di segnali, ecc.. Il progetto quindi si prefigge di creare una struttura autoalimentata che possa avere parecchi impieghi e che possa adattarsi a diverse esigenze.

Sono state esaminate diverse soluzioni intermedie⁹ ed è stato costruito un prototipo di "foglia" a LED di cui sono in corso test di laboratorio e simulazioni all'ENEA di Ispra.

La struttura impiega una matrice (150 x 235 mm) di 18 LED di potenza con relative lenti secondarie asimmetriche, per un impegno di potenza <25W (Figura 271). Ogni LED è alimentato singolarmente con proprio circuito switching ad alta efficienza e tutti i LED insistono sulla stessa area, per garantire buone prestazioni del sistema anche in caso di guasti a un singolo componente. La piastra su cui sono montati i LED è un circuito a conduzione di calore, a sua volta fissato alla struttura meccanica di



Figura 271. La "foglia" della nuova Stapelia e la matrice di LED

metallo della foglia; questo garantisce un'ottima dissipazione termica.

Per la scelta della batteria (160 Ah) sono state valutate diverse tecnologie in commercio (PbSO₄, Ni-CD, Ni-MH, litio): la scelta inizialmente era Ni-MH, perché tali batterie sono in grado di immagazzinare notevoli quantità di energia in volumi e pesi ridotti, ma il rapporto prestazioni/prezzo per la taglia da impiegare risulta ancora troppo

⁹ Il primo prototipo aveva strisce di LED di potenza posizionate su una struttura molto fine, simile a una vera e propria "foglia". I LED erano posizionati sotto la foglia in una sorta di nervatura, resinati per essere impermeabili agli agenti atmosferici. Non c'erano ottiche secondarie e la distribuzione della luce al suolo si sarebbe ottimizzata agendo sulla geometria della foglia. Con la foglia a 4 m di altezza, si otteneva nella configurazione base – non ottimizzata - un illuminamento medio al suolo di circa 7 lux su un'area circolare di 12 metri di diametro, con un consumo di circa 36W.

sfavorevole, pensando una possibile commercializzazione di Stapelia. Si è quindi optato per $PbSO_4$ e precisamente piombo-gel per trazione, adatta a frequenti cicli di carica/scarica con grandi capacità di scariche profonde senza danneggiamenti. E' stato progettato un circuito in grado di caricare la batteria stessa in diverse fasi, con diverse correnti e attuando un'analisi preliminare sullo stato di carica residuo prima di un nuovo ciclo di ricarica, tenendo conto del fatto che ogni "petalo" fotovoltaico si comporta in modo indipendente, data la diversa orientazione. Un circuito di controllo generale gestisce l'intero sistema, compresa l'accensione dei LED secondo necessità durante le ore notturne.

In attesa dei componenti fotovoltaici, l'intero sistema viene provato con alimentatori. In seguito la struttura verrà assemblata e testata nell'area esterna del laboratorio. Sarà quindi possibile iniziare un'evoluzione anche dell'aspetto di design della "foglia" e introdurre sistemi adattivi.

B2. Upgrade laboratorio CORVO

Il laboratorio di illuminotecnica dell'ENEA di Ispra, denominato CORVO, è equipaggiato con strumentazione per misure locali e campagne di monitoraggio sul campo. Nel laboratorio vengono condotte le seguenti tipologie di prove:

- determinazione del profilo energetico di sistemi e componenti in condizioni di lavoro;
- analisi dei sistemi di regolazione del flusso luminoso;
- influenza delle caratteristiche dell'ambiente sull'illuminamento;
- verifica sperimentale di software illuminotecnico.

Nella presente annualità si è acquisita specifica strumentazione per misurare caratteristiche radiometriche e fotometriche sui LED, in previsione anche dell'evoluzione della ricerca ed un software specializzato (TRacePRO Expert di Lambda Research) per modellazione optomeccanica, tipicamente utilizzato per simulare e "progettare" ottiche di apparecchi di illuminazione.

B3. <u>Analisi problematiche inerenti lo sviluppo di nuovi sistemi per illuminazione pubblica. Test su prototipi</u>
Sono stati svolti studi sulle sorgenti a LED, sull'utilizzo di sensori e sistemi di controllo intelligenti per l'illuminazione pubblica e la possibilità di effettuare misure fotometriche su sistemi di illuminazione.

Un primo studio, svolto in collaborazione con l'Università di Roma, ha riguardato l'analisi dello stato dell'arte delle nuove soluzioni per l'illuminazione (LED), partendo dall''evoluzione storica della tecnologia, la struttura e funzionamento, le tipologie e loro caratteristiche, le proprietà ottiche ed elettriche e metodi per misurarle, punti di forza e debolezza, possibilità di applicazione. Attenzione è stata dedicata al funzionamento ed alle attuali soluzioni presenti sul mercato, ai pregi e soprattutto ai limiti che la tecnologia presenta. Si è inoltre eseguita una ricerca bibliografica approfondita su quelli che al momento i temi di ricerca più importanti riguardo i LED, nonché delle prove sperimentali. Parte dell'attività è stata dedicata alla attuale situazione normativa, e alle future prospettive in termini di formazione e regolamentazione.

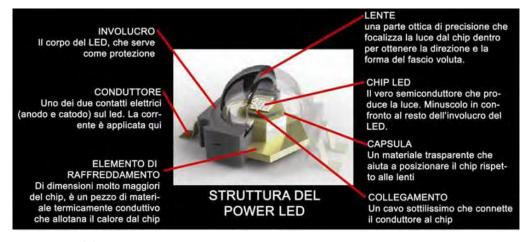


Figura 272. Struttura del power LED

Nell'ambito della collaborazione con il Politecnico di Milano, sono state prodotte linee guida per lo sviluppo di nuovi prodotti a LED, corredate con misure fotometriche. Fornire ai professionisti strumenti formativi validi è una attività molto importante: i LED sono una tecnologia innovativa, la produzione risulta molto diversificata in termini di qualità e le informazioni sui vari prodotti sono spesso poco confrontabili tra loro.

Gli argomenti principali da considerare per lo sviluppo di un nuovo prodotto a LED, come esposto nelle linee guida, sono:

- 1. la scelta della sorgente, primo passo per la progettazione di un sistema. La selezione deve scaturire da una comparazione tra i LED che tenga conto di diversi fattori:
 - o flusso luminoso emesso in condizioni di riferimento (per esempio temperatura di giunzione Tj=25 °C alla corrente di 350 mA);
 - o performance luminose in funzione alla variazione di temperatura (tensione LED, resistenza termica giunzione solder-point);
 - disponibilità di ottiche da utilizzare nel progetto (ad esempio questo punto, insieme con considerazioni sulla corretta dissipazione termica, porta a privilegiare i LED monochip rispetto ai multichip);
- 2. il tipo di ottica che si vuole utilizzare. Le principali categorie di ottiche stradali a LED sono:
 - o ottiche a riflessione che utilizzano un solo LED (multi chip di elevata potenza) o più LED di potenza inferiore accoppiati a uno o più riflettori;
 - o ottiche a rifrazione;
 - o ottiche miste, cioè dei riflettori che controllano parte del flusso luminoso emesso dal LED e una lente per il controllo di quella frazione di radiazione luminosa che non è intercettata e controllata dal riflettore;
- 3. la scelta della temperatura di colore (CCT) per le sorgenti LED. Questo argomento è importante per il contesto in cui l'apparecchio e l'impianto si andranno a inserire e va ricercato un delicato equilibrio con ragioni di efficienza delle sorgenti (al diminuire della CCT, il rapporto lm/W peggiora a parità di ogni altra condizione). Recenti pubblicazioni scientifiche hanno trattato anche il tema del rapporto tra l'utilizzo di sorgenti luminose ricche di corte lunghezze d'onda e le possibili conseguenze sulla salute umana. Le conoscenze attuali sono in grado di prevedere in modo quantitativo come la luce condizioni il sistema circadiano umano, ma non siamo ancora in grado di comprendere completamente, come e se, la luce può condizionare la salute umana attraverso il sistema circadiano;
- 4. la tipologia geometrica del supporto: è necessario gestire in maniera semplice la fase di montaggio industriale dell'apparecchio, mantenendo elevate performance impiantistiche e il rispetto delle prescrizioni normative;
- 5. il flusso luminoso di partenza di ciascun LED, che deve essere stimato tenendo conto dei parametri che necessariamente lo riducono: rendimento dell'ottica; regime termico di funzionamento; corrente di alimentazione del LED (strettamente collegato al punto precedente); assorbimento ed alle riflessioni interne della "coppa"; effetto di schermo del supporto rispetto all'emissione dei LED;
- 6. il design delle caratteristiche fotometriche dell'apparecchio. Nello studio viene descritto in dettaglio e con esempi uno schema a passi successivi e software dedicato;
- il design dell'apparecchio. Il progetto deve prendere in considerazione il contesto di utilizzo, la forma, gli ingombri di massima e le funzionalità desiderate dell'apparecchio. Gli elementi principali per la progettazione di un apparecchio a LED sono espressi in Figura 273.

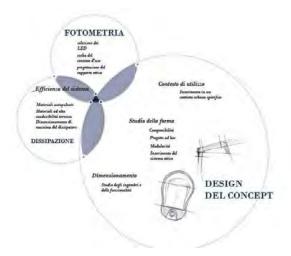


Figura 273. Gli elementi chiave del progetto di un apparecchio di illuminazione

La valutazione termica per il dimensionamento del dissipatore si basa sul calcolo di un analogo elettrico, che andrà poi verificato su prototipi. Nello studio viene riportato un caso esempio. Sono proposte anche tecniche di progetto più sofisticate, con programmi di simulazione CFD (Computational Fluid Dynamics), con risultati più accurati, che consentono di realizzare sistemi di dissipazione diversi dai tradizionali dissipatori alettati, offrendo al progettista maggiori margini di manovra e creatività nella progettazione delle forme.

Sono stati eseguiti test nel Laboratorio Luce&Colore del Politecnico di Milano e presso il Laboratorio Oxytech:

- su 3 modelli di LED di 3 differenti costruttori (maggiormente utilizzati nelle applicazioni). Ciascun campione è stato inizialmente misurato completo e successivamente è stata asportata la lente per la valutazione del flusso emesso dal LED singolo. I LED singoli e i sistemi completi di lente sono stati montati su un dispositivo per la dissipazione del calore. In questo modo è stato possibile valutare anche l'efficienza del sistema ottico. Tutte le rilevazioni sono state fatte in condizioni di regime termico. Lo scopo della misura del flusso emesso dalla singola sorgente è quello di determinare il flusso luminoso emesso dal dispositivo, in funzione della temperatura raggiunta dalla giunzione; il dato potrà essere poi impiegato nella successiva fase di progettazione del sistema ottico quando sarà necessario fissare il "punto di funzionamento termico" del dispositivo.
- su ottiche a rifrazione (3 ottiche diverse e 2 modelli di LED di 2 differenti costruttori). Il rendimento di ciascuna ottica è stato determinato come rapporto tra il flusso luminoso emesso dal sistema lente e LED e da quello emesso dal solo LED, alle diverse correnti di funzionamento. I flussi sono stati ottenuti da integrazione del solido fotometrico.
- per la determinazione sperimentale del legame Flusso luminoso / Corrente.

B4. <u>Benchmarking dei prodotti di sensoristica e controllo per l'illuminazione pubblica</u>

L'attività è stata eseguita in collaborazione con il Politecnico di Milano. In passato l'illuminazione pubblica era controllata dai tipici interruttori orari, che mantenevano acceso l'impianto "tra mezz'ora prima del tramonto a mezz'ora prima del sorgere del sole". L'unico possibile risparmio era uno spegnimento parziale nelle ore centrali della notte. Questo sistema non permetteva di tener conto di variazioni meteorologiche locali e si è quindi passati a sensori fotoelettrici ("crepuscolare"). Tuttavia anche in questo caso l'impianto non può essere che "acceso o spento" e questo aspetto non può essere ottimizzato con i sistemi tradizionali.

Occorre quindi introdurre il concetto di adattabilità nelle prestazioni degli impianti che consenta di assicurare simultaneamente le condizioni di traffico sicuro, la diminuzione dei consumi energetici e di quelli di gestione e di manutenzione in accordo con il continuo variare dei parametri ambientali.

Sul fronte normativo la situazione si è evoluta nel tempo: oggi, in funzione di parametri locali e temporali, una strada può cambiare la propria "categoria illuminotecnica", a cui corrispondono i requisiti illuminotecnici da soddisfare. L'illuminazione stradale dovrà essere gestita dinamicamente in accordo con il cambiamento di disponibilità di luce naturale nell'arco delle 24 ore, con la variazione del volume di traffico, con la mutevolezza delle condizioni atmosferiche nelle varie stagioni dell'anno.

L'utilizzo di un sistema dinamico e telegestione porta a ridurre il consumo energetico e anche ad altri vantaggi nella gestione del sistema: poiché ogni centro luminoso invia informazioni sul proprio funzionamento, è più facile predisporre una manutenzione programmata, si riduce il tempo di ricerca guasti, si possono definire meglio i costi di esercizio dell'impianto. Si può inoltre pilotare l'impianto in funzione delle condizioni meteorologiche, ma anche ridurre la potenza delle lampade a inizio vita, quando di solito l'impianto è sovradimensionato, oppure nei casi in cui sarebbe necessaria una lampada di potenza inferiore ma "intermedia" rispetto ai prodotti sul mercato.

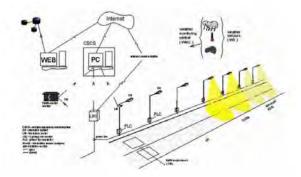


Figura 274. Schema di un sistema di controllo adattivo della pubblica illuminazione

Il controllo adattivo del livello di illuminazione deve tenere conto almeno del volume di traffico e della presenza di zone di conflitto tra veicoli e pedoni, elementi che variano nel corso della giornata, della settimana e della stagionalità.

In Figura 274 si riporta la tipica architettura di un sistema dinamico di illuminazione pubblica, in cui sono visibili i principali 5 sottosistemi:

- dispositivi di illuminazione stradale;
- sistema di alimentazione;
- sistema di controllo locale (PLC);
- centrale di controllo e supervisione (CSCS);

sistema e rete di comunicazione.

Nel rapporto completo redatto dal Politecnico di Milano, disponibile sul sito ENEA, vengono presentati esempi di applicazione di illuminazione stradale adattiva, realizzati in Europa, USA e Canada nel corso del biennio 2001-2003.

Viene quindi riportato il risultato di un benchmarking su 5 prodotti di aziende, ritenute leader del settore, per sistemi di gestione intelligente della pubblica amministrazione. Le informazioni sono desunte dalle informazioni dei produttori e da sperimentazioni sul campo nel 2009, su sistemi di controllo intelligente e apparecchi di illuminazione a LED. Sono riportati e commentati i risparmi conseguibili attraverso l'adozione di sistemi di controllo intelligente rispetto a quelli tradizionali, nel caso di impiego di lampade scarica (HPS) e sorgenti LED. Queste informazioni sono utili per conoscere l'attuale state dell'arte.

Dall'analisi dei dati provenienti da differenti studi pilota su applicazioni di controllo adattivo degli impianti di illuminazione pubblica, possono essere tratte le seguenti conclusioni:

- circa 80000 apparecchi sono controllati con le nuove tecnologie in differenti paesi del mondo; per la maggior parte i centri luminosi impiegano lampade a vapori di sodio e in qualche caso lampade fluorescenti compatte;
- le tecnologie per la trasmissione delle informazioni e dei segnali di controllo sono le più diverse, PLC (power line controller), RF (radio frequency), collegamento in fibra ottica, Internet, SMS, GSM;
- il risparmio stimato dall'adozione di questo genere di impianti varia tra 20 e 50% in dipendenza di molti fattori; in alcuni paesi la sostituzione di apparecchi di illuminazione ormai obsoleti, ha consentito di raggiungere risparmi del 60-70%;
- il risparmio di energia dovuto alla gestione intelligente dell'installazione luminosa, può essere quantificato tra il 10 e il 20%;
- il mercato dei sistemi di controllo per la pubblica illuminazione basati su queste nuove tecnologie è molto dinamico e ancora nuovo sia come struttura, sia come prezzi. Le tendenze che si possono intravedere riguardano la riduzione dei prezzi dei nuovi prodotti e tecnologie come risultato dello sviluppo dei prodotti e della comparsa sul mercato di un gran numero di produttori in tutti i paesi del mondo. L'aumento del costo dell'energia e del costo della manodopera specializzata per la manutenzione avrà come conseguenza la necessità di ridurre queste due voci attraverso un sistema di gestione intelligente dell'illuminazione pubblica;
- la preparazione di standard e regolamenti dettagliati, soprattutto da un punto di vista tecnico/tecnologico, potrà essere un valido strumento per la diffusione di queste nuove tecnologie in tutti i paesi Europei. Occorre infatti superare la diffidenza verso le nuove tecnologie (ciò che c'è funziona bene, ciò che è nuovo deve dimostrare di funzionare meglio prima di essere adottato in uno standard o in una prescrizione di legge) e questo sforzo può essere fatto solo realizzando degli impianti pilota da cui trarre preziose informazioni;
- ravvisa la necessità di un protocollo aperto (di interscambio tra i diversi sistemi e tecnologie ad oggi in uso)
 per le comunicazioni, soprattutto per garantire l'espandibilità futura degli impianti e per non essere legati
 indissolubilmente a un solo fornitore (occorre infatti ipotizzare che installazioni molto complesse possano
 essere realizzate in tempi successivi, con fornitori e materiali diversi da lotto a lotto);
- anche se le strutture dei sistemi di controllo sono molto simili tra loro, i parametri di controllo e le strategie possono essere notevolmente differenti e dipendenti dal caso specifico, dal budget, dalle necessità del committente.

E' da notare che in Italia si sta lavorando in campo normativo su questo argomento. E' in inchiesta pubblica (13 settembre 2010) un progetto di norma UNI su "Regolatori di tensione e flusso luminoso per applicazione su impianti di illuminazione pubblica stradale, ed aree assimilate. Classificazione delle prestazioni.".

Lo studio termina con considerazioni circa l'impiego di luce bianca e i suoi possibili vantaggi nell'illuminazione stradale in condizioni di visibilità mesopica, ovvero intermedia tra quella diurna (fotopica) e notturna (scotopica). Questo argomento di ricerca è molto importante in quanto le condizioni legate alla visibilità mesopica sono quelle tipiche dell'illuminazione stradale notturna. Gli studi compiuti per valutare l'effetto di sorgenti ad ampio spettro nella pubblica illuminazione portano a risultati differenti a seconda del tipo di compito visivo utilizzato per la valutazione. Per compiti visivi dove si devono riconoscere oggetti situati lungo l'asse visivo si ricava uno scarso miglioramento dovuto all'impiego di sorgenti ad ampio spettro, mentre compiti che utilizzano l'intero campo visivo o il riconoscimento di oggetti situati fuori asse hanno mostrato significativi miglioramenti; in generale nella guida notturna entrambi i compiti visivi risultano presenti.

Attualmente gli standard e le norme si riferiscono soltanto alla visione fotopica e non tengono in conto le caratteristiche scotopiche o mesopiche della sorgente impiegata; risparmi sono possibili solo attraverso una revisione degli standard per tenere conto dei miglioramenti della perfomance visiva dovuti all'impiego di sorgenti con differenti distribuzioni spettrali.

B5. <u>Sviluppo di una strategia integrata per il controllo intelligente del sistema di illuminazione pubblica e sviluppo</u> di un sistema prototipale per la misura della domanda di utenza

Questa attività si riferisce in particolare allo sviluppo di un sistema di controllo intelligente che superi il concetto della semplice regolazione di flusso (alimentazione ridotta della linea elettrica durante le ore notturne per risparmiare energia), ma possa adattarsi punto punto alle condizioni di fruizione di un intero distretto (es: paese, quartiere urbano, distretto servizi/industriale) in modo da massimizzare il risparmio energetico ed aderendo alla strategia di consumare energia soltanto nella misura e nei punti in cui l'energia è effettivamente richiesta. Tale miglioramento richiede in particolare un salto di qualità nella parte di intelligenza sia per l'estrazione di informazioni avanzate da sensori a basso costo, sia per predire la domanda di utilizzo, sia per ottimizzare il consumo energetico. La ricerca si è articolata su due direttrici: lo sviluppo di un progetto dell'intero sistema e lo sviluppo di uno smart sensor basato sulle tecnologie della visione in grado di estrarre, a costi molto bassi, una notevole molteplicità di informazioni. La ricerca è stata frutto di una fattiva collaborazione tra ENEA ed Università degli Studi Roma Tre (Dipartimento di Ingegneria Gestionale e dell'Automazione).

La ricerca parte dal fatto che negli approcci delle tecnologie attuali, i cicli di controlli sono di tipo aperto, ossia il sistema di gestione non è mai (o lo è raramente nei casi più avanzati) connesso a sistemi di rilevamento delle condizioni ambientali e di fruizione delle zone da illuminare. Ciò significa che la strategia di controllo è definita a priori a prescindere dal fatto se la reale utenza sia più o meno vicina al profilo di utenza stimata o se la prestazione di illuminazione richiesta sia effettivamente assicurata (non sottodimensionata e non sovradimensionata).

Per superare questi limiti è stata definita una architettura basata sull'uso di sistemi di misura in tempo reale della "domanda" e sull'utilizzo di un sistema di ottimizzazione per coprire in modo efficiente la domanda stessa. Potendo dotarsi di una capacità di modellazione e predizione della evoluzione a breve della domanda stessa è infatti possibile sviluppare un sistema adattivo che evolve in contemporanea alla domanda generando informazioni sulla domanda stessa di energia. Disporre di tale tecnologia a livello di sistema, potrà portare ad un aumento dei costi trascurabile (i sensori necessari sono a basso costo e l'"intelligenza" ha costi trascurabili nella replicazione) ma ad un significativo incremento del risparmio energetico (ulteriore 20%) con la diretta conseguenza che il tempo di ritorno dell'investimento sarebbe molto breve e sarebbero migliorate l'efficienza energetica dell'impianto e la garanzia della prestazione.

Un ruolo fondamentale del progetto è svolto dal palo "intelligente", un prodotto innovativo che oltre ad essere fonte di illuminazione è una porta di accesso alla rete pubblica urbana. Si tratta di un "sensore trasversale" che può fornire informazioni di natura diversa che possono essere utilizzate per i molteplici scopi dell'approccio della Smart City e trovano nella gestione della illuminazione pubblica la motivazione più importante. Nello specifico caso è stato scelto di puntare sui sensore di visione in quanto:

- 1. le tecnologie sensoriali sono già ampiamente sviluppate ed integrabili nei sistemi di controllo;
- 2. il costo del sensore è basso ed il costo della sua integrazione nelle strutture PLC (power line communication) è trascurabile;
- 3. la quantità di informazione derivabili è molto elevata (flussi/presenza di veicoli, flussi/presenza di persone, possibilità di rilevare situazioni atipiche, analisi della luminanza ambientale, sicurezza, diagnostica avanzata).

La "sensor network" è quindi formata da un certo numero di telecamere basate sui pali intelligenti e da programmi di analisi delle immagini che hanno il compito di estrarre le informazioni necessarie.

La Figure 275 e 276 mostrano il diagramma di flusso del sistema di controllo dell'illuminazione pubblica identificato da ENEA e l'espansione della parte più complessa che si riferisce alla modellazione e stima della domanda di utenza.

Come si vede si tratta di un sistema adattivo basato su due modelli, uno "long term" che tende a modellare la domanda su base settimanale, ma aggiornandola continuamente per tenere conto delle variazioni di utenza e delle variazioni climatiche durante i cicli stagionali. Il secondo modello è di tipo "short term" (alcune ore) e viene attivato quando si riconosce la presenza di una situazione atipica (es: una fiera che genera un incremento repentino ed extraordinario della domanda di illuminazione).

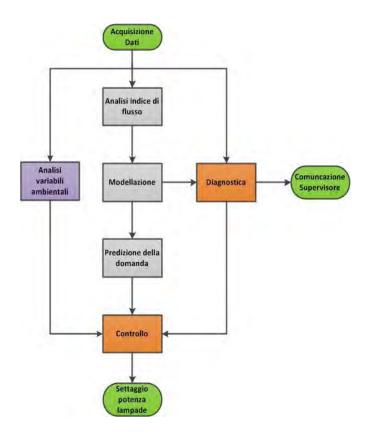


Figura 275. Diagramma di flusso del sistema di controllo dell'illuminazione

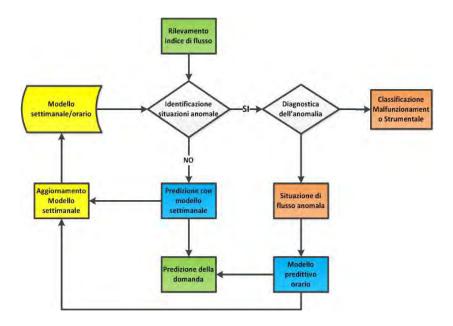


Figura 276. Diagramma del modello predittivo del flusso di traffico

La strategia di controllo viene attivata dal "rilevatore dell'indice di flusso" che consiste nella rete di sensori smart sopra citati. La tecnologia di analisi delle immagini per l'estrazione delle informazioni è specificatamente dedicata allo scopo e non esiste in commercio un programma di analisi aperto in grado di soddisfare tutte le necessità di analisi. Per questo è stato sviluppato un prototipo del sistema di analisi e qualificato su dei dati sperimentali (proveniente da registrazioni effettuate presso la stazione centrale di Napoli).

In Figura 277 viene riportato un esempio della tipologia di immagini su cui è stato sviluppato il prototipo ed un esempio dell'indice di attività veicolare che si ottiene in uscita al programma di analisi.

La procedura di analisi è piuttosto complessa ed utilizza lo stato dell'arte della computer vision per la discriminazione degli oggetti in movimento. Nella figura ne è riportato lo schema elaborativo.

C. Realizzazione sperimentale pilota di illuminazione efficiente in una situazione applicativa complessa

Poiché una delle realtà più diffuse in Italia è quella dei piccoli comuni, si è scelta come "situazione applicativa complessa" il Comune di Marcallo con Casone, comune lombardo, situato nell'area ovest di Milano.

Gli abitanti sono circa 6000 e la tipologia di attività (industria, commercio, agricoltura) è tipica di molte zone dell'hinterland milanese. Il paese si trova nell'area di influenza di EXPO2015.

L'amministrazione locale è molto sensibile ai problemi ambientali e, insieme con altri comuni limitrofi, è parte di una ESCO pubblico-privata (E2SCO)¹⁰, che ha esperienza anche nel campo dell'illuminazione pubblica.

Il Comune nel 2003 si è dotato di Piano Regolatore per l'Illuminazione Comunale, uno strumento ed un complesso di disposizioni tecniche destinate a regolamentare gli interventi di illuminazione pubblica e privata, nato per fotografare la situazione territoriale e organizzare ed ottimizzare in modo organico l'illuminazione pubblica e privata. Questo dato è molto importante ai fini della presente ricerca perché ha significato una notevole semplificazione nell'acquisizione di informazioni sullo stato attuale dell'illuminazione pubblica e sulle linee di sviluppo.

Si è quindi steso un accordo di partenariato con il Comune, in base a cui quest'ultimo ha messo a disposizione l'area comunale in cui realizzare l'intervento e si impegnato a fornire a ENEA

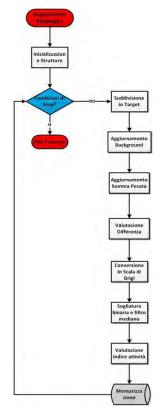


Figura 277. Schema del processo e posizionamento target

informazioni dettagliate sulla situazione esistente, per consentire la diagnosi energetica e a permettere che ENEA e partner effettuino l'attività sperimentale (monitoraggio prestazioni, analisi consumi, valutazioni dell'utenza, ecc.) sugli impianti installati, per la diffusione dei risultati del progetto. ENEA a sua volta si è impegnato a fornire linee guida per la progettazione esecutiva degli impianti e a effettuare attività sperimentale (monitoraggio prestazioni, analisi consumi, valutazioni dell'utenza, ecc.) per la diffusione dei risultati del progetto.

Sono state definite 9 zone campione, rappresentative di diversi tipi di utilizzo (vie di scorrimento/residenziali, piazze di pregio, rotonda, sottopasso, parco pubblico, ecc). Per queste zone è stato fatto un censimento degli impianti esistenti e definiti i requisiti illuminotecnici. In seguito, ai fini della realizzazione dei nuovi impianti, si sono stabilite delle priorità, che hanno portato a concentrarsi su 5 zone:

- piazza di pregio: la Piazza Italia a Marcallo, (piazza principale del Paese, entro il Centro Storico);
- via di scorrimento: via Roma a Marcallo, che porta al centro storico del paese provenendo da Magenta;
- rotonda via Roma largo Galilei via Grandi a Marcallo: oltre che come puro snodo stradale è da interpretarsi come indicazione di benvenuto per chi giunge al paese, per la presenza di stemmi decorativi nell'aiuola centrale;
- via Gornati: tipica via di quartiere residenziale, parte da Piazzetta Bubry e all'altra estremità termina in una zona di pregio con la Chiesa di San Michele;

348 Volume II

-

¹⁰ si chiama "Energy Environment Service Company s.r.l. E' una società mista a maggioranza pubblica che opera nel settore dei servizi energetico-ambientali. attualmente composta da 24 Comuni e 4 aziende che operano nel settore energetico-ambientale. (E2SCO).

• parco Ghiotti a Marcallo: parco pubblico, con una tensostruttura polifunzionale, area di aggregazione sociale, vicino al centro storico.

In Tabella 66 i requisiti illuminotecnici delle zone, identificati da ENEA in base al PRIC, a ispezioni sul campo e attraverso colloqui di approfondimento con tecnici del luogo (Ufficio Tecnico Comune, Polizia locale).

Tabella 66. Requisiti illuminotecnici delle zone selezionate da ENEA

Zona			Piazza Italia	Parco Ghiotti	Via Roma	Rotonda Via Roma-Via Grandi	Via Gornati (Casone)
Destinazione			residenziale-di pregio	zona verde	residenziale- scorrimento	residenziale	residenziale
classificazione secondo UNI 11248	Descrizione		Strade locali urbane: centri storici, isole ambientali, zone vel.max. 30 km/h	Strade locali urbane: aree pedonali	Strade urbane interquartiere	Strade urbane interquartiere	Strade urbane di quartiere
ssifi	Tipo di strada		F	F	E	E	E
	limite di velocità		30	5	50	50	50
	Categoria illuminotecnica		CE4	CE5/S3	ME3c	ME3c	ME3c
requisiti prestazio secondo UNI 1320	Luminanza della superficie stradale	L (cd/mq)			1	1	1
		Uo (min)			0.4	0.4	0.4
		Ul (min)			0.5	0.5	0.5
		TI% (max)			15	15	15
	Illuminamento orizzontale	E (lux)	10	7.5			
	illuminamento orizzontale	Uo (min)	0.4	0.4			
	Illuminazione periferica	SR (min)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
isiti iona iori	Resa cromatica	%	>90	>80	>80	>80	>80
	Temperatura di colore	°K	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000
r pre u	Illuminamento verticale	lux		_			

Sempre dal PRIC sono stati ricavati i dati sulla situazione attuale (numero punti luce, potenza e tipo lampade installate, tipo armature. Si sono poi verificate sul campo e integrate le informazioni. Questi dati saranno utili per il confronto con i nuovi impianti.

E' stato quindi eseguito, in collaborazione con il Politecnico di Milano, un monitoraggio della situazione attuale in due delle zone selezionate (via Roma e in Piazza Italia a Marcallo). Nella seguente Figura 278 un esempio dei rilievi fatti in Piazza Italia: la luminanza della facciata della chiesa di S. Nazario e Celso.



Figura 278. Misure videofotometriche

Sono stati prodotti diversi elaborati, tra cui la progettazione del nuovo impianto della Piazza Italia fatta dal Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano e un documento ASSIL (associazione di categoria dei produttori di illuminazione), che presenta, per le singole zone campione, una rosa di possibilità tecnologiche evidenziando di ognuna caratteristiche e costi.

È stata in parallelo analizzato il tema della progettazione dell'illuminazione delle città in sè. L'obiettivo è quello di sviluppare un approccio alla progettazione della luce che tenga in considerazione diversi criteri di analisi della città: da una parte l'intenzione di "progettare" l'illuminazione urbana, dall'altra il mantenimento di un progetto dell'illuminazione che prenda in considerazione tematiche di tipo funzionale che cerchino di rendere omogeneo il paesaggio urbano.

Quando si parla di illuminazione delle città, è necessario distinguere i due aspetti di illuminazione pubblica e illuminazione urbana, temi profondamente differenti, con approcci distinti, nell'ambito del progetto di illuminazione degli spazi pubblici esterni. Per illuminazione pubblica, si intende l'illuminazione funzionale di uno spazio esterno che si pone come obbiettivi la rispondenza alla normativa tecnica e ai relativi parametri raccomandati. Con l'espressione "illuminazione urbana", ci si riferisce ad una tematica molto più ampia in quanto materia che comprende varie discipline.

Vi è compreso sia il mondo della luce, sia il mondo dell'urbanistica (la comunicazione tra spazi urbani, la valorizzazione storica ed estetica, la ricomposizione degli spazi urbani e la riqualificazione urbana, il problema dell'emergenza energetica che porta a riconsiderare l'illuminazione delle città come "esteticamente sostenibili").

Analizzando l'illuminazione delle città italiane, si intuisce come in generale i progetti di illuminazione vengono realizzati prendendo in considerazione soltanto il concetto di illuminazione pubblica, pensando cioè che la luce all'interno delle città debba essere sottoposta soltanto alla regolamentazione normativa, trascurando le potenzialità che la luce ha nel momento in cui essa viene vista non come elemento esclusivamente funzionale o tecnico, ma come elemento che permette alla città di riacquistare un'identità durante la notte, di essere modellata, vestita, legata nelle sue parti, etc. La luce è infatti in grado di restituire durante la notte la forma stessa della città, permettendo la percezione di quegli elementi essenziali che compongono il paesaggio urbano, rendendo la città riconoscibile nelle sue caratteristiche essenziali.

Un elemento fondamentale da richiedere ad un progetto di illuminazione urbana è quindi che si pensi al progetto partendo da un'idea di insieme della città, considerando non solo una serie di elementi cardine, ma anche il loro contesto e i loro legami con le varie parti della città, in modo che il progetto di illuminazione urbana possa, nel rispetto delle normative tecniche esistenti, avere la forza di dare un'identità alla città notturna, considerando quindi non solo i singoli elementi che la compongono, ma analizzando anche le logiche di coesione che ci sono tra le varie parti di essa. Questo aspetto è fondamentale, in quanto essendo la città un organismo, esso non può essere diviso in parti, ma ogni elemento deve essere riconoscibile e vivere in funzione dell'altro, e viceversa.

L'impianto di illuminazione pubblica deve innanzitutto garantire le condizioni di visibilità per la sicurezza, la scorrevolezza ed il comfort di marcia per gli automobilisti, e l'attraversamento pedonale. Tra le tipologie di strade o aree cambia la funzione e di conseguenza il tipo di illuminazione applicabile. Nelle aree con prevalente o esclusivo traffico pedonale ad esempio è fondamentale: assicurare la sicurezza ai cittadini in relazione agli incidenti stradali, sia per gli atti criminosi (scippi, aggressioni, atti vandalici...); consentire ai pedoni il riconoscimento dell'ambiente in cui si trovano; realizzare, nelle aree commerciali e verdi e nei centri storici le condizioni per cui il pedone possa apprezzare il contesto ambientale/architettonico che lo circonda.

Gli obiettivi fondamentali da perseguire nel progetto illuminotecnico delle aree urbane sono:

- integrazione del sistema di illuminazione nel contesto urbano;
- riduzione dell'impatto economico, energetico ed ambientale.

Gli strumenti di cui ci si può avvalere sono:

- metodologie adeguate per la stesura dei PRIC;
- strumenti innovativi per l'analisi ed il progetto;
- tecnologie avanzate per la gestione ed il controllo degli impianti e per l'impiego della luce come strumento di comunicazione;
- collaborazione tra architetti, urbanisti ed enti locali.

Tra i requisiti principali tecnico funzionali nelle aree urbane si devono considerare: l'illuminamento orizzontale sulla strada; l'illuminamento semicilindrico all'altezza dei visi; l'illuminamento delle facciate degli edifici; la limitazione dell'abbagliamento; la resa cromatica e la tonalità della luce; la limitazione dell'ingresso della luce attraverso le finestre; caratteristiche estetiche dell'installazione ed inserimento nel contesto urbano; la limitazione dell'inquinamento luminoso; il contenimento dei consumi energetici.

E' inoltre necessario distinguere le applicazioni illuminotecniche da effettuare in funzione della tipologia di ambiente urbano da illuminare: stradale; piazze; facciate di palazzi e monumenti; grandi aree; fontane e piscine; parchi e giardini.

La metodologia proposta suggerisce un'interazione di criteri oggettivi e soggettivi per uno sviluppo coerente, sostenibile e a "misura di città" dell'illuminazione urbana, come schematizzato in Figura 279.



Figura 279. Schema rappresentativo delle fasi progettuali da affrontare per un intervento di illuminazione urbana

Da un punto di vista progettuale, si tratta di tradurre metodologicamente quanto verificato analiticamente tramite opportune campagne di misura: ovvero si tratta di capire come le nostre città abbiano spesso un limite sempre meno visibile, ovvero come sono capaci di variare negli spazi aperti. Questi mutamenti acquisiti dalla città, che talvolta non sono immediatamente visibili, si trasformano nella matrice della metodologia di progettazione degli ambienti illuminati. In queste condizioni, è necessario affrontare attraverso uno schema di progettazione analitico e un'integrazione di tutti gli elementi il progetto illuminotecnico degli spazi urbani, in modo da ottenere dei risultati che soddisfino requisiti funzionali ed estetici, tenendo conto in modo appropriato dei parametri tecnici quali il controllo dell'inquinamento luminoso o il risparmio energetico.

La metodologia individuata, in collaborazione con l'Università di Roma, è stata applicata come esempio alla Piazza Italia di Marcallo. La scelta degli impianti da realizzare è affidata ad una Commissione, che comprendeva un rappresentante di varie realtà: Comune di Marcallo con Casone – Presidente della Commissione di gara; Società E.E.S.CO srl; Politecnico di Milano; professionista del territorio ed ENEA.

Il Comune ha quindi scelto la via del "Concorso di Idee", che si è concretizzata nel "BANDO CONCORSO DI IDEE PROGETTAZIONE ESECUTIVA FINALIZZATA ALLA REALIZZAZIONE DI ALMENO UN IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI MARCALLO CON CASONE" allegato alla deliberazione G.C. n.144 del 05/08/2010. La scadenza del bando era il 4 ottobre 2010.

Nel bando erano definite le regole in base a cui scegliere le soluzioni impiantistiche: non il tipico "minor costo iniziale" quindi, ma criteri di solidità societaria e criteri tecnici specifici per le zone:

- Potenza nominale installata
- Costi di gestione annui (divisi in consumi e manutenzione)
- Valenza architettonica aspetto estetico
- Resa cromatica
- Telegestione
- Regolazione punto/punto
- Durata garanzia
- Vita media convenzionale del sistema
- Costi di realizzazione (progettazione, fornitura, posa).

Una considerazione importante. Oltre al bando, che propone tecnologie innovative di mercato, si prevedeva di installare anche dispositivi sperimentali frutto della ricerca svolta nel quadro dell'Accordo di Programma, ad esempio la nuova Stapelia, ma non è stato possibile. Il bando stesso è comunque una azione innovativa, che aiuta a definire modelli da replicare in altre situazioni simili. Come tale, certamente va perfezionato e ci si propone di farlo nel proseguimento delle attività.

C.1 L'inquinamento luminoso

Un'altra attività sperimentale svolta a Marcallo, nei suoi aspetti teorici e di preparazione della campagna di misura, è uno studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradali ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto. Obiettivi delle ricerche erano:

- confrontare, a parità di caratteristiche prestazionali, l'impatto ambientale di diverse tipologie di impianti di illuminazione stradale;
- proporre parametri per la classificazione degli impianti riguardo alla luce dispersa verso l'alto (inquinamento luminoso) in base alle loro prestazioni normative e localizzazione sul campo;
- proporre un algoritmo di previsione dell'impatto ambientale di un impianto in base alle caratteristiche quantitative prima definite.

Seguendo le indicazioni della letteratura scientifica internazionale e in particolare quelle del comitato tecnico CIE TC4.21, un'analisi completa richiede lo studio di impianti di illuminazione non schermati da edifici (rurali) e impianti schermati dagli edifici (urbani).

L'attività ha visto la selezione di una specifica situazione impiantistica e geografica nel Comune di Marcallo con Casone, è stata scelta una strada extraurbana a doppio senso di marcia sufficientemente isolata dall'abitato, per evitare disturbi da luci estranee, e con la presenza di strade alternative che ne permettono la chiusura al traffico, per il periodo delle prove, senza causare disguidi di rilievo.

La presenza di un tratto rettilineo permette l'installazione ad hoc di 5 apparecchi su pali telescopici mobili, di illuminazione e lo spegnimento dell'eventuale impianto esistente.

E' stata completata l'analisi bibliografica sulla compatibilità energetica ed ambientale degli impianti di illuminazione esterna e delle norme e delle leggi in materia. Sono stati quindi individuati gli apparecchi adatti allo studio:

- con lampada al sodio alta pressione e vetro curvo ottimizzato;
- con lampada al sodio alta pressione e vetro piano;
- a LED modulare.

Sono stati progettati gli impianti di illuminazione dotati degli apparecchi citati e sono stati calcolati i parametri illuminotecnici.

E' stato acquisito il materiale per l'attività sperimentale. E' necessario infatti attrezzare un tratto di strada con un vero e proprio impianto funzionante e dedicato (escludendo, durante la campagna sperimentale, l'impianti eventualmente preesistenti): quindi generatore elettrico, pali mobili su ruote, materiale vario per i collegamenti elettrici, ecc..

E' stata identificata la metodologia di misura: l'impianto di illuminazione diventa, nel suo insieme, una sorgente di luce che può essere caratterizzata, in campo vicino, con la ripartizione della luminanza o a grande distanza, considerandola puntiforme, con la ripartizione dell'intensità luminosa.

Le misure devono coprire tutto l'emisfero superiore all'impianto e possono considerare l'illuminamento in una griglia di punti o la luminanza osservata da questi punti.

In particolare la misura dell'illuminamento in un punto permette di conoscere il flusso luminoso incidente nel punto prodotto da tutto l'impianto, ma a meno di operare a distanza proibitive, non permette di conoscere le direzioni di emissione di tale flusso.

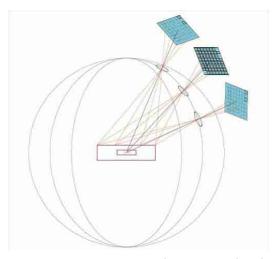
La misura della luminanza eseguita con rivelatori a immagine (ILMD-Imaging Luminance Meter Device) permette invece di ottenere questa informazione indispensabile ai fini del modello. Si tratta pertanto di realizzare, sul campo, la caratterizzazione, denominata di campo vicino (near field), di un gigantesco apparecchio di illuminazione adattando le tecniche usate in laboratorio su apparecchi "normali" ed usate da INRIM per la caratterizzazione degli apparecchi di illuminazione.

La possibilità di operare su un solo impianto di ridotte dimensioni completamente isolato permette la possibilità di una completa mappatura dell'illuminamento su una vasta area orizzontale sovrastante l'impianto e della luminanza da diverse direzioni angolari, parametro utile per individuare le direzioni di diffusione del flusso luminoso verso l'alto.

Inizialmente era stato valutato l'uso di elicotteri radiocomandati con carico utile di circa 5 kg per portare il dispositivo di misura, in volo stazionario a diverse quote, ma questo si è rilevato impossibile per le difficoltà di controllo della posizione e dell'assetto di un velivolo potenzialmente al buio e relativamente piccolo rispetto alla distanza di visione del pilota.

Sono state quindi valutate soluzioni alternative e si è deciso di utilizzare un prototipo a vela che permette basse velocità di movimentazione unite a una buona manovrabilità e controllo della quota.

Non appena gli apparecchi di illuminazione saranno disponibili, sarà avviata la campagna di misura.



Misurazione in campo vicino di un apparecchio di illuminazione con ILMD. La superficie luminosa dell'apparecchio (in rosso al centro della sfera) viene misurata dall'ILMD (in turchese) preservando la conoscenza della direzione di emissione per via del sistema ottico (in verde).

D. Trasferimento tecnologico e diffusione verso realtà territoriali ed ESCO

E' stato lanciato il Progetto Lumière. Il progetto è volto a tutelare e coadiuvare lo sviluppo economico sostenibile, attraverso la promozione di azioni ed attività di supporto a coloro i quali, per le loro aree territoriali di competenza, ne sono i programmatori ed i diretti responsabili: i Comuni.

Traguardo del Progetto è quello di agevolare ed instradare i Comuni a realizzare interventi di riqualificazione energetica dei propri impianti d'illuminazione delineando appositamente per loro un percorso, tecnologico ed economico-finanziario



standardizzato, nel quale confluiscano gli aspetti tecnologici, economici, finanziari e contrattuali che intervengono ed interagiscono nei processi di riqualificazione. La delineazione del percorso comporta lo sviluppo, l'elaborazione, la sperimentazione e la diffusione di un Modello d'illuminazione pubblica efficiente da assumere a riferimento per la realizzazione degli interventi e più in generale per l'assunzione di competenza da parte degli amministratori comunali.

Il Modello, che sarà strutturato nella forma di Linee Guida, sarà suddiviso in 2 parti:

- Linee Guida Tecnologiche (Modello Tecnologico): La Piattaforma, applicata alla realtà di un Comune scelto quale Paese Pilota, rappresenterà il Modello Tecnologico di riferimento, studiato appositamente per le realtà comunali affinché lo possano facilmente replicare, essendo in questo modo incentivate ed agevolate ad intraprendere percorsi di riqualificazione dei loro impianti.
- Linee Guida Economico/Finanziarie (Modello Economico-Finanziario): si riferiscono agli aspetti cognitivi, economici, finanziari e contrattuali che dovranno essere affrontati dal Comune interessato ad intraprendere il percorso di riqualificazione del proprio impianto.

Le Linee Guida, una volta strutturate, verranno inviate a tutti i Comuni che avranno aderito al Progetto e presentate nell'ambito di Workshop appositamente organizzati al fine di trasferire ai referenti comunali del settore le dovute conoscenze e competenze.

Nel corso della seconda annualità:

 è stata creato un Network dei Comuni quale punto d'incontro tra l'attività di ricerca e le amministrazioni comunali, con l'obiettivo di movimentare molte competenze territoriali e contribuire fortemente alla diffusione del progetto sul territorio; vi rientrano Provincie, Associazioni di Comuni ed Associazioni dedicate al supporto degli Enti locali;

- è stato creato un Gruppo di Lavoro (GdL) di Operatori ESCO (Energy Service Company) per definire gli standard di riferimento in termini di audit energetici, criteri di valutazione degli interventi, forme contrattuali e per delineare il percorso cognitivo, economico e finanziario verso la riqualificazione; vi partecipano realizzatori, gestori, manutentori degli impianti e fornitori dei servizi energetici per la PA;
- è in corso di realizzazione un primo Audit Energetico gratuito da parte di Agesi, al fine di promuovere e facilitare l'incontro tra l'offerta delle ESCO e la domanda dei Comuni;
- sono state organizzate attività di diffusione e formazione;
- è stata creata la struttura per un Database degli audit energetici realizzati;
- è iniziata la raccolta, mediante 2 apposite schede, dei dati relativi agli impianti d'illuminazione dei Comuni aderenti al Network;
- è stato creato un Sito web (www.progettolumiere.enea.it) dedicato quale punto d'incontro ed interscambio delle conoscenze e competenze tecnico-scientifiche tra i promotori della sostenibilità coinvolti direttamente o indirettamente nel settore dell'illuminazione pubblica.

Gli accordi ad oggi stipulati sono i seguenti¹¹:

- o Network dei Comuni:
 - La Provincia della Spezia (32 Comuni)
 - La Provincia di Viterbo (46 comuni su 60)
 - L'Associazione Cittaslow (68 comuni presenti su tutto il territorio italiano)
 - L'Associazione Comuni Virtuosi (40 comuni iscritti, presenti sul territorio italiano)
 - La Provincia di Monza e Brianza (45 Comuni)
- Network delle ESCO:
 - AGESI

Nell'ambito della Convenzione (ENEA_CONSIP_MEF) è stata particolarmente significativa la collaborazione con Consip con l'obiettivo di favorire, nel settore pubblico, comportamenti efficienti sotto il profilo energetico.

L'attività proseguirà ampliando i Database, il Network e il Gruppo di Lavoro ESCO già creati, diffondendo quindi il Modello sulla base anche delle realizzazioni pilota e aggiornando le Linee Guida in funzione dell'evoluzione tecnologica e non del settore e preparazione verso la trasformazione futura dei Comuni in potenziali Smart Cities, città del futuro aspiranti ad una sostenibilità a 360°. In funzione della consistenza delle informazioni raccolte dal Network, si vuole arrivare anche all'elaborazione di uno studio e conseguente diagnosi sullo stato dell'arte dell'illuminazione pubblica dei Comuni italiani grazie ai dati rilevati.

E. Attività prenormativa e normativa

ENEA ha partecipato, come già in passato e con l'intenzione di continuare in futuro, a diversi tavoli tecnici in campo nazionale e internazionale:

- Gruppi di lavoro UNI su illuminazione di interni, di esterni (include gallerie e regolatori di flusso luminoso), efficienza energetica in illuminazione
- Commissione tecnica UNI U29 "Luce e illuminazione"
- Gruppo di lavoro CEI GdL4 "Sistemi di illuminazione"
- supporto al MSE per le attività a livello europeo sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica nel settore illuminazione
- attività CIE su illuminazione pubblica e inquinamento luminoso (a livello non ancora formalizzato per riorganizzazione interna del comitato nazionale)

A livello europeo è stato svolto un nuovo studio preparatorio per nuove misure di implementazione della Direttiva Ecodesign, riguardante lampade direzionali e apparecchi per uso domestico. Su questo studio sta iniziando la discussione con gli stakeholders ed ENEA sta partecipando.

Sui Regolamenti di Ecodesign già usciti, il 245/2009 e 244/2009, sono stati pubblicati 2 emendamenti, riguardanti aspetti tecnici di prodotto, su cui anche ENEA è stata chiamata a dare consulenza al MSE.

354 Volume II

.

¹¹ Sono in corso contatti con altri enti locali: Comuni che fanno parte del Patto dei Sindaci, Provincia di Trento, Provincia di Trento, Comuni che fanno parte di Associazione Agenda 21. Sono inoltre in fase di completamento dei nuovi accordi con Enti che svolgono attività di promozione della sostenibilità ambientale a favore, in primis, degli enti locali quali ANCI, Ancitel, PROMO PA.

Inoltre nell'estate 2010 la Commissione Europea ha chiesto agli Stati Membri un'opinione sulla validità di continuare le politiche "di prodotto", oppure allargare il campo di azione a politiche "sull'impianto". ENEA, per dare una risposta condivisa a MSE, ha svolto una indagine coinvolgendo produttori, lighting designers, università, professionisti, ecc. e la risposta, in linea con il pensiero di ENEA, è che l'impianto installato correttamente, in funzione delle esigenze dell'utilizzatore è un costituente essenziale per realizzare vera efficienza energetica, molto più della scelta di prodotti intrinsecamente ottimi ma slegati dal contesto.

A livello italiano i lavori in UNI hanno portato a progetti di norme o a revisione di norme esistenti. I principali argomenti: regolatori di flusso luminoso, illuminazione delle gallerie (rev. UNI 11095), illuminazione di luoghi di lavoro in interni (rev. UNI 12464-1), illuminazione stradale – selezione categorie illuminotecniche (rev. UNI 11248), LED (UNI 11359).

In ambito CEI nel novembre 2009 si è costituito il nuovo gruppo di lavoro "Sistemi di illuminazione", che porterà a linee guida per la progettazione di impianti efficienti in interni e in esterni. In ambito CIE infine sono stati seguiti i lavori principalmente sull'inquinamento luminoso.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO

INDACO ha contribuito alla definizione delle specifiche di sviluppo del software per progettazione illuminotecnica mirata all'efficienza energetica [Ob. A]. Ha contribuito alla ricerca sperimentale su prodotti innovativi, sviluppo di sistemi di controllo intelligenti, misure di laboratorio, fornendo linee guida per lo sviluppo di nuovi prodotti con sorgenti LED innovative, benchmarking dei prodotti di sensoristica e controllo per l'illuminazione pubblica, misure fotometriche su apparecchi per l'illuminazione pubblica [Ob.B]. Ha curato la progettazione della illuminazione pubblica di uno caso studio (Piazza Italia) presso il comune di Marcallo con Casone (MI) ed eseguite misure fotometriche sul campo per analizzare la situazione esistente [Ob. C].

Università di Milano, Dipartimento di Informatica e Comunicazione

L'Università di Milano ha perfezionato il formato di interscambio per dati illuminotecnici, con attenzione alle caratteristiche del caso studio (Piazza Italia a Marcallo). Ha implementato un modulo software per la conversione del formato di interscambio nel formato del motore di rendering Ogre. Ha realizzato un applicativo software per il caricamento e visualizzazione interattiva in modalità stereoscopica di simulazioni di illuminazione pubblica del caso studio considerato e realizzerà un evento presso il Teatro Virtuale dell'Università di Milano [Ob. A].

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Fisica Tecnica (UniRoma1)

UniRoma1 ha eseguito test e confronto di software commerciali, riconosciuti dalla comunità scientifica e piattaforma in sviluppo e ha prodotto lo stato dell'arte su metodi innovativi di ottimizzazione [Ob.A]. Ha prodotto una analisi dello stato dell'arte degli attuali sistemi innovativi di illuminazione (LED) e sui metodi normativi, prenormativi o standardizzati per caratterizzazione fotometrica [Ob.B]. Ha proposto una metodologia di progettazione innovativa, basata sull'integrazione di parametri tradizionali, attuali, innovativi .

Università di Roma TRE, Dipartimento di Informatica e Automazione (UniRoma3)

Il lavoro, condotto in strettissima collaborazione con ENEA, è consistito nell'individuazione di una architettura intelligente per ottimizzare la gestione del flusso luminoso punto-punto di una strada sulla base di una sensoristica in linea e modelli che si adattano continuamente ai cambiamenti del profilo di utenza. Tale struttura ha lo scopo di tendere alla minimizzazione dei consumi e massimizzazione della utilità percepita dagli utenti che sono sia veicoli (automobili, motociclette, biciclette) che pedoni [Ob. B].

Comune Marcallo Con Casone (accordo di partenariato a costo zero)

Il Comune di Marcallo con Casone è il partner presso cui si svolge l'intervento e sarà quindi il primo beneficiario in termini di efficienza energetica. Il Comune di Marcallo con Casone ha messo a disposizione l'area comunale in cui realizzare l'intervento, identificato i requisiti di utilizzo e si farà carico della progettazione esecutiva e della realizzazione degli impianti. Inoltre il Comune ha fornito a ENEA informazioni dettagliate sulla situazione esistente, per permettere la diagnosi energetica. Dovrà inoltre consentire che ENEA e gli altri partner effettuino l'attività sperimentale (monitoraggio prestazioni, analisi consumi, valutazioni dell'utenza...) sugli impianti installati, per la diffusione dei risultati del progetto [Ob. C].

Associazione Nazionale Produttori Illuminazione (ASSIL) (accordo di partenariato a costo zero)

Il compito primario di ASSIL è quello di fornire ad ENEA una fotografia delle tecnologie ad oggi disponibili che concorrono a realizzare impianti efficienti. Le aziende Associate, per tramite di ASSIL, hanno messo a disposizione di ENEA informazioni relative alle migliori tecnologie disponibili. Inoltre ASSIL concorre alla pubblicizzazione del progetto attraverso il suo settore di Marketing e Comunicazione. Partecipa al Network degli Stakeholders e alla cabina di regia [Ob. C].

AIDI Associazione Italiana di Illuminazione

All'interno della collaborazione ENEA-AIDI-INRIM, AIDI mette a disposizione le competenze nel settore dell'illuminazione pubblica a livello scientifico e normativo, acquisite attraverso la partecipazione all'attività della CIE e degli enti normatori internazionali, per definire un programma di ricerca atto a determinare i criteri progettuali ed impiantistici per ridurre l'impatto energetico ed ambientale degli impianti di illuminazione. Ha analizzato le prescrizioni impiantistiche previste dalle leggi a livello sia energetico sia ambientale, valutandone le conseguenze, in modo da poter concordare l'attività sperimentale con conoscenza di causa, ha proposto una selezione di apparecchi di illuminazione del mercato atti a realizzare le caratteristiche fotometriche individuate, ha effettuato la progettazione degli impianti di illuminazione, con lo scopo da un lato di verificare a priori la conformità a leggi e norme e dall'altro di evidenziare le caratteristiche fotometriche da misurare ai fini degli obiettivi della ricerca. Dopo le misure, AIDI con INRIM analizzerà la variazione della luminanza limite nella zona in relazione al tipo di impianto ed alle misurazioni eseguite sugli stessi. AIDI parteciperà a tutte le attività comuni, in particolare alla comunicazione a livello internazionale tramite pubblicazioni e all'attività della CIE [Ob. C].

I.N.RI.M. Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

E' una attività congiunta ENEA-AIDI-INRIM. INRIM ha fornito il suo contributo, frutto del proprio know-how e dell'esperienza maturata nella caratterizzazione e valutazione dell'impatto ambientale di impianti di illuminazione al fine di individuare il luogo e la strada più opportuna per gli esperimenti, le modalità operative e realizzative degli impianti e la metodologia di misura degli stessi. Ha specificato i parametri misurati e le modalità di misura degli stessi, prevedendo una campagna di misura sul luogo, preceduta da un sopralluogo durante il quale sono state eseguite una serie di misure preliminari. Per ogni impianto realizzato in ambito rurale vengono misurati i parametri prestazionali previsti dalla normativa, valutato il flusso luminoso disperso verso l'alto e misurato il comportamento energetico. Sono eseguite anche simulazioni numeriche rd ed individuato un modo per valutare la correttezza della stima del contributo all'inquinamento luminoso dell'impianto. INRIM contribuirà alla diffusione dello studio nelle sedi istituzionali e scientifiche di competenza [Ob. C].

Oxytech s.r.l. (accordo di partenariato a costo zero)

Oxytech s.r.l. ha messo a disposizione gratuitamente il programma Litestar. Ha coordinato l'inserimento delle varie funzioni, sviluppate da altri soggetti sotto la supervisione di ENEA, nel suo sistema. Ha sviluppato l'interfaccia di programmazione per inserire tali funzioni. Predispone la versione definitiva ed i tools di installazione ed aggiornamento [Ob: A].

Color Consulting s.r.l.:

Ha avuto un incarico finalizzato all'integrazione di una serie di nuove funzionalità all'interno del software Litestar per la modellazione, progettazione assistita, controlli e gestione di impianti illuminotecnici in ambienti esterni urbani [Ob. A].

OMEGA IMPIANTI snc

Omega Impianti ha progettato l'elettronica di controllo dei moduli fotovoltaici, in funzione della diversa orientazione degli stessi e della variabilità delle modalità di captazione della radiazione solare, della conversione elettrica e della funzionalità dell'accumulo. Ha progettato il nuovo elemento illuminante a LED, su disegno fornito da ENEA. Ha ingegnerizzato un prototipo di quanto progettato (foglia con LED, sistema di controllo e caricabatteria...). Si occuperà dell'assemblaggio dell'intera STAPELIA su struttura e con moduli fotovoltaici forniti da ENEA [Ob.B].

Provincia della Spezia, Provincia di Viterbo, Associazione Cittaslow, Associazione Comuni Virtuosi, Provincia di Monza e Brianza: accordi di Partenariato a costo zero) per lo sviluppo del Network Lumière [Ob. D]. L'iscrizione al Network comporta:

- collaborazione alla creazione di un punto di confluenza tra i soggetti pubblici e privati e le conoscenze e/o
 competenze tecnico scientifiche del settore per condividere le problematiche e le soluzioni individuate per
 la realizzazione d'interventi di riqualificazione energetica nell'illuminazione pubblica;
- raccolta e condivisione dei dati sensibili relativi all'illuminazione pubblica dei Comuni, omnicomprensivi di eventuali audit energetici effettuati e successivi risultati.

Da parte sua ENEA s'impegna a definire un modello d'illuminazione pubblica efficiente strutturato ad hoc per le amministrazioni comunali, a mettere a disposizione dei Comuni le linee guida per la realizzazione del modello identificato, ad organizzare un corso gratuito per i referenti comunali del settore ed a condividere le competenze e/o conoscenze acquisite durante la realizzazione del Progetto".

AGESI (accordo di partenariato a costo zero)

AGESI ha collaborato alla redazione delle Linee Guida economico-finanziarie [Ob.D].

Sviluppo di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici su scala territoriale e urbana

I dati relativi alla domanda di energia in Italia attestano l'importanza del ruolo dei settori residenziale e terziario. Attualmente, la principale domanda di energia relativa a tali settori è quella per la climatizzazione degli ambienti, ma è possibile intravedere, come previsione nel breve e medio termine, una sempre maggiore importanza della domanda di elettricità (per illuminazione, apparecchiature e condizionamento degli ambienti) a fronte di una contrazione della domanda per il riscaldamento.

Inoltre, tutti i programmi e gli obiettivi di carattere nazionale, comunitario o globale in tema di politica energetica hanno alla base una drastica riduzione dell'uso delle fonti di energia fossile, un netto incremento dell'efficienza energetica e una graduale ma costante integrazione dell'uso di fonti di energia rinnovabile localmente disponibili. Tutto ciò comporta benefici diretti in termini di uso più razionale delle risorse energetiche, contenimento del cambiamento climatico e attenuazione dei fenomeni di inquinamento.

Oltre a ciò, vanno poi considerati gli effetti del processo di liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica, con conseguente moltiplicazione delle offerte e dei profili tariffari possibili per le forniture elettriche.

Quanto descritto mette in evidenza la necessità di definire obiettivi e promuovere iniziative concrete in grado di agire in maniera efficace e sinergica sui tre principali "assi" del sistema energetico, ovvero: riduzione della domanda di energia; ottimizzazione del sistema di generazione e trasmissione dell'energia mediante l'uso di tecnologie altamente efficienti e l'integrazione di fonti di energia rinnovabile localmente disponibili grazie alla generazione/cogenerazione distribuita, ove possibile; implementazione di strumenti di controllo e gestione avanzati utili ad eliminare gli sprechi e a combinare perfettamente i diversi tipi e di domanda e di generazione energetica (tecnologie, risorse, taglie ecc).

Le azioni così definibili coinvolgono necessariamente una scala più ampia e più complessa rispetto a quella del singolo edificio; la dimensione del distretto potrebbe essere il giusto "modulo" per l'effettiva implementazione di un nuovo paradigma energetico. Nella direzione verso il cambiamento possono essere implementate diverse strategie "tampone" o di carattere transitorio, ma il cambiamento di paradigma presuppone una vera e propria rivoluzione radicale dell'attuale sistema energetico. Per risultare efficace, la rivoluzione deve essere ben progettata e supportata da diversi strumenti: norme, infrastrutture, mercato, politiche, tecnologie, cultura, formazione ecc.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il presente tema di ricerca si prefigge di raggiungere l'obiettivo della promozione e diffusione di tecnologie efficienti attraverso la definizione di realizzazioni dimostrative di distretto energetico altamente replicabile a livello nazionale, lo sviluppo di strumenti che incentivano una loro ampia presenza nel mercato delle tecnologie e il supporto per la implementazione delle norme e delle specifiche tecniche che implementino le direttive europee in tema di usi finali dell'energia (direttiva 2005/32/EC sui requisiti di ecodesign dei prodotti che utilizzano energia e 92/75/CEE sull'etichettatura energetica degli elettrodomestici).

Il progetto si articola in due fasi. La prima fase consiste in uno studio preparatorio e mira ad una ricognizione degli strumenti finanziari ed innovativi per applicare, promuovere e diffondere il modello della generazione distribuita e l'efficienza energetica anche attraverso la modellazione di una ESCo sperimentale pubblico-privata; essa si articola su tre obiettivi principali di seguito illustrati:

- ricognizione dell' attuale situazione delle ESCo, dei settori di mercato più interessanti, delle tecnologie disponibili e di quelle da sviluppare, della normativa e della contrattualistica di riferimento, delle strategie per la costituzione di un partenariato pubblico-privato;
- ricognizione e analisi di strumenti finanziari innovativi da impiegare per la realizzazione di interventi esemplari sul modello di generazione distribuita al fine di raggiungere obiettivi di politica energetica ambientale legata allo sviluppo territoriale;

 definizione di un modello per l'assetto societario pubblico-privato della ESCo sperimentale attraverso la scelta di strumenti metodologici e finanziari appropriati, l'identificazione del network di aziende ed infine la definizione dell'ambito operativo territoriale (centrale o locale).

La seconfa fase prevede invece la definizione di metodi di valutazione oggettiva per il controllo della conformità del mercato, incluso la creazione di laboratori di prova; studio di strumenti di pianificazione e di finanza innovativi, per applicare, promuovere e diffondere gli interventi per l'uso efficiente dell'energia; sviluppo e realizzazione dei primi esemplari dimostrativi. Questa fase si articola in quattro obiettivi principali, che prevedono le seguenti azioni:

- definizione, acquisizione e sviluppato delle tecnologie ed dei prodotti necessari per la realizzazione delle attività. Sviluppo del know how tecnologico necessario alla accurata progettazione di edifici e reti energetiche (ecobuildings, power parks e smart grids) e dei sistemi necessari alla loro gestione ottimale sotto molteplici punti di vista (costi di investimento e di gestione, impatto ambientale, obiettivi produttivi e comfort, efficienza energetica, qualità della fornitura;
- definizione elementi di valutazione oggettivi in sede di analisi e valutazione delle norme che implementino le direttive europee in tema di usi finali dell'energia (requisiti di ecodesign e etichettatura energetica);
- le tecnologie, le architetture energetiche e gli assetti contrattuali e finanziari sono qualificati attraverso una realizzazione esemplare (es: un insediamento nel terziario o nel residenziale). Tale dimostrativo avrà visibilità nazionale per il carattere tecnologicamente innovativo delle soluzioni adottate ed i risultati verranno ampiamente diffusi nei contesti scientifici e tecnologici e messi a disposizione del network di aziende e Pubblica Amministrazione impegnate in progetti per favorire la diffusione delle tecnologie per l'efficienza energetica;
- esecuzione di valutazioni preliminari tecnico-economiche e di uno studio di fattibilità per l'implementazione di una test facility per reti di distribuzione in presenza di una significativa energia prodotta da fonti non programmabili. Progettazione e realizzazione della test facility, da mettere a disposizione a livello nazionale, per lo svolgimento di campagne sperimentali su componenti e sottosistemi per la generazione distribuita e per lo sviluppo di tecnologie e conoscenze relativamente alle reti di distribuzione attive.

La seconda annualità nello specifico prevede i seguenti obiettivi:

A. Sviluppo di specifiche per la progettazione ecocompatibile: definizione metodi e acquisizione strumentazione tecnico-scientifica

Scopo dell'obiettivo è adeguare la normativa nazionale alla legislazione europea e mettere a disposizione del legislatore le informazioni (dati di mercato, specifiche/informazioni tecnologiche e metodologie di valutazione) necessarie alla valutazione della convenienza delle soluzioni impiegabili: requisiti minimi, etichettatura, meccanismi di incentivazione e di tariffe. L'attività si articola attraverso tre principali azioni:

- redazione di specifiche tecniche per i nuovi prodotti ed implementazione della legislazione europea (principalmente i Regolamenti attuativi della 2005/32/CE e le direttive applicative della 92/75/CEE), attraverso la negoziazione nelle opportune sedi e con gli altri Stati Membri, inclusi i livelli di consumo (benchmark) e l'effetto del comportamento degli utenti a livello europeo e nazionale, distinti per: tipologia di prodotto, zona climatica (ove pertinente), le condizioni d'impiego, la percentuale di possesso, lo sviluppo tecnologico (ipotizzabile);
- analisi del mercato nazionale e del modo di impiego dei prodotti da parte del consumatore finale per valutare il livello di trasformazione del mercato raggiunto per l'efficienza energetica dovuto all'applicazione della legislazione di cui sopra;
- controllo della conformità del mercato (corretta applicazione della legislazione) e dei prodotti soggetti a legislazione comunitaria attraverso l'adeguamento/creazione dei laboratori per le prove di qualifica stesse e la definizione dei nuovi metodi di misura (standardizzazione) a livello mondiale, europeo e nazionale, per verificare la rispondenza dei modelli sul mercato con la legislazione anche alla luce degli sgravi fiscali (o altra forma di incentivazione economica o azione di green procurement) che a livello paese sono concessi a prodotti particolarmente efficienti.

B. Creazione di una rete di laboratori italiani in grado di effettuare verificare la conformità degli apparecchi ai requisiti di Ecodesign

L'attività consiste nel costruire un insieme di protocolli di prova e di criteri minimi per i laboratori che intenderanno eseguire test di verifica della conformità ai Regolamenti di Ecodesign e alle Direttive di Etichettatura

Energetica. Viene avviata un'attività di formazione e di comunicazione sui protocolli stessi ai laboratori che rispondono ai requisiti minimi richiesti.

L'attività, inoltre, contribuisce all'implementazione e al controllo dell'etichettatura energetica e dei requisiti di ecodesign per gli apparecchi domestici negli Stati Membri (Rif. Progetto EU ATLETE Appliance Testing for Energy Label Evaluation, IEE-08-728) e mira a dimostrare che la sorveglianza del mercato e i test di conformità possono essere realizzati in modo sistematico ed efficace senza eccessivi costi, quale momento fondamentale della trasformazione del mercato verso l'eco-efficienza e a supporto dei consumatori, dei produttori e dell'ambiente.

Questa procedura comprende due fasi principali: definizione di protocolli di selezione e di criteri minimi per la scelta dei laboratori di prova; definizione dei criteri di campionatura per la selezione dei modelli di apparecchi da sottoporre a test.

C. Studi e progettazione di interventi dimostrativi per l'applicazione del modello di energia distribuita

Studio di fattibilità per la realizzazione di una "soluzione tecnologica energeticamente efficiente" applicabile a scala territoriale e urbana. Progetto preliminare e simulazione dinamica per la definizione di alcuni indicatori quali consumi, costi di investimento e gestione/manutenzione, costi del combustibile, per determinare il corrispondente incremento di efficienza energetica, i tempi di ammortamento_oltreché strumenti di finanziari più idonei per la realizzazione. Analisi e validazione, tramite codici di simulazione (ODESSE, TRNSYS), di metodologie connesse alla contabilizzazione dei risparmi energetici con specifico riferimento alla tecnologia oggetto del dimostrativo (azione di supporto tecnico alla definizione di procedure semplificate per la compilazione di schede standard).

Studio di fattibilità per un'applicazione di un esemplare di rete elettrica di distribuzione caratterizzata da una significativa percentuale di energia prodotta da fonte non programmabile, da impiegare in un prossimo futuro come *test facility* per la sperimentazione di prodotti specifici per l'energia distribuita e, eventualmente, anche come laboratorio per la prequalificazione di componenti e sottosistemi per strutture di rete non solo passive.

D. Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione dinamica dei distretti energetici ad alta efficienza

Sviluppo di modelli di simulazione per la definizione di strategie finalizzate alla riduzione e alla ottimizzazione quantitativa e qualitativa della domanda di energia dei distretti. Tali modelli sono necessari per lo studio dell'interazione dinamica tra domanda e generazione di energia, termica ed elettrica, nelle reali condizioni di funzionamento e l'ottimizzazione della scelta delle tecnologie adottate e della gestione della domanda/ generazione energetica e consentono una più accurata valutazione degli incrementi di efficientamento e di conseguenza una più robusta valutazione dei tempi di ammortamento. Validazione e qualificazione dei modelli sviluppati, attraverso l'implementazione in ambiente di simulazione realistico di alcuni test-case e l'impiego di dati di consumo reali.

Viene svolta inoltre un'attività di trasferimento tecnologico verso il network delle ESCo, i principali produttori di componenti per edifici ed impianti energetici, delle principali metodologie per la valutazione di interventi di riqualificazione energetica.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Sviluppo di specifiche per la progettazione ecocompatibile: definizione metodi e acquisizione strumentazione tecnico-scientifica

Scopo del presente obiettivo è adeguare la normativa nazionale alla legislazione europea e mettere a disposizione del legislatore le informazioni (dati di mercato, specifiche/informazioni tecnologiche e metodologie di valutazione) necessarie alla valutazione della convenienza delle soluzioni impiegabili: requisiti minimi, etichettatura, meccanismi di incentivazione e di tariffe.

A.1 <u>Analisi delle proposte della Commissione Europea relative a Regolamenti di ecodesign e direttive di etichettatura per gli usi finali e predisposizione alla normativa nazionale</u>

I Regolamenti ecodesign e di etichettatura per i televisori, i frigoriferi e le lavatrici sono stati votati positivamente dagli Stati Membri nel Comitato Regolamentatore nel marzo 2009 e sono stati quindi inviati al Consiglio e al Parlamento Europeo per l'adozione finale. Purtroppo, a causa della posizione contraddittoria del Parlamento Europeo (che ha adottato la nuova etichetta per i frigoriferi, ma ha respinto quella sui televisori) e in attesa della rifusione della direttiva quadro sull'etichettatura energetica contenente indicazioni sul layout della nuova etichetta, la Commissione non ha completato l'iter per l'approvazione della tre direttive, che sono rimaste in una

situazione di stallo. Contemporaneamente sono però stati pubblicati i Regolamenti di ecodesign per i decoder semplici (2009/107/CE), gli alimentatori esterni (2009/278/CE), le lampade domestiche non direzionali (2009/244/CE, emendato dal Regolamento 2009/859/CE), le lampade fluorescenti compatte (2009/245/CE), i motori elettrici (2009/640/CE), i circolatori (2009/641/CE), i televisori (2009/642/CE) e i frigoriferi (2009/643/CE). Per questi ultimi, oltre all'inclusione delle cantinette per la refrigerazione del vino, degli apparecchi termoelettrici e di quelli ad assorbimento sono stati definiti, tra l'altro, tre fasi di requisiti minimi di efficienza, in vigore dal luglio 2010, 2012 e 2014. La prima fase stabilisce il divieto di immettere sul mercato comunitario gli apparecchi a compressione che appartengono all'attuale classe B di efficienza energetica.

Successivamente nel 2009 sono state preparate le bozze di politiche (ecodesign ed etichettatura) per gli scaldaacqua, che sono state fatte circolare per la consultazione scritta degli Stati Membri nel giugno 2010 e si ipotizza saranno portate al voto del Comitato Regolamentatore, per la sola parte ecodesign, nell'autunno 2010.

Sempre nel 2010 sono stati approvati dal Comitato Regolamentatore, ma non ancora pubblicati sulla Gazzetta Ufficiale, i Regolamenti di ecodesign delle lavatrici, lavastoviglie e ventilatori. In particolare, per le lavatrici e le lavastoviglie il principale contributo degli esperti ENEA è stato il nuovo metodo di calcolo dell'efficienza energetica, che si basa ora sul consumo annuo incluse le modalità standby. Durante la negoziazione del Regolamento per i ventilatori l'azione di ENEA, come supporto tecnico del MSE, ha portato gli altri Paesi a sostenere la posizione italiana che chiedeva di scorporare le cappe per le cucine e i condizionatori, la cui funzione principale non è la ventilazione, in attesa di Regolamenti specifici per questi prodotti.

Nel 2009-2010 sono stati inoltre discussi al Consultation Forum (che include gli Stati Membri e i rappresentanti delle parti sociali interessate) le proposte di Regolamenti di ecodesign/etichettatura per i boiler, i personal computer, i condizionatori e i frigoriferi commerciali.

Infine nel primo semestre 2010 la CE ha di nuovo chiesto il supporto italiano per la messa a punto del testo dei Regolamenti di ecodesign/etichettatura per le asciugatrici. Le lavasciugatrici e gli aspirapolvere, che saranno presentate al Consultation Forum prima della fine dell'anno.

Per quanto riguarda l'etichettatura energetica, nel 2010 sono stati nuovamente discussi gli schemi di etichettatura per frigoriferi, lavatrici e lavastoviglie, TV. Dopo l'accordo politico raggiunto fra Parlamento, Consiglio e Commissione e la pubblicazione della nuova direttiva etichettatura (2010/30/UE) e la contemporanea entrata in vigore del Trattato di Lisbona il 1 dicembre 2009, la discussione sull'etichettatura è ripresa e ha portato la Commissione a discutere con gli stakeholder e a proporre le etichette mostrate in Figura 280.

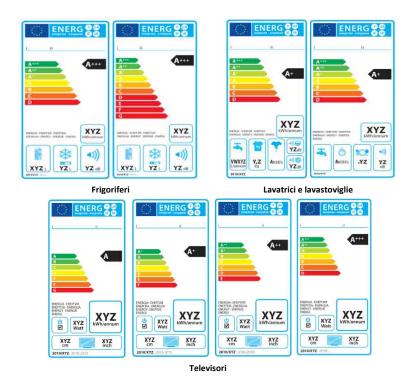


Figura 280. Nuove etichette per frigoriferi, lavatrici e lavastoviglie, televisori

L'iter di approvazione da parte Parlamento e Consiglio dei "regolamenti delegati" (che sostituiscono le precedenti direttive di implementazione) è in corso. Si ipotizza che le nuove etichette entreranno in vigore in modo obbligatorio all'inizio del 2012 e in modo volontario già dall'inizio del 2011.

Per valutare l'effetto delle politiche sull'efficienza energetica sul comportamento degli utenti italiani è stata acquisita la banca dati GfK che contiene i dati delle vendite dei principali elettrodomestici sul mercato nazionale nel periodo 2001-2009. In generale il mercato degli 8 apparecchi domestici più importanti (frigoriferi, congelatori, lavatrici, asciugatrici, lavastoviglie, forni elettrici da incasso, cucine, piani cottura) è stato di poco meno di 7 milioni di pezzi nel 2009, contro i circa 6 milioni del 2001.

Per quanto riguarda l'efficienza energetica, nel 2009, i frigoriferi di classe energetica A+ sono stati il 57,2% del totale, i congelatori il 64,5% e le lavatrici il 49,5%, mentre il 73,2% dei forni appartiene invece alla classe A.

Il mercato nazionale sui prodotti oggetto di legislazione europea di cui sopra (Etichettatura Energetica ed Ecodesign, essenzialmente) è stato analizzato tramite la banca dati GfK, acquisita da ENEA, che comprende i dati di vendita sui grandi elettrodomestici. Per questi apparecchi sono disponibili i dati di vendita per anno per gli ultimi 10 anni Le informazioni sono segmentate per sottotipologie di apparecchio (ad esempio incasso o libera installazione. Ecc.) e caratteristiche energetiche (etichettatura).

In Figura 281 si riporta un esempio, riguardante i dati di vendita in percentuale delle lavastoviglie, nel periodo 2001-2009, secondo le classi di etichettatura energetica.

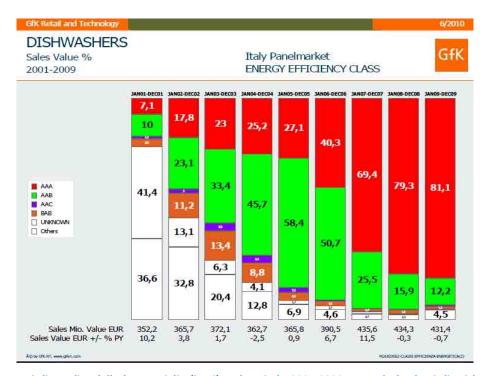


Figura 281. Dati di vendita delle lavastoviglie (in %), nel periodo 2001-2009, secondo le classi di etichettatura energetica.

Per analizzare il modo di impiego dei prodotti suddetti da parte dell'utente finale è stata effettuata una survey online su un panel di 3000 persone, con domande riguardanti il possesso delle varie tipologie di elettrodomestici, le abitudini di utilizzo, la sensibilità ai problemi energetico-ambientali e la percezione degli stessi.

La survey è stata finalizzata principalmente sugli stessi elettrodomestici analizzati dalla banca dati GfK, in modo da poter successivamente confrontare l'immagine dell'offerta con quella dell'utilizzo. L'attenzione principale è dunque verso i grandi elettrodomestici del freddo, del lavaggio e della cottura, con una estensione a una rosa più estesa di apparecchi, per i quali è probabile nel prossimo futuro l'analisi presso la Commissione Europea nell'ambito delle Direttive Etichettatura e Ecodesign.

Per i grandi apparecchi sopra detti le domande riguardano sia la conoscenza di caratteristiche tecniche, compresa l'etichetta energetica, sia le abitudini di utilizzo. Una serie di domande generali raccoglie informazioni sulla sensibilità ai problemi ambientali e altri argomenti, dal punto di vista dell'utente. Questo approccio permette anche di dare un peso alle risposte date. Ad esempio l'informazione "fare manutenzione al proprio frigorifero

sì/no" è diverso da "pensare che la manutenzione sia utile all'efficienza del frigorifero e quindi comportarsi di conseguenza".

Gli argomenti esaminati, sia con l'indagine di mercato sia con le rilevazioni sull'utenza finale sono utili non solo a livello statistico ma anche come supporto italiano all'applicazione delle Direttive Europee quali Ecodesign ed Etichettatura Energetica. Si verifica l'impatto di tali Direttive sia sul lato dell'offerta (Ecodesign trascina il mercato verso prodotti più efficienti) sia sul lato della domanda e utilizzo (Etichettatura Energetica spinge gli utenti verso i prodotti più efficienti) in termini quantitativi e qualitativi. Nelle Direttive è posta particolare attenzione all'informazione al consumatore, che può essere meglio mirata proprio attraverso una conoscenza diretta specifica del suo "punto di vista".

A.2 Analisi della refrigerazione professionale e dei risultati dei test condotti dal laboratorio italiano IMQ

Sino dal 2008 è stata identificata la necessità di porre in essere un'azione volta al miglioramento energetico degli apparecchi professionali, in particolare del comparto del freddo, in linea con il Piano Nazionale per l'Efficienza Energetica. ENEA - su incarico dell'Associazione nazionale dei produttori di apparecchi domestici e professionali (CECED Italia) - ha realizzato uno studio finalizzato alla definizione di possibili politiche e misure di tipo volontario o obbligatorio (requisiti minimi di efficienza energetica, etichettatura energetica, accordi volontari) per il miglioramento dell'efficienza energetica di alcuni prodotti della refrigerazione professionale, soprattutto gli armadi e i banchi refrigerati.

Secondo le valutazioni di CECED Italia, il mercato della refrigerazione professionale nel nostro Paese (nel 2008) è pari a 267194 pezzi venduti, contro 3190000 installati, con un consumo energetico pari a 6534 GWh/anno, che corrisponde al 43% del consumo della refrigerazione domestica, a fronte però di un installato 10 volte meno numeroso. Si ipotizza inoltre che un 30% di questa energia possa essere risparmiata se fossero applicate al settore delle misure di efficienza energetica.

Lo studio ENEA è iniziato nel giugno 2008, supportato da quattro costruttori nazionali e si è focalizzato sui frigoriferi, congelatori e frigocongelatori con unità di raffreddamento incorporata, di tipo "cabinet" (verticali) e "counter" (tavoli), con porta solida, che rappresentano il 70% del totale degli armadi e banchi refrigerati e si ritiene possano offrire un maggior potenziale di risparmio energetico.

A partire dall'inizio del 2009 i costruttori che hanno partecipato allo studio hanno fornito i dati tecnici dei loro prodotti cabinet e counter per costituire la prima banca dati dei frigoriferi professionali prodotti e venduti in Italia, che è stata completata nel giugno dello stesso anno. La successiva analisi statistica dei dati ha permesso di valutare le caratteristiche tecniche dei frigoriferi/congelatori professionali (dimensioni, volumi, numero di porte e scomparti, temperature interne) al fine di una classificazione degli apparecchi in categorie omogenee, e i valori del consumo energetico e la dispersione per ciascuna delle categorie individuate. Benché i dati raccolti siano in parte incompleti, in quanto (i) il consumo energetico è stimato secondo il metodo di misura innovativo messo a punto ad-hoc e (ii) i modelli con porta trasparente sono esclusi, tuttavia i quattro produttori partecipanti rappresentano il 70-80% del mercato nazionale. Il risultato dell'analisi della banca dati viene quindi considerato rappresentativo della situazione nazionale dei frigoriferi commerciali e - in larga parte - anche di quella europea e anche sufficiente alla definizione di una serie di proposte di politiche e misure per l'efficienza energetica dei prodotti per la refrigerazione professionale.

Per validare il metodo di misura modificato definito per questi prodotti, l'Istituto IMQ ha provato a partire dal giugno 2009 sedici modelli di apparecchi, 8 cabinet (congelatori verticali) e 8 counter (4 modelli di banchi frigoriferi e 4 modelli di tavoli congelatore). Questa analisi ha permesso inoltre di valutare l'effettiva possibilità di mettere a punto una qualsiasi misura politica sulla base delle informazioni contenute nella banca dati, in quanto solo se i dati misurati sono simili a quelli dichiarati è possibile considerare la banca dati come una adeguata base tecnica per tali politiche poiché. Il risultato dei test sui 16 modelli, completati nel giugno 2010, ha mostrato come ci sia un buon accordo fra il consumo stimato (dichiarato) e quello misurato.

A.3 <u>Studio della refrigerazione commerciale per l'analisi delle proposte di politiche misure di ecodesign ed eventuale etichettatura energetica</u>

La Commissione Europea DG TREN ha promosso a partire dal 2006 una serie di studi preparatori propedeutici alla definizione di requisiti di ecodesign secondo le direttive 2005/32/CE e 2009/125/CE. Il Lotto 12 "Preparatory study on Refrigerating and Freezing Equipment" ha analizzato i prodotti della refrigerazione commerciale, il loro mercato, il possibile sviluppo tecnologico, le politiche di efficienza energetica applicabili e il possibile risparmio energetico ottenibile.

Questo gruppo di prodotti comprende una grande varietà di tipologie, ed è caratterizzato dal fatto che l'utente finale non è il consumatore, ma il proprietario del punto vendita dove l'apparecchio è installato, che spesso non è il proprietario dell'apparecchio stesso, che può essere dato in leasing direttamente dal suo produttore oppure dal produttore delle bevande/alimenti esposti per la vendita. Un particolare gruppo di questi apparecchi, con caratteristiche tecniche simili è costituito dalle cosiddette "vending machines".

I risultati dello studio sono stati presentati al Consultation Forum nell'aprile 2010 insieme ad alcuni possibili scenari di misure per l'efficienza energetica, soprattutto la definizione di requisiti minimi di ecodesign (relativamente al consumo energetico e alle perdite del gas refrigerante utilizzato) e di uno schema di etichettatura. Gli aspetti positivi e negativi di ciascun scenario sono stati discussi con le parti sociali interessate e gli Stati Membri.

In Italia i produttori di mobili refrigerati per esposizione e vendita sono raggruppati nell'Associazione di categoria ANIMA. ENEA è in contatto con i rappresentanti dell'associazione per mettere a punto, di concerto con il MSE, commenti alle proposte di politiche e misure avanzate dalla Commissione Europea e preparare un posizione nazionale in vista dei prossimi incontri in cui gli scenari ipotizzati verranno concretizzati in proposte di criteri di ecodesign e in un possibile schema di etichettatura.

A.4 <u>Analisi dei risultati dell'azione di analisi delle proposte della Commissione Europea per la revisione delle</u> direttive quadro

E' stata completata l'azione di supporto al Gruppo Energia del Consiglio per la rifusione (*recast*) delle direttive Ecodesign (2005/32/CE), Etichettatura Energetica (92/75/CEE), ed Edifici (2002/921/EC).

<u>Direttiva Eco-progettazione</u>: la nuova direttiva ecodesign¹² adottata a fine 2009 (GU CE L 285 del 31.10.2009) prevede in particolare l'estensione dell'ambito a tutti i prodotti connessi all'energia, definiti come "qualsiasi bene che abbia un impatto sul consumo energetico durante l'utilizzo, che viene immesso sul mercato e/o messo in servizio e che comprende le parti destinate a essere incorporate in un prodotto connesso all'energia contemplato dalla presente direttiva, immesse sul mercato e/o messe in servizio come parti a sé stanti per gli utilizzatori finali, e le cui prestazioni ambientali possono essere valutate in maniera indipendente".

Direttiva etichettatura: il 19 maggio 2010 è stata approvata da parte del Parlamento europeo la Direttiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 concernente l'indicazione del consumo di energia e di altre risorse dei prodotti connessi all'energia, mediante l'etichettatura ed informazioni uniformi relative ai prodotti (rifusione), che è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 18 giugno (GU L 153). La riformulazione della direttiva sull'etichettatura energetica, con l'allargamento dello scopo ai "prodotti relativi all'energia" è parte del pacchetto relativo all'efficienza energetica, che comprende anche la revisione della direttiva sul rendimento energetico degli edifici e l'introduzione dell'etichettatura per i pneumatici. Il piano d'azione sulla politica industriale sostenibile (PIS) e il piano su produzione e consumo sostenibili (PCS) hanno infatti concluso che l'ampliamento della direttiva sull'etichettatura ai prodotti correlati all'energia sia in grado di rafforzare le sinergie tra misure legislative esistenti, soprattutto con la direttiva sui requisiti di eco-progettazione per gli stessi prodotti. Mentre infatti l'etichettatura energetica fornisce una chiara indicazione del rendimento energetico, l'eco-progettazione concerne lo sviluppo di prodotti con minore impatto ambientale e mira a ridurre tale impatto già a partire dalla fase di progettazione del prodotto.

La nuova direttiva 2010/30/UE costituisce un passo avanti verso la realizzazione degli obiettivi comunitari in materia di risparmio energetico (e riduzione delle emissioni di CO₂) perché definisce tra l'altro la forma e il contenuti della nuova etichetta energetica, permettendo ai consumatori di identificare - e possibilmente scegliere - prodotti con caratteristiche di efficienza e prestazioni funzionali ottimali, e i principi di comportamento che il settore pubblico negli Stati Membri dovrebbe seguire al momento dell'acquisto di beni etichettati.

Va ricordato che l'etichetta energetica attualmente in vigore copre solo i principali elettrodomestici: frigoriferi, congelatori, lavatrici, asciugabiancheria, lavastoviglie, forni e condizionatori d'aria, oltre alle sorgenti luminose. I produttori sono oggi obbligati a indicare il consumo annuo di energia, dall'apparecchio a basso (verde scuro classe A) o alto consumo (rosso classe G). A seconda del tipo di prodotto, l'etichetta adotta anche un approccio integrato indicando anche la quantità di acqua utilizzata, il livello di rumorosità o di produzione di calore.

La nuova Direttiva 2010/30/UE, ha come detto esteso l'ambito di applicazione ai prodotti relativi all'energia, con la previsione di coprire anche altri prodotti e settori commerciali in un prossimo futuro; prodotti che non consumano

¹² Direttiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 ottobre 2009 relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia (rifusione)

direttamente energia, ma che una volta in uso o installati hanno un potenziale significativo di risparmio di energia (impatto indiretto) sono per esempio le finestre, le porte esterne e i materiali isolanti, ma la nuova etichetta si applicherà anche a televisioni, scaldabagni, caldaie, apparecchi professionali, ecc.. Nella nuova etichetta la scala da A a G esistente si amplierà con tre nuove classi: A+, A++ e A+++, oltre alla classe "A". Questa nuova scala permetterà ai consumatori di riconoscere prodotti ancora più efficienti del migliore prodotto oggi sul mercato e favorirà la concorrenza tra i produttori, dando loro un efficace strumento di marketing per i loro prodotti innovativi. La Direttiva prevede inoltre che le pubblicità contenenti delle informazioni o prezzi legati all'energia dovranno includere un riferimento alla classe di efficienza energetica del prodotto, permettendo così ai consumatori di valutare anche i costi di utilizzo dei prodotti già al momento dell'acquisto. Tuttavia la nuova etichetta energetica non potrà in principio indicare più di sette classi energetiche, a meno che più classi siano ancora popolate e necessarie a qualificare lo specifico prodotto, con tre possibili scenari: se un nuovo prodotto che utilizza meno energia di quelli esistenti è classificato "A+" la classe énergetica meno efficiente sarà la "F"; se un nuovo prodotto che utilizza meno energia di quelli esistenti è classificato "A++" la classe energetica meno efficiente sarà la "E"; se un nuovo prodotto che utilizza meno energia di quelli esistenti è classificato "A+++", la classe energetica meno efficiente sarà la "D". Il sistema dei colori, dal verde scuro per i prodotti più efficienti energeticamente al rosso per quelli che consumano di più, verrà definito conseguentemente in modo che la classe di efficienza energetica più elevata sia sempre verde scuro e la più bassa rossa.

La proposta iniziale del Parlamento Europeo era invece di utilizzare per la nuova etichettatura solo una scala chiusa per l'efficienza energetica di 7 classi (da A a G) con frequenti riscalaggi per adeguarsi allo sviluppo tecnologico e mantenere la classe A sempre popolata solo da (pochi) modelli con elevata efficienza e prestazioni. Al contrario, la grande maggioranza degli Stati Membri, fra cui l'Italia, era invece su posizioni opposte, richiedendo che il nuovo schema di etichettatura fosse basato su una scala aperta con nuove classi al di sopra della A. La discussione si è protratta per mesi all'interno del Gruppo Energia del Consiglio e fra Presidenza, Commissione, Parlamento, per concludersi infine grazie anche alla forte azione dell'Italia - supportata da ENEA e dall'Associazione dei costruttori nazionali - con la soluzione di compromesso della scala aperta. Ogni ipotesi di riscalaggio è stata rimandata al 2014 in occasione della nuova revisione delle direttive etichettatura ed ecodesign. Il testo della nuova direttiva etichettatura è stato formalmente accettata dal Consiglio il 14 aprile e successivamente dalla commissione ITRE (Industry, Research and Energy) il 28 aprile.

In virtù dell'entrata in vigore del Trattato di Lisbona, le misure di implementazione della nuova etichettatura energetica saranno atti delegati, in particolare Regolamenti. La Commissione definisce gli elementi specifici riguardanti l'etichetta e la scheda per ciascun tipo di prodotto.

E' stato inoltre introdotto il principio, ma non l'obbligo, che le amministrazioni che acquistano prodotti coperti da etichettatura attraverso appalti pubblici debbano cercare di acquistare soltanto i prodotti rispondenti ai livelli massimi di prestazione e appartenenti alla migliore classe di efficienza energetica. Gli Stati Membri hanno poi la possibilità di richiedere alle amministrazioni aggiudicatrici di acquistare soltanto prodotti che soddisfano tali criteri, ma possono subordinarne l'applicazione a valutazioni sui costi, fattibilità economica, idoneità tecnica e adeguata concorrenza.

Infime nel caso gli Stati Membri prevedano l'istituzione di incentivi per prodotti coperti da etichettatura, sia per gli utilizzatori finali che per le industrie produttrici, ne devono indicare le prestazioni in termini di classe di efficienza e dovrebbero premiare solo i prodotti con i massimi livelli di prestazione inclusa la migliore classe di efficienza energetica. Agli Stati Membri è data infine la possibilità di imporre livelli di prestazione più elevati della soglia prevista per la migliore classe di efficienza energetica. Misure fiscali e di bilancio non costituiscono incentivi ai fini dell'etichettatura.

Direttiva edifici: Il 19 maggio 2010 è stata inoltre approvata da parte del Parlamento europeo la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 18 giugno (GU L153). Obiettivo della direttiva è migliorare la "prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi. La nuova direttiva integra, modifica ed aggiorna i contenuti della direttiva precedentemente emanata (la 2002/91/CE, che ha imposto i Decreti 192/2005 e 311/2006), anche al fine di renderli coerenti con gli obiettivi fissati dal Consiglio europeo nel marzo 2007 di ridurre del 20% il consumo energetico dell'Unione entro il 2020. A tale proposito essa ha la finalità di istituire un quadro comune generale di una metodologia per il calcolo della prestazione energetica integrata degli edifici e delle unità immobiliari, sempre tenendo conto delle condizioni climatiche locali, della qualità dell'aria e delle condizioni di benessere all'interno degli edifici, verificando inoltre la compatibilità economica, ovvero i costi necessari a conseguire tali condizioni, riguardando sia i nuovi edifici che quelli esistenti.

In particolare, nell'ottica dell'analisi costi benefici la nuova direttiva definisce la valutazione del livello di prestazione energetica in relazione ai costi (art. 4); viene introdotto l'obbligo di costruire edifici ad "energia quasi zero" entro il 31 dicembre 2020 ed entro il 31 dicembre 2018 per quelli occupati o di proprietà degli enti pubblici (art. 9); è stato cancellato il limite dimensionale di 1000 m² riguardante la superficie degli edifici sottoposti a ristrutturazione importante, al di sopra della quale interviene l'obbligo di rispettare i requisiti minimi di prestazione energetica fissati dallo Stato (art. 7); viene introdotto l'obbligo di riportare, su tutti gli annunci dei mezzi di comunicazione commerciali, l'indicatore di prestazione energetica nei casi di vendita e di locazione (art. 12); infine è data la possibilità agli Stati Membri di ridurre la frequenza delle ispezioni degli impianti di riscaldamento, in presenza di un sistema di monitoraggio e controllo elettronico e tenendo conto dei costi che l'ispezione dell'impianto di riscaldamento comporta e del risparmio energetico previsto che ne potrebbe derivare (art. 14).

La direttiva è entrata in vigore l'8 luglio 2010, ma gli Stati hanno tempo fino al 9 luglio 2012 per adottarla e pubblicarla. L'applicazione delle diverse disposizioni contenute nella direttiva può avvenire in tempi differenti, compresi tra il 9 gennaio 2013 e il 31 dicembre 2015.

B. Creazione di una rete di laboratori italiani in grado di effettuare verificare la conformità degli apparecchi ai requisiti di Ecodesign

B.1 <u>Laboratorio di prova per apparecchi del freddo per uso domestico in grado di eseguire test di verifica della conformità ai Regolamenti di Ecodesign e alle Direttive/Regolamenti di Etichettatura Energetica, secondo reguisiti considerati essenziali a livello europeo</u>

Nella prima fase di attività è stata acquisita strumentazione per il laboratorio del freddo dell'ENEA di Ispra su apparecchi per uso domestico, aggiornando quindi anche i protocolli di prova e le procedure attualmente seguite nel laboratorio ai requisiti che sono considerati essenziali a livello europeo, affinché un laboratorio sia ritenuto in grado di eseguire test di verifica della conformità ai Regolamenti di Ecodesign e alle Direttive di Etichettatura

Energetica. La gamma di prodotti che possono essere testati presso il laboratorio di Ispra è stata ampliata creando il laboratorio forni elettrici.

Gli elementi principali di laboratorio sono oggi due camere climatiche walk-in adibite alle prove sugli elettrodomestici del freddo (Laboratorio ICELAB, Figura 282) e sui forni elettrici (Laboratorio FIRELAB) e una camera climatica di dimensioni ridotte per prove su piccoli apparecchi, supportati da un laboratorio di taratura interno.

I laboratori sono predisposti per determinare: i) il consumo energetico degli apparecchi domestici in base alla normativa Comunitaria vigente; ii) le prestazioni degli apparecchi; iii) l'impatto sulle prestazioni causato dall'ambiente esterno e dalle abitudini degli utenti; iv) l'efficienza dei component



Figura 282. Il laboratorio ICELAB con le camere climatiche

dalle abitudini degli utenti; iv) l'efficienza dei componenti; e per effettuare studi sperimentali su prototipi innovativi.

In particolare, nei laboratori ENEA Ispra, le prove tipiche sono:

- determinazione delle dimensioni lineari, delle superfici e dei volumi;
- temperature di conservazione;
- consumo di energia;
- tempo di risalita della temperatura di conservazione;
- prova di congelamento;
- pull down;
- reverse heat leakage;
- prove con apertura porte.

Il laboratorio può anche sviluppare procedure di misura nuove e ad hoc per esigenze di ricerca, sviluppo ecc.

ICELAB è dotato di due camere climatiche con controllo di temperatura, umidità e velocità dell'aria, con capacità di 3 apparecchi verticali ciascuna, di strumentazione termografica, ed è attrezzato per effettuare tarature interne e con un supporto elettromeccanico.

Sono state riviste le procedure di prova in uso alla luce delle nuove esigenze di accuratezza delle misure secondo i nuovi regolamenti comunitari e anche in vista dell'adozione della nuova Etichettatura Energetica. Questo ha comportato anche una formazione specifica per il personale.

E' stata acquisita strumentazione in sostituzione / aggiuntiva per il laboratorio. In particolare è stata acquisita una camera climatica di piccole dimensioni , utile per provare apparecchi di piccole dimensioni. Questa nuova camera, dotata di controllo di temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria, può anche essere usata per testare piccoli elettrodomestici differenti da quelli del freddo, secondo procedure o standard dedicati.

È stata quindi predisposta una scheda descrittiva: strumentazione, capacità di prova, costo indicativo delle prove.

B.2 Ampliamento della gamma di prodotti che potranno essere testati presso il laboratorio di Ispra: i forni elettrici

La gamma di prodotti che potranno essere testati presso il laboratorio di Ispra è stata ampliata creando il laboratorio forni elettrici (FIRELAB). Qui è possibile misurare il consumo energetico dei forni, secondo standard o con procedure ad hoc.

La scelta è stata dettata da una certa analogia tra le prove sui forni e quelle sugli elettrodomestici del freddo. In entrambi i casi infatti le osservabili da misurare sono essenzialmente temperatura ed energia elettrica, e le operazioni per le prove comprendono conservazione del carico, controllo temperatura, inserimento carico, ecc.. Le prove sui forni inoltre sono da effettuarsi in ambiente termostatato, anche se con requisiti molto meno stringenti rispetto a quelle dei frigoriferi, e quindi - a maggior ragione - possono essere eseguite in un ambiente controllato come una camera climatica.

E' stata quindi acquisita la strumentazione dedicata alle prove sui forni: sonde di temperatura adatte, "mattoni" per il carico, schede per gli acquisitori per poter leggere le nuove sonde. E' stata quindi effettuata una formazione per il personale e sono state scritte le procedure.

Sono in corso le prime prove per testare tutto il sistema. Anche per questo laboratorio è stata predisposta una scheda descrittiva per. strumentazione, capacità di prova, costo indicativo delle prove.

B.3 <u>Supportare la creazione di altri laboratori di prova - all'interno e all'esterno di ENEA - per la qualifica degli usi</u> finali

Secondo la nuova legislazione comunitaria (Regolamenti di Ecodesign e Direttive di Etichettatura Energetica) gli Stati Membri devono svolgere sorveglianza di mercato, in particolare verifiche di conformità alla suddetta legislazione. L'Italia deve quindi decidere le modalità che intende usare per questa sorveglianza e predisporre procedure per realizzarla.

I costruttori fanno obbligatoriamente la propria dichiarazione (tutto il sistema di Etichettatura ed Ecodesign ha sottinteso questo meccanismo) e lo Stato effettua a campione controlli sul mercato.

Ogni anno escono sul mercato un considerevole numero di nuovi modelli e ogni prova necessita di un certo tempo per l'esecuzione (tipicamente su un forno si parla di giorni, per un frigocongelatore si parla di più settimane). Per poter programmare un controllo a campione su un numero non trascurabile di modelli è quindi ragionevole creare un Network di laboratori su cui poter fare affidamento.

Nell'ambito di questa linea di attività, come primo passo per la costituzione del Network sono stati contattati i laboratori in grado di provare gli apparecchi per la refrigerazione domestica che erano stati censiti nell'ambito del progetto comunitario ATLETE, Appliance Testing for Energy Label Evaluation (Analisi di prodotto per la verifica dell'etichetta energetica), in quanto i frigoriferi e i congelatori sono il primo gruppo di prodotti per cui è in vigore il Regolamento di Ecodesign, mentre è in fase di approvazione da parte del Parlamento europeo e del Consiglio il nuovo schema di Etichettatura.

Nell'ambito del Progetto sono stati redatti e resi pubblici un rapporto di Approccio metodologico di adeguamento della direttiva Ecodesign e le Linee guida per testare i prodotti "energivori". Tali strumenti rappresentano la base per l'impostazione dell'attività del Network.

E' stato quindi predisposto un questionario per acquisire informazioni omogenee dai laboratori. E' stato fatto un incontro con gli stessi per spiegare l'iniziativa, consolidare i contatti, verificare lo stato dell'arte ed iniziare l'azione di formazione sull'aggiornamento della strumentazione, i relativi protocolli di prova (in fase di definizione da parte degli Enti europei di standardizzazione su mandato comunitario) ecc. per il raggiungimento di criteri minimi di qualità d affidabilità per detti laboratori.

A settembre 2010 si è tenuta a Ispra una prima riunione con i responsabili di tutti i laboratori che hanno manifestato interesse all'adesione al Network dei laboratori che verificano la conformità degli apparecchi di

refrigerazione per uso domestico ai requisiti di eco-progettazione e all'etichetta energetica comunitaria e all'ampliamento della gamma di prodotti che potranno essere testati. I referenti hanno discusso le modalità per la verifica dei requisiti di eco-progettazione per agli apparecchi per la refrigerazione domestica introdotti dal Regolamento 643/2009/CE che utilizza come riferimento normativo uno standard armonizzato basato sulla norma europea EN 153 (EN ISO 15502) e di Etichettatura energetica del DM 2 aprile 1998 "Applicazione della Etichettatura energetica a frigoriferi domestici, congelatori e relative combinazioni" e successiva revisione della Direttiva sull'Etichettatura energetica.

Verrà quindi prodotta per MSE una scheda-rapporto per ogni laboratorio, con i tipi di apparecchi testabili, la capacità di prova, i contatti, ecc..

Un aspetto importante già da ora è che i laboratori stanno fornendo contributi attivi per la creazione di un Network operante con suggerimenti, ad esempio, sulla opportunità di organizzare ring test, definire le modalità di prelievo a campione dei prodotti da testare, identificare un format condiviso per i report di prova.

C. Studi e progettazione di interventi dimostrativi per l'applicazione del modello di energia distribuita

Il presente obiettivo è finalizzato all'analisi e alla progettazione di alcuni interventi dimostrativi di sistemi di produzione di energia di piccola/media taglia e alla loro integrazione in una rete circoscritta secondo un modello di energia distribuita.

In particolare è stato condotto: una studio di fattibilità, e relativa progettazione esecutiva, di un impianto di trigenerazione da installare presso l'edificio F13 del Centro Ricerche Casaccia di ENEA, edificio che ospita i locali mensa con relativi servizi oltre ad uffici, e un'analisi, e relativa progettazione, di due reti di distribuzione esistenti per la transizione verso reti attive.

C.1 Progettazione impianto di trigenerazione

L'attività, svolta da ENEA con la collaborazione del gruppo CITERA dell'Università di Roma "La Sapienza", ha avuto come oggetto la stesura del progetto preliminare ed esecutivo di un impianto di trigenerazione basato sull'utilizzo di un motore a combustione interna alimentato a gas metano associato ad un gruppo frigorifero ad assorbimento; il sistema in oggetto è in grado di produrre energia elettrica ed energia termica per il condizionamento (caldo e freddo) dell'edificio F13, presso il Centro di Ricerca ENEA della Casaccia, dove è presente la mensa e alcuni uffici.

Nella prospettiva futura di una diffusione sempre più capillare di piccoli impianti di cogenerazione e di micro-cogenerazione su scala urbana, si rende necessario avviare un'analisi finalizzata a valutare dal punto di vista energetico, economico ed ambientale, i modelli di sviluppo energetico. In tale contesto, la soluzione impiantistica di seguito illustrata nasce dall'analisi di un modello basato sulla generazione distribuita di energia elettrica, termica ed eventualmente frigorifera localizzata in corrispondenza dei siti di consumo attraverso la diffusione di piccoli impianti di cogenerazione/trigenerazione.

L'analisi effettuata per l'applicazione in esame mira ad individuare la soluzione tecnica-impiantistica che minimizza il tempo di ritorno dell'investimento nel contesto territoriale in cui si insedia. Il progetto preliminare sviluppato rappresenta un esempio dimostrativo di una "soluzione tecnologica energeticamente efficiente". Gli indicatori di riferimento presi in considerazione per i diversi scenari di definizione sono rappresentati da: i consumi in termini di energia primaria, i costi di esercizio all'attuale regime tariffario di acquisto della stessa, i costi di investimento e di gestione/manutenzione degli impianti, il corrispondente incremento di efficienza energetica.

L'edificio F13 che ospita i locali della mensa e gli uffici della direzione del Centro è stato realizzato negli anni '60, si sviluppa su due piani ed è dotato di una struttura in cemento armato, chiusura verticale in muratura e copertura piana in latero-cemento. L'edificio, nel quale lavorano circa 50 dipendenti, ha una potenzialità di 1100 pasti al giorno (680 posti a sedere) e una superficie utile di circa 2600 m², di cui 1600 m² ad uso mensa e 1000 m² di uffici e cucine.

Attualmente l'edificio viene climatizzato durante la stagione invernale attraverso uno scambiatore (circa 1 MW_t acqua/acqua surriscaldata) con la rete di teleriscaldamento del Centro e durante la stagione estiva con due gruppi chiller tipo acqua - acqua della "Ercole Marelli" installati negli anni '80 aventi le seguenti caratteristiche:

	Potenza[CV]	Numero Chiller	Potenza totale [CV]
Gruppo 1	80	2	160
Gruppo 2	40	3	120

Il normale funzionamento dell'impianto di condizionamento prevede un funzionamento ciclico di due gruppi in moda da assorbire una potenza complessiva di 160 CV (116,8 kWe).

		kW	kWf
chiller 1	80 CV	58,4	204,4
chiller 2	40 CV	29,2	102,2
chilelr 3	40 CV	29,2	102,2
P _{tot} friqo	160 CV	116,8	408,8

Il ciclo di funzionamento prevede l'accensione contemporanea di un chiller da 80 CV e due da 40 CV per una potenza complessiva di 160 CV per una durata giornaliera di 13 ore (usualmente da fine maggio a metà settembre). Il COP medio stimato (non sono a disposizione dati di targa e misure strumentali) dei gruppi frigo è di circa 3,5.

L'acqua calda sanitaria per la mensa e il bar (lavastoviglie, scaldavivande etc) in estate viene fornita da 2 caldaie a gas da 90 kW_t ciascuna che alimentano a 60 °C sei accumuli termici per un volume totale di 18 m³.

o Studio di fattibilità dell'intervento

L'impianto di trigenerazione in progetto opererà in parallelo con la esistente rete elettrica BT del Centro di Ricerche attualmente alimentata dalla rete AT 380 kV e distribuita all'interno del Centro tramite anello MT 20 kV con 20 cabine MT/BT. In particolare il cogeneratore verrà collegato in parallelo con l'esistente cabina MT/BT numero 9 (che alimenta attualmente l'edifico mensa e altri edifici attigui) tramite nuovo quadro elettrico di interfaccia (secondo CEI 11-20).

Tutta l'energia elettrica prodotta dal sistema cogenerativo, verrà auto-consumata dal Centro di Ricerche il cui diagramma di carico annuo ha una base pari a 2 MWe.

Il calore prodotto durante la stagione invernale sarà utilizzato per integrare l'energia termica fornita all'edificio dalla rete di teleriscaldamento (riscaldamento degli ambienti e acqua calda sanitaria); durante la stagione estiva, invece, parte dell'energia termica prodotta dal cogeneratore servirà ad alimentare un gruppo frigo ad assorbimento per la climatizzazione degli ambienti e parte per la produzione del fabbisogno giornaliero di ACS.

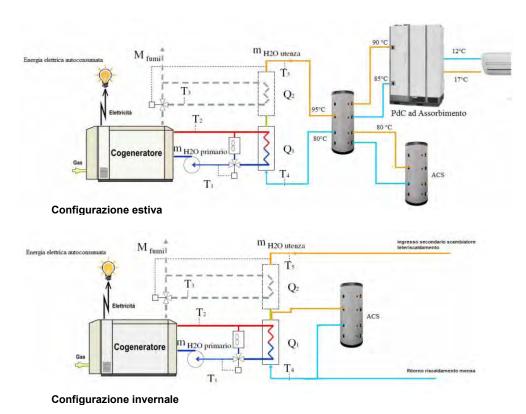


Figura 283. Schema impianto nella configurazione estiva ed invernale

o La campagna di monitoraggio

Per valutare i reali profili di consumo e per un corretto dimensionamento dell'impianto è stata effettuata una campagna di monitoraggio delle condizioni termo-igrometriche della mensa ed un'analisi dei dati di consumi termici (acqua calda sanitaria) ed elettrici dell'edificio.

Analisi dei consumi elettrici

Per valutare correttamente il consumo degli attuali gruppi chiller sono stati analizzati i consumi della cabina MT/BT numero 9 (già monitorata da remoto, come ogni cabina MT/Bt all'interno del Centro, dal personale che gestisce gli impianti elettrici) alimentante l'edificio F13. Non avendo a disposizione i dati di consumo relativi ai soli chiller, questi sono stati estrapolati confrontando i consumi dei mesi invernali, nei quali i gruppi frigo non sono in funzione, con quelli estivi in quanto la tipologia delle altre utenze elettriche presenti nell'edificio è poco legata alla stagionalità. L'andamento orario del carico elettrico del mese di marzo e luglio 2009 è riportato in Figura 284.

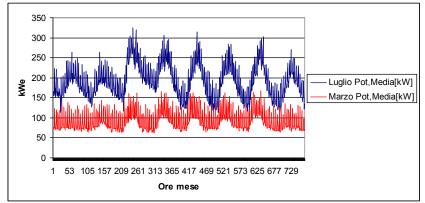


Figura 284. Confronto tra i consumi elettrici orari dell'edificio F13 estate-inverno

E' stato quindi possibile ricostruire il profilo delle utenze elettriche della mensa relative alla sola stagione estiva e da questo ricavare il diagramma di durata (Figura 285) del sovraccarico mensile estivo rispetto al carico invernale e individuare il consumo medio mensile di energia (116 kWe x 312 ore = 36 MWh/mese) imputabile ai 2 gruppi frigo (area gialla evidenziata in figura).

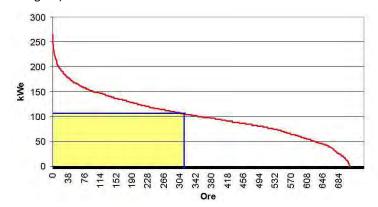


Figura 285. Diagramma di durata mensile del sovraccarico estivo rispetto al carico invernale

Analisi dei consumi gas per produzione ACS

Per misurare l'effettivo consumo di energia termica per la produzione di ACS, in accordo con il Centro, è stato monitorato tramite lettura dei contatori fiscali il consumo orario di gas metano delle due caldaie a servizio dell'edificio mensa. Elaborando i consumi di gas è stato possibile individuare la potenza termica media giornaliera utile al dimensionamento del cogeneratore in progetto (Pt = 56 kWt).

I risultati sono sintetizzati in Tabella 67, in Figura 286 sono mostrati i profili di carico settimanale della ACS.

Tabella 67. Monitoraggio dei consumi di gas per la produzione di ACS

	_				CA	LDAIA 1								CALDAIA	. 2				1
	ora	delta h min	contatore h1 (h)	delta tempo acc. (h)	fattore utilizzo Hacceso/Htot	Tout C°	m3 gas	delta m3 (m3)	m3/h	kWh	contato re h1 (h)	delta tempo (h)	fattore utilizzo Hacceso/Htot	Tout C°	m3 gas (m3)	delta m3 (m3)	m3/h	kWh	kWhTot ali
	9.00		547.60	,		67	334.39	,			337.90	. ,		70	764.59				
	10.00	60	548,20	0,60	0,60	67	337,54	3,15	3,15	30,7	338,60	0,70	0,70	70	768,50	3,91	3,91	38,1	68,74
	11.05	65	548,75	0,55	0,51	70	340,44	2,90	2,68	26,1	339,20	0,60	0,55	65	772,15	3,65	3,37	32,8	
	12.08	63	549,10	0,35	0,33	69	342,45	2,01	1,92	18,7	339,68	0,48	0,46	68	774,78	2,63	2,50	24,4	43,07
	13.08	60	549,64	0,54	0,54	72	345,15	2,70	2,70	26,3	340,20	0,52	0,52	66	778,02	3,24	3,24	31,5	57,81
23-apr	14.08	60	550,15	0,51	0,51	72	347,97	2,82	2,82	27,5	340,80	0,60	0,60	63	781,44	3,42	3,42	33,3	60,80
	15.00	52	550,70	0,55	0,63	61	351,18	3,21	3,70	36,1	341,45	0,65	0,75	68	785,29	3,85	4,44	43,3	79,34
	16.03	63	551,50	0,80	0,76	67	355,15	3,97	3,78	36,8	342,15	0,70	0,67	65	789,57	4,28	4,08	39,7	76,52
	17.00	57	552,05	0,55	0,58	63	358,26	3,11	3,27	31,9	342,80	0,65	0,68	75	793,40	3,83	4,03	39,3	71,16
	17.45	47	552,38	0,33	0,42	70	359,97	1,71	2,18	21,3	343,10	0,30	0,38	68	795,37	1,97	2,51	24,5	45,72
	18.08	23	552,50	0,12	0,31	68	360,65	0,68	1,77	17,3	343,30	0,20	0,52	72	796,47	1,10	2,88	28,0	45,30
26-apr	9.15	3787	564,15	11,65	0,18	70	423,13	62,48	0,99	9,6	363,45	20,15	0,32	68	914,00	117,53	1,86	18,1	27,78
20-арі	10.20	65	564,45	0,30	0,28	70	425,32	2,19	2,02	19,7	363,90	0,45	0,42	60	916,79	2,79	2,58	25,1	44,82
	10.00	1420	574,90	10,45	0,44	63	476,00	50,68	2,14	20,9	375,1	11,20	0,47	65	982,89	66,10	2,79	27,2	48,06
27-apr	14,05	245	576,25	1,35	0,33		488,40	12,40	3,04	29,6	377,5	2,40	0,59		997,34	14,45	3,54	34,5	64,05
	17,18	193	578,20	1,95	0,61		499,00	10,60	3,30	32,1	379,5	2,00	0,62		1009,69	12,35	3,84	37,4	69,49
28-apr	8,30	912	584,10	5,90	0,39	63	530,36	31,36	2,06	20,1	386	6,50	0,43	65	1050,6	53,26	3,50	34,1	54,22
29-apr	9,00	1470	592,55	8,45	0,34	70	576,00	45,64	1,86	18,1	397	11,00	0,45		1113,00	62,40	2,55	24,8	42,95

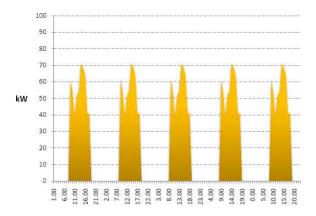


Figura 286. : Profilo di carico settimanale (lunedì-venerdì) della ACS

Analisi delle caratteristiche ambientali termo-igrometriche della sala mensa

Per valutare la corretta configurazione del nuovo impianto di trigenerazione (in parallelo al gruppo chiller

esistente o in sostituzione del compressore da 40 CV) è stata effettuata una campagna di misura delle condizioni termo-igrometriche della sala mensa in modo da individuare eventuali condizioni di discomfort dovute al sottodimensionamento dell'impianto frigo.

La campagna di misura è stata effettuata nei mesi di giugno e luglio 2010 utilizzando un sensore con datalog della "Delta OHM" installato in corrispondenza della zona tavoli. Dall'analisi dei dati (Figura 287) è emersa una temperatura media di circa 26 °C con delle

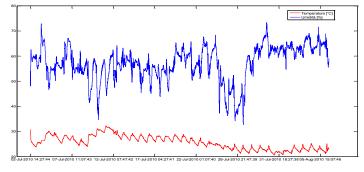


Figura 287. Risultati della campagna di misura termo-igrometrica

sovratemperature durante la settimana del 12-16 luglio (fino a 33 °C) causate da condizioni esterne non conformi alle medie stagionali.

Si evince quindi che l'attuale impianto di condizionamento riesce a fornire una potenza frigorifera appena sufficiente a garantire le condizioni di confort e che quindi il nuovo impianto dovrà operare in parallelo al sistema esistente in modo da assicurare un certo margine di sicurezza anche in condizioni climatiche estreme

Dimensionamento impianto

In funzione del fabbisogno di potenza termica per ACS e della richiesta di potenza frigorifera, è stata individuata una taglia che permettesse di massimizzare il numero di ore di funzionamento giornaliero sia in configurazione invernale che estiva e che i cui ingombri fossero compatibili con gli spazi a disposizione.

A tal fine è stato individuato un intervallo da 105 a 160 kWe come range ottimale per la taglia del cogeneratore in grado di soddisfare le caratteristiche richieste in termini di domanda energetica, ingombri e costi.

Sono state inoltre analizzate diverse configurazioni impiantistiche (accoppiamento motore combustione interna / assorbitore) e richiesti i relativi preventivi di fornitura (Tabelle 67 e 68) di alcune soluzioni commerciali che più si avvicinassero alle taglie individuate.

Particolare attenzione è stata dedicata allo studio del corretto accoppiamento (temperature e portate) tra il cogeneratore e il gruppo frigo ad assorbimento in quanto non esistono sul mercato sistemi integrati di trigenerazione. Infatti, per un corretto dimensionamento del sistema non basta effettuare un semplice bilancio energetico, ma è fondamentale tenere conto delle reali portate e temperature del fluido termovettore in uscita e ingresso da ciascun componente; un errato accoppiamento tra le macchine (es. motore a combustione interna e assorbitore) potrebbe causare una rapida decaduta della performance energetica de sistema, non rispettando i bilanci energetici ed economici previsti in fase progettuale.

Tabella 68. Caratteristiche e preventivi cogeneratori

Marca	Modello	kWel	kWth	Twarm	T _{warmAltm}	w (kg/s)	rend el	rend th	Rend I princ	Prezzo (€)
MAN 105		105	169	90-80		4,03	34,10%	54,90%	89,00%	125000,00
MAN 140	Stonepower	140	207	90-80		4,92	35,80%	52,80%	88,60%	126500,00
TEDOM	CentoT120	125	163	90-70	95-85	2	37,10%	48,30%	85,40%	133485,00
TEDOM	CentoT160 E 1306 DN	160	196	90 -70	95-85	2,3	38,50%	47,10%	85,60%	163950,00
Loganova	100	120	200	90-70		2,388	34,28%	57,14%	91,42%	
GM DOOSAN	GE 12 TIC	160	200				39,00%	4.8«79%	87,79%.	104600,00

Tabella 69. Caratteristiche e preventivi gruppi frigo ad assorbimento

Marca	Modello	kW frig	T chilled	kW thermal	T _{warm}	m warm (kg/s)	СОР	Prezzo (€)
Yazaki	WFC	105	7-12	150,6	88-83	7,2	0,697	40000,00
Century	AR D30 L2	98,5	7-12	136,8	95-80	2,16	0,720	
Century	AR D30 L2	133	7-12	180,5	95-80	2,86	0,720	52800,00
Century	AR D30 L2 Off.D	114	7-12	162,78	92-82	3,888	0,700	52800,00
Cention	HWAR-L030	105	7-12	143	95-80	2,27	0,730	50000,00
RIELLO	LT3	99,4	7-12	142	90-80	3,39	0,700	85000,00
S (LG Ele)	LWM W003	98,5	7-12	139,54	95-80	2,22	0,706	
S (LG Ele)	LWM W004	133,6	7-12	186,65	95-80	2,972	0,716	
Lianfeng	RXZ ₁₂ D	115	7-12	167,47	90-82	5	0,687	34800,00
BROAD		127	7-12	175,6	88-78	4,194	0,723	60710,00

Dopo una successiva analisi delle soluzioni commerciali, è stata individuata la configurazione impiantistica capace di garantire una corretta integrazione tra i componenti (portata e temperatura) e che più si avvicinasse sia alle esigenze energetiche sia al budget previsto per l'intervento:

- motore a combustione interna a gas: tipo Man 140 kWe , 207 kWt (T_{in} = 80 °C, T_{out}= 90 °C) o equivalente;
- gruppo frigo ad assorbimento: tipo Broad da 110 kWf (T_{in} = 90 °C, T_{out}= 80 °C) o equivalente.

Nelle tabelle 70 e 71 si riportanoi bilanci energetici relativi alla configurazione scelta, la Figura 288 mostra lo schema funzionale dell'impianto.

Tabella 70. Caratteristiche cogeneratore individuato

Cogeneratore tipo MAN 140 o equivalente								
temperatura di mandata	90 °C							
temperatura di ritorno	80 °C							
delta T	10							
calore specifico acqua	4,2 kJ/kgK							
portata acqua secondario	17,8 m³/h	17800 kg/h						
Potenza termica assorbita	747600 kJ/h	207,67 kWt						

Tabella 71. Caratteristiche gruppo frigo ad assorbimento

Assorbitore tipo Broad		
temperatura di mandata	90 °C	
temperatura di ritorno	80 °C	
delta T	10	
calore specifico acqua	4,2 kJ/kgK	
portata acqua secondario	13 m³/h	13000 kg/h
Potenza termica assorbita	546000 kJ/h	151,66667 kWt

Potenza disponibile per ACS	54,973 kWt	
DT	10 °C	

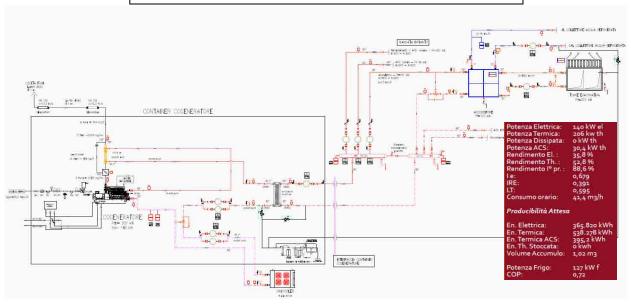


Figura 288. Schema funzionale dell'impianto trigenerativo individuato

A seguito dello studio preliminare è stata affidata la progettazione esecutiva dell'impianto alla società DAGA Impianti. Di seguito, si riporatno le caratteristiche e le taglie del sistema trigenerativo che sono state indicate per la progettazione esecutiva.

Tipologia di motore: motore a combustione interna alimentato a gas metano equipaggiato con generatore sincrono/asincrono in grado di operare in parallelo con la rete con tensione di uscita a 400 V e frequenza a 50 Hz.

Volume II

- Potenza elettrica nominale generata: 140 kWe;
- Potenza termica totale generata: 210 kWt (di cui 60 kWt per acqua calda sanitaria);
- Temperatura minima acqua di mandata al gruppo frigorifero: 90 °C.

Tipologia gruppo frigorifero: ad assorbimento H₂0/BrLi con COP minimo in condizioni nominali 0,69

• Potenza frigorifera generata dal gruppo ad assorbimento: 105 kWf

374

Tipologia torre evaporativa: del tipo a circuito chiuso, silenziata e con ventilatori parzializzabili in funzione delle effettive necessità. Dovrà inoltre essere dotata di sistema automatico di reintegro e spurgo.

Tipologia dry-cooler: del tipo a motori elettronici, predisposti per il monitoraggio da sistema di supervisione.

C.2 . Studio della transizione di reti di distribuzione tradizionali verso reti attive: applicazione a due test case

Nella prima fase di attività sono state identificate due differenti tipologie di reti di distribuzione aventi caratteristiche diverse:

- rete A, rete di distribuzione esistente in media e bassa tensione, relativa ad una zona del Centro Ricerche Casaccia, denominata are "Capanna";
- rete B, rete di distribuzione esistente in media tensione relativo all'isola di Pantelleria

e per ciascuna delle due aree di intervento, è stata effettuata una puntuale caratterizzazione dei sistemi elettrici, soprattutto in termini di produzione di energia elettrica, articolazione e consistenza delle reti elettriche di distribuzione, logiche e sistemi di automazione già adottati; sono stati pertanto identificati, per i due sistemi, gli scenari iniziali o di riferimento. Successivamente, sono stati indagati i principali aspetti di fattibilità di interventi finalizzati all'integrazione di impianti di generazione da fonte rinnovabile e al controllo della domanda. Le ipotesi di intervento sono state identificate tenendo conto non solo della disponibilità di fonti energetiche potenzialmente sfruttabili, ma anche in considerazione di tutti gli altri principali aspetti (vincoli, disponibilità di spazi, problematiche d'impatto, specificità territoriali e funzionali, ecc.) che la prospettiva di concreta attuabilità degli interventi stessi richiede. Per la transizione di reti elettriche tradizionali verso sistemi attivi, in grado di integrare in sicurezza livelli non trascurabili di generazione da fonte rinnovabile (in buona parte non di spacciabile), è necessario aumentare i livelli di automazione e controllo tradizionalmente presenti nelle reti, implementando idonee tecnologie ICT. Nel corso delle attività, dopo un inquadramento generale di tali aspetti, sono state identificate le principali specifiche delle infrastrutture di controllo che potrebbero essere implementate nei due sistemi oggetto di studio, per la realizzazione di dimostratori. Infine componendo diversamente i possibili interventi identificati, sono stati individuati due possibili scenari di sviluppo per la "rete A" - Area Capanna e cinque scenari per lo sviluppo della "rete B"- Isola di Pantelleria. Per ognuno di questi scenari è stata fatta una stima dei costi degli interventi previsti e una valutazione qualitativa dei principali benefici attesi.

Nella seconda fase di attività fra i diversi scenari individuati si previsto di passare alla fase progettuale solo per due scenari.

- A. Per l'area Capanna, lo scenario che prevede la copertura di circa il 34% del fabbisogno elettrico annua dell'area tramite fonti rinnovabili, attraverso:
 - o l'installazione di impianti fotovoltaici per una potenza di 45 kWp;
 - o l'installazione di un micro-cogeneratore eolico di 20 kW;
 - o l'installazione di una sola microturbina per la produzione combinata di energia elettrica e termica, in grado di fornire una potenza elettrica di 50 kW (e una potenza termica di 100 kW).
- B. Sulla base del fabbisogno elettro-energetico medio dell'isola di Pantelleria, assunto pari a 44 GWh/anno, è stato scelto lo scenario con una copertura di circa il 50% da fonte rinnovabile con un mix di altre tecnologie, che prevede l'impiego della geotermia, di impianti solari termici e di impianti per il trattamento dei rifiuti solidi urbani.

o Intervento Area Capanna

L'Area "La Capanna" del centro ricerche ENEA di Casaccia, occupa una superficie lorda di 214380 m² circa. Al suo interno sono presenti diversi edifici destinati prevalentemente ad uffici, sale conferenza, laboratori e serre.

Il centro ENEA di Casaccia è dotato di una fornitura in alta tensione a 150 kV; esso è dotato di una cabina di trasformazione AT/MT (150/8,4 kV/kV) dalla quale si dipartono diverse dorsali in media tensione per l'alimentazione delle cabine di distribuzione (8,4/0,380 kV/kV).

Nell'area "La Capanna" sono presenti due cabine di distribuzione 8,4/0,380 kV/kV identificate con i numeri 16 e 20 (Figura 289). La cabina 20 è equipaggiata con due trasformatori MT/bt della potenza nominale di 630 kVA, ciascuno aventi collegamento lato



Figura 289. Schema semplificato della rete dell'area "La Capanna" con indicazione delle dorsali principali MT e BT

media tensione a triangolo e lato bassa tensione stella con neutro (gruppo 11); è presente un congiuntore di sbarra che permette di suddividere il carico di bassa tensione in due parti, nell'ottica di un funzionamento contemporaneo, ma separato, dei due trasformatori. La cabina 16 è equipaggiata con un trasformatore MT/bt della potenza nominale di 1000 kVA avente le medesime tipologie di avvolgimento sopra citate ed è esclusivamente dedicata all'alimentazione, attraverso un unico feeder in bassa tensione, di un impianto solare termico sperimentale.

Le cabine 16 e 20 sono alimentate mediante due dorsali in media tensione, provenienti dalla cabina di trasformazione AT/MT, denominate 1E e 2E esercite normalmente in modo radiale.

Dal quadro di bassa tensione ubicato nella cabina 20 si dipartono le dorsali di alimentazione dei quadri disposti all'interno degli edifici presenti nell'area, nonché una dorsale di bassa tensione per l'alimentazione di una cabina di smistamento identificata con il numero 15, nella quale è installato un ulteriore quadro BT per l'alimentazione di differenti utenze. Ad esclusione degli edifici F60 e F92, che sono rispettivamente la hall tecnologica (per simulazioni sismiche e vibrazionali) e la casa intelligente (Smarthouse), tutti gli altri sono destinati ad uso ufficio o laboratorio. All'interno dell'edificio che ospita la cabina 20 sono presenti due quadri di rifasamento ciascuno con batterie di condensatori di potenza modulabile 5-10-20 kVAr. Dal quadro di bassa tensione ubicato nella cabina 15 si dipartono le dorsali di alimentazione dei quadri disposti all'interno degli edifici presenti nell'area.

L'apporto di solare termico nell'area in esame consiste in un impianto di solar cooling, recentemente installato sulla copertura dell'edificio F51, di potenza pari a 70 kW. L'impianto è costituito da un campo solare a collettori piani a bassa temperatura che occupa circa 2/3 della superficie in pianta della copertura dell'edificio, da una pompa di calore ad assorbimento e da una caldaia di integrazione poste all'esterno in prossimità dell'edificio F51. La caldaia e la pompa di calore sono alimentate a metano e si trovano a servizio del solo edificio F51.

Il consumo complessivo di energia elettrica dell'area nell'anno 2009 è stato di circa 1,38 GWh, con un picco di 167 MWh nel mese di agosto ed un minimo di 73,5 MWh nel mese di dicembre. La potenza attiva media mensile richiesta varia da un minimo di 211 kW nel mese di ottobre ad un massimo di 462 kW nel mese di luglio.

o Intervento Isola di Pantelleria

L'isola di Pantelleria appartiene al territorio di Trapani e, con una superficie di 83 km², è la prima delle isole siciliane per estensione territoriale.

Il sistema elettrico a servizio dell'isola di Pantelleria è un sistema isolato, non collegato cioè al sistema elettrico nazionale. Esso è caratterizzato da una centrale termoelettrica per la produzione di energia elettrica, da una rete di distribuzione in media tensione di tipo radiale con possibilità in controalimentazione in alcuni punti, avente 150 nodi di carico ed esercita alla tensione nominale di 10,5 kV; più in dettaglio, oltre al nodo di generazione, è possibile identificare 133 cabine di trasformazione del distributore (di cui 8 dismesse), 2 cabine di smistamento e 15 forniture in MT (cabine d'utente).

La centrale termoelettrica di produzione è costituita da 8 gruppi alimentati a gasolio, per una potenza complessiva di circa 20 MW. Dalla centrale si dipartono n.4 linee in media tensione che alimentano le sopra riportate cabine dislocate sul territorio dell'isola e contrassegnate da numeri progressivi (Linea 1 ÷ Linea 4). Ciascuna linea è equipaggiata in partenza con dispositivi di protezione di massima corrente e di guasto a terra.

Il sistema elettrico di distribuzione, pur essendo normalmente esercito in modo radiale presenta diversi punti in cui è possibile procedere alla controalimentazione delle linee o all'esercizio del sistema in forma magliata, sia all'interno di alcune cabine oggi telecontrollate, sia in altri nodi della rete.

La centrale di produzione dell'energia elettrica sull'isola di Pantelleria è dotata di un Distributed Control System, DCS, basato su tecnologia ABB. Una LAN ethernet connette le postazioni della sala controllo con il server della centrale. La rete di sensori e attuatori afferisce al server della centrale attraverso un alinea dedicata.

La rete MT è dotata di un sistema di telecontrollo di alcune cabine secondarie essenzialmente orientato a scopi diagnostici realizzato da ABB Technologies S.p.A. Il sistema è contraddistinto da un'architettura gestita con controllori programmabili ed è provvisto di un sistema di telecomunicazione ridondato basato su due distinte tecnologie (Radio e GSM). Il sistema di telecontrollo è totalmente integrato al DCS della centrale, per mezzo del protocollo OPC, ovvero attraverso l'interfaccia ethernet del PLC ridondato.

Analisi scenari selezionati

Con riferimento ai due specifici scenari su indicati, sono state implementate le due reti in ambiente software di simulazione NEPLAN e sono tate simulate le condizione di funzionamento e di guasto ritenute maggiormente significative sia per la scenario iniziale sia per configurazioni attive; è stata sviluppata la caratterizzazione dei due

sistemi di controllo ed è stata effettuata una dettagliata analisi economica dei costi e dei benefici connessi alla realizzazione di tutti gli interventi ipotizzati. Quest'analisi è stato condotto nell'ambito della collaborazione con l'Università di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIEET).

Sulla base dei costi e dei benefici analizzati, sono stati identificati i flussi di cassa relativi agli interventi previsti per l'Area "La Capanna" e per l'Isola di Pantelleria. In entrambi i casi, si è scelto di effettuare una "analisi di progetto", considerando cioè costi e benefici nel loro insieme, indipendentemente dal soggetto che si ritiene debba sostenere i costi e/o godere dei relativi benefici.

Sono state inoltre imposte le seguenti ipotesi:

- l'analisi è stata riferita ad un orizzonte temporale di 20 anni;
- si è trascurato il valore residuale (a fine periodo) degli impianti la cui vita utile è maggiore dell'orizzonte temporale scelto;
- è stato assunto che tutti gli investimenti siano sostenuti per intero all'inizio del periodo a cui l'analisi è riferita (anno zero);
- infine, la scelta del tasso di sconto è stata fatta tenendo conto sia degli aspetti finanziari che di quelli economici (costi e/o benefici sociali) connessi con l'analisi di progetto in questione. In particolare, è stato assunto un tasso di sconto del 5,50%, che si è ritenuto essere un accettabile compromesso tra il tasso di sconto finanziario e quello sociale.

Gli indicatori di performance utilizzati per l'analisi e valutati per i due casi (Tabelle 72 e 73) sono:

- il valore attuale netto (Net Present Value, NPV);
- il tasso interno di rendimento (Internal Rate of Return, IRR);
- il periodo di recupero del capitale (Pay-Back Period, PBP).

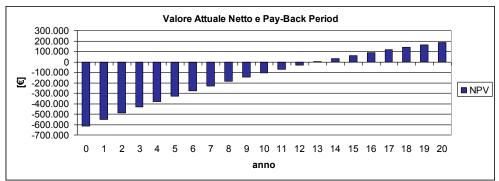


Figura 290. Area "La Capanna" - Flussi di cassa

Tabella 72. Area "La Capanna". Indicatori di performance del progetto

Valore Attuale Netto (Net Present Value, NPV) [€]	186.054
Tasso Interno d Rendimento (Internal Rate of Return, IRR) [%]	8,95
Periodo di Recupero del Capitale (Pay-Back Period, PBP) [anni]	13

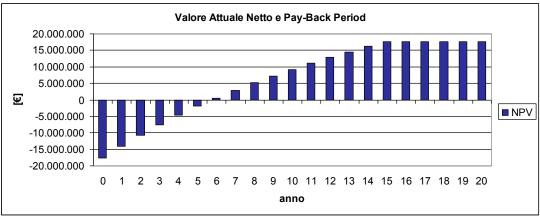


Figura 291. Isola di Pantelleria. Flussi di cassa

Tabella 73. Isola di Pantelleria - Indicatori di performance del progetto

Valore Attuale Netto (Net Present Value, NPV) [€]	17.727.300
Tasso Interno d Rendimento (Internal Rate of Return, IRR) [%]	18,77
Periodo di Recupero del Capitale (Pay-Back Period, PBP) [anni]	5,5

C.3 Studio di strategie per la gestione di reti locali con fonti energetiche rinnovabili

Sistema di monitoraggio energetico ambientale della Smart Grid dell'Universitò La Sapienza

Nell'ambito della gestione e del controllo della rete di generazione distribuita (GD) dell'energia della città universitaria è in atto lo sviluppo di un sistema di monitoraggio e di controllo dei flussi di energia delle isole energetiche. L'obiettivo che si intende perseguire è l'ottimizzazione dal lato utente della previsione della richiesta di energia e dal lato sorgente della gestione delle risorse energetiche.

Il programma energetico messo a punto dal Centro Interdisciplinare Territorio Edilizia Restauro Ambiente (CITERA) dell'Università di Roma "La Sapienza" prevede una serie di interventi mirati all'uso razionale dell'energia e al risparmio energetico ed è articolato in una serie di azioni coordinate, finalizzate a sviluppare alcune piattaforme tecnologiche:

- i distretti energetici ad alto grado di integrazione tra generazione distribuita dell'energia, fonti rinnovabili ed utenze;
- l'Information and Comunication Technology (ICT) applicata alla gestione dei distretti energetici, al fine di ottimizzare gli scambi energetici nelle diverse forme (termica, elettrica, frigorifera).

I campi di applicazione inseriti in questo quadro generale sono sia gli edifici esistenti (in particolare la Città Universitaria) che necessitano di retrofitting in merito all'obsolescenza degli impianti, che le nuove realizzazioni inserite nel piano edilizio della Sapienza.

Per studiare le soluzioni tecniche e scientifiche più idonee per il completamento del progetto, in un ambito anche di visibilità (progetti pilota) e di attivazione di strumenti prenormativi sulla GD e il risparmio energetico nel settore civile, sono state pianificate le seguenti attività:

- messa a punto di un programma di calcolo per valutare le prestazioni degli impianti, anche in condizioni offdesign, e per ottimizzarne l'utilizzo futuro massimizzando l'efficienza energetica globale, tramite analisi previsionali che si stanno mettendo a punto sulla base dei dati sperimentali in fase di raccolta;
- ricerca e sviluppo del package informatico per la gestione delle reti di energia elettrica, termica e frigorifera della maglia costituita dai tre nodi realizzati, in modo da ridurre i picchi di carico nelle ore e/o periodi di punta (minore dipendenza del sistema elettrico dalla capacità della rete).

L'architettura del sistema di tipo centralizzato è costituita da una periferia composta di sensori "semplici" e dal un sistema di monitoraggio centrale, in cui è concentrata l'intelligenza elaborativa. Il sistema tramite la rete LAN, rileva tutte le grandezze dei sensori e degli apparati posti all'interno dei vari nodi di utenza (edifici o cluster di edifici). L'architettura di questo tipo ha diversi vantaggi tra cui:

- semplicità nella manutenzione e nell'installazione dei sensori;
- possibilità di definire delle installazioni "standard" da affidare a terzi;
- possibilità di implementare qualsiasi tipo di logica nel sistema centrale;
- possibilità di integrare qualsiasi tipo di dispositivo anche in fasi successive.

In questo modo è possibile raccogliere, memorizzare e rendere disponibili tutte le informazioni tramite una semplice interfaccia WEB. Per quanto riguarda l'accesso al sistema di monitoraggio è effettuato tramite Web Browser.

Gli assorbimenti e/o le produzioni di energia dei "nodi" che costituiscono le isole energetiche sono misurate con dispositivi di differenti tecnologie ed eterogenei tra loro. All'interno del sistema di monitoraggio sono stati integrati diversi dispositivi (sonde di misura, contabilizzatori di energia, attuatori, multimetri digitali) sia per il controllo degli impianti esistenti e sia per le recenti realizzazioni (impianti fotovoltaici, impianti di cogenerazione a gas).

Le grandezze monitorate per ogni "nodo" delle isole energetiche sono quelle relative alle produzioni e agli assorbimenti di energia/potenza unitamente alle caratteristiche proprie dei processi esaminati.

In particolare, per tutte le utenze vengono monitorati i parametri di maggiore interesse come ad esempio: -tensione [V]; corrente [A]; potenza attiva [kW]; consumo/oroduzione [kWh].

Il sistema di monitoraggio di produzione è collegato agli impianti mediante una connessione alla rete poiché gli impianti in esame hanno la capacità di comunicare via rete. I parametri messi a disposizione dal sistema sono quelli relativi alla produzione energetica. Gli impianti essendo di tipo grid-connected lavorano in regime di interscambio. Per monitorare il meccanismo di interscambio per ogni impianto fotovoltaico è inserito un misuratore tra l'impianto e la rete di distribuzione. Il multimetro è connesso al quadro elettrico ed alla rete LAN a cui è collegato il sistema di monitoraggio pertanto, tramite la rete il sistema fornirà tutte le informazioni rilevate dai multimetri. Tra le grandezze direttamente messe a disposizione dalla strumentazione installata si elencano le più importanti:

- produzione giornaliera [kWh]
- produzione mensile [kWh]
- produzione annuale [kWh]
- irraggiamento [W/mq]
- velocità del vento [m/s]
- temperatura ambiente [°C]
- temperatura moduli [°C]
- tensione stringa [V]
- corrente stringa [A].

Il sistema calcola, inoltre, le seguenti grandezze derivate:

- emissioni di CO₂ evitate [kg]
- olio combustibile risparmiato [tep]

Il sistema di monitoraggio di interscanbio rende disponibili le grandezze di maggiore interesse che sono:

- tensione [V]
- corrente [A]
- potenza attiva [kW]
- potenza reattiva [VAR]
- Consumo [kWh]

All'interno della Città Universitaria è prevista l'ampliamento del sistema di monitoraggio ad altre tipologie di utenze. In particolare, è già stato avviato uno studio preliminare per l'integrazione all'interno del sistema di monitoraggio dei seguenti sistemi di misura: contatori fiscali ACEA, di Media Tensione e Bassa Tensione, contatermie e stati di interuttori.

D. Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione dinamica dei distretti energetici ad alta efficienza

Nello svolgimento delle attività della precedente annualità del presente tema di ricerca è stato sviluppato un ambiente di progettazione dinamica per i sistemi edificio-impianti (piattaforma ODESSE), nella presente annualità è si proceduto all'integrazione della piattaforma con un algoritmo per il calcolo del carico termico per il raffrescamento estivo di un edificio e del calcolo del fattore di ombreggiamento di una superficie generica.

Tale tematica rappresenta un problema ancora aperto nella comunità scientifica, in quanto, come verrà

successivamente descritto, di non facile soluzione; infatti la determinazione del carico termico in regime estivo viene affrontata applicando varie metodologie risolutive che, fortemente influenzate dalle ipotesi su cui si basano, danno luogo a risultati anche sensibil-mente diversi tra loro. Ciò è ben evidenziato dal lavoro pubblicato dall'Ashrae¹³ che ha confrontato i software di simulazione dinamica del sistema edificio-impianti più utilizzati e che può essere sintetizzato dal grafico riportato in Figura 292.

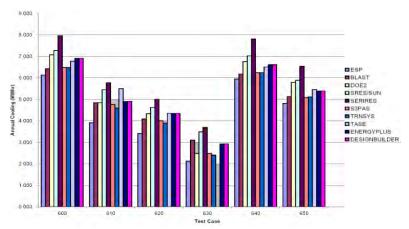


Figura 292. Fabbisogno termico estivo: congronto tra vari software per cinque tipologie di edifici (Fonte: Ashrae)

Il calcolo del carico termico in regime

estivo è reso notevolmente complesso dalla variabilità delle condizioni ambientali (interne ed esterne) che rendono gli scambi termici edificio-ambiente in una condizione di transitorio continuo.

Ciò è dovuto principalmente al fatto che l'irraggiamento solare, che in regime estivo è il fattore che influenza maggiormente l'andamento della temperatura interna dell'edificio e, conseguentemente, del carico termico, varia notevolmente nel corso della giornata. Questo implica che, a differenza di quanto è possibile ipotizzare in regime invernale, nell'equazione di bilancio termico dell'edificio deve essere considerato il termine di accumulo. Infatti la radiazione solare che penetra attraverso i componenti opachi e quelli trasparenti non diventa istantaneamente carico termico; infatti:

- la quota parte che attraversa le superfici trasparenti riscalda molto debolmente l'aria a causa del suo basso fattore di assorbimento; riscalda, invece, sensibilmente i corpi su cui incide, che aumentano la loro energia interna e, conseguentemente, la loro temperatura; quando questa è maggiore di quella dell'aria inizia il processo di scambio termico per convezione;
- la radiazione che incide sulle pareti opache viene in parte assorbita e in parte trasmessa all'interno della parete e, quindi, riemessa (per convezione) all'interno dell'edificio.

In entrambi i casi il processo di trasformazione non è istantaneo, ma avviene dopo un certo intervallo temporale che dipende dalle capacità termiche e dalle capacità di scambio termico dei materiali con l'aria.

Queste ultime valutazioni giustificano la necessità di considerare la condizione di raffrescamento in regime di continuo transitorio.

La variabilità delle condizioni climatiche e l'ipotesi di regime transitorio rendono difficoltosa la risoluzione analitica dell'equazione di bilancio termico dell'edificio, per cui si ricorre a metodi matematici. Fra i vari esistenti, i più utilizzati sono:

- Metodo delle Ammettenze;
- Metodo delle Impedenze;
- Metodo delle Funzioni di Trasferimento (TFM, Trasfer Function Method);
- Metodo del Bilancio Termico (HBM, Heat Balance Method);
- Metodo delle Serie Radiative Temporali (RTS, Radiant Time Series).

Si tratta di metodi matematici di risoluzione di equazioni differenziali per cui, per quanto accurato, il calcolo non potrà fornire soluzioni esatte; infatti tali metodi introducono delle approssimazioni dovute all'uso di coefficienti e

380 Volume II

.

 $^{^{13}}$ ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests, Giugno 2006

alla impossibilità di valutare con esattezza la variabilità dei parametri termo-fisici con le condizioni ambientali (coefficienti di scambio termico, trasmittanze termiche, etc.).

La determinazione del carico termico di raffrescamento avviene considerando due componenti del flusso termico:

- Guadagno termico (heat gain);
- Carico di raffreddamento (cooling load).

Il <u>guadagno termico</u> è il flusso di calore netto all'interno dell'edificio, istante per istante; tale guadagno è prodotto dalla differenza fra i flussi entranti nell'edificio e quelli uscenti, ovvero:

- flusso termico per radiazione attraverso le superfici opache e trasparenti;
- flusso termico per conduzione attraverso le pareti orizzontali e verticali;
- flusso termico per ventilazione e/o infiltrazione di aria esterna;
- flusso termico generato da persone, apparecchiature elettriche, sorgenti di illuminazione.

Il <u>carico di raffreddamento</u> è la quantità di calore che bisogna estrarre dall'ambiente per mantenere la temperatura di riferimento voluta e, di conseguenza, dimensionare opportunamente gli impianti di climatizzazione. Questo viene determinato a partire dal guadagno termico e mediante l'utilizzo di opportuni coefficienti dipendenti dal metodo utilizzato. Si può notare che a causa delle modalità con cui viene convertito il flusso radiativo, spesso il guadagno termico non coincide con il carico di raffreddamento.

Lo sviluppo della piattaforma ODESSE nel corso dell'ultimo anno, relativamente alla sola parte dell'edificio, ha riguardato l'implementazione di un algoritmo per la determinazione del carico termico estivo. Fra i vari metodi esistenti si è scelto in un primo momento il Metodo delle Funzioni di Trasferimento (TFM); questo ha palesato alcune limitazioni, come verrà di seguito esposto, per cui si è deciso di implementare anche il Metodo delle Serie Radiative Temporali (RTS), derivato dal metodo di Bilancio di Calore.

Nel seguito vengono descritti i due metodi, evidenziandone i limiti e punti di forza.

o Metodo delle Funzioni di Trasferimento (TFM, Trasfer Function Method)

Come è noto dalla letteratura, per il calcolo del carico termico estivo non è possibile assumere l'ipotesi di edificio termostatizzato in quanto, come già esposto, i flussi termici vengono scambiati sempre in regime transitorio. Ciò è dovuto alla variabilità delle condizioni ambientali (temperatura e radiazione) che determina l'inversione dei flussi termici scambiati e rende molto influente l'effetto dell'inerzia termica delle pareti. È quindi necessario ricorrere a relazioni che riescano a valutare l'influenza di tale parametro nel tempo.

Uno dei metodi utilizzati per determinare il carico di raffrescamento in regime estivo è il Metodo delle Funzioni di Trasferimento, proposto dall'Ashrae; questo permette di determinare il carico termico estivo $Q_{cool,t}$ all'istante t in funzione del valore al medesimo istante degli apporti termici delle singole componenti del guadagno termico $q_{i,t}$ e del valore del carico termico estivo e degli stessi apporti termici agli istanti precedenti:

$$\boldsymbol{Q}_{cool,t} = \sum_{i} (\boldsymbol{v}_{0} \boldsymbol{q}_{i,t} + \boldsymbol{v}_{1} \boldsymbol{q}_{i,t-\delta} + \boldsymbol{v} 2 \boldsymbol{q}_{i,t-2\delta} + ...) - (\boldsymbol{w}_{1} \boldsymbol{Q}_{cool,t-\delta} + \boldsymbol{Q}_{cool,t-2\delta} + ...)$$

dove i è il numero delle componenti dell'apporto termico, t l'intervallo temporale (tipicamente 1 ora) e v0; v1; v2; . . . ; w1; w2; . . . , sono i coefficienti della Room Transfer Function:

$$K(z) = \frac{V_0 + V_1 z^{-1} + V_2 z^{-2} + ...}{1 + W_1 z^{-1} + W_2 z^{-2} + ...}$$

In generale questi coefficienti dipendono dall'intervallo temporale scelto, dalla natura degli apporti termici e dalle caratteristiche termiche inerziali (assorbimento e ritardo dell'onda termica) dell'involucro edilizio.

La K(z) non è altro che il rapporto fra la trasformata di Laplace di una funzione ingresso I(z) e la trasformata di Laplace della risposta U(z), individuata a partire dall'equazione differenziale che rappresenta il sistema-edificio:

$$K(z) = \frac{U(z)}{I(z)}$$

Pertanto si possono ottenere diverse funzioni di trasferimento K(z) e quindi diversi set di coefficienti v_0 ; v_1 ; v_2 ; ...; w_1 ; w_2 ;..., impiegando differenti funzioni di ingresso, scelte opportunamente e tutte in grado di descrivere il sistema con diversi gradi di accuratezza e onere di calcolo.

In particolare il guadagno termico q_{i,t} è composto dai seguenti termini:

• flusso termico per conduzione (dispersione) attraverso le pareti opache:

$$q_{d} = \sum_{i=1}^{N} U_{i} A_{i} (T_{ref} - T_{a}) + U_{t} A_{t} (T_{ref} - T_{t})$$

• flusso termico radiativo attraverso le superfici opache:

$$q_{so} = \sum_{i=1}^{N} U_i A_i \frac{\alpha_p}{h_p} I_i$$

• flusso termico radiativo attraverso le superfici trasparenti:

$$\mathbf{q}_{st} = \sum_{i=1}^{N} SC \left[\mathbf{I}_{b} \cos(\vartheta) \ SHGC(\vartheta) + \left(\mathbf{I}_{d} + \mathbf{I}_{g} \right) \left(SHGC \right)_{e} \right] \! \mathbf{A}_{i}$$

flusso termico per ventilazione-infiltrazione:

$$q_v = c_p \rho \ nV(T_{ref} - T_a)$$

• flusso termico generato da persone, apparecchiature elettriche, sorgenti di illuminazione q_a.

La criticità di tale metodo risiede nella determinazione dei coefficienti v e w per le diverse tipologie di murature. L'Ashrae Fundamentals riporta apposite tabelle con i coefficienti suddetti che, però, sono adatti a murature non di uso comune nel nostro Paese e che, quindi, mal si adattano alle tipologie di edifici italiani; inoltre la vetustà degli stessi coefficienti (risalenti agli anni '80) fa si che essi non si adattino alle nuove esigenze costruttive che fanno uso di materiali ad alte prestazioni energetiche. Infatti le simulazioni comparative (ODESSE, Trnsys ed Energy Plus) eseguite sui 12 edifici benchmark, come descritto di seguito, evidenziano delle differenze nell'evoluzione temporale del carico termico estivo che ragionevolmente sono da attribuire in misura rilevante ai valori non corretti dei coefficienti v e w.

Per verificare la validità degli algoritmi implementati sono state effettuate una serie considerevole di simulazioni comparative con altri due software, ENERGY PLUS e TRNSYS, fra i più quotati tool di simulazioni dinamiche; gli edifici su cui sono state effettuate le simulazioni sono quelli "benchmark" utilizzati per le prime prove comparative di ODESSE, descritti in dettaglio nella relazione conclusiva del primo anno di attività.

In sintesi, si tratta di 4 edifici caratterizzati dalla stessa tipologia di involucro e da differenti caratteristiche geometriche:

- rapporto Superficie/Volume pari, rispettivamente a 0,28; 0,4; 0,5; 0,6;
- percentuale di superfici finestrate (rispetto alla superficie totale di ciascuna parete) del 15, 30 e 60%.

Sono state, inoltre, assunte le seguenti ipotesi:

- edificio con un unica zona;
- dati meteo (temperatura ambiente, irraggiamento sulle superfici): file meteo "epw" per le località di Roma (Ciampino), Milano (Malpensa) e Palermo (Punta Raisi)¹⁴;
- guadagni interni (persone, apparecchi elettrici e luci) e carico latente nulli;
- Timestep simulazione pari a 1h.

Tabella 74. Caratteristiche edifici benchmark

	Edificio "A"	Edificio "B"	Edificio "C"	Edificio "D"
Larghezza (m)	10	10	10	50
Altezza (m)	10	10	20	10
Profondità (m)	10	20	20	50
S/V	0,6	0,5	0,4	0,28

Per ciascuna simulazione sono stati valutati i carichi massimi istantanei, il fabbisogno energetico annuo, i valori istantanei dei singoli flussi componenti il guadagno termico (q_d , q_{so} , q_{st} , q_v , q_g), la temperatura interna. Occorre notare che le considerazioni che seguiranno riguardano solo la parte estiva in quanto l'algoritmo per il calcolo del carico termico in regime invernale è stato già validato, come riportato nella relazione conclusiva del primo anno di attività.

382 Volume II

.

 $^{^{14} \} Disponibili \ su: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm$

A fronte delle molteplici simulazioni effettuate dei 12 edifici "benchmark" e per ciascuna località, vengono mostrati solo i risultati delle simulazioni effettuate con il file climatico di Roma Ciampino. Si premette che i risultati dell'edificio "D" non sono riportati in quanto il confronto fra i tre programmi mostra delle incongruenze, la cui causa sarà oggetto d'indagine.

I grafici seguenti e la Tabella 75 mostrano come la differenza del fabbisogno energetico annuale determinato con Odesse e con gli altri due software vari a seconda della percentuale di superficie finestrata, passando da una sottostima per basse percentuali ad una sovrastima per valori alti. L'errore medio sugli edifici "A", "B" e "C", calcolato come:

$$1 - \frac{\mathsf{E}_{\mathsf{loadsw}}}{\mathsf{E}_{\mathsf{loadOD}}}$$
 con $\mathsf{E}_{\mathsf{loadsw}}$: fabbisogno energetico, sw: Energy Plus o Trnsys, OD ODESSE

è circa il 10% rispetto a Energy Plus e il 15% rispetto a Trnsys; per depurare il dato dalle compensazioni dovute al segno dell'errore si è calcolato anche il valore assoluto dell'errore delle singole simulazioni, ottenendo un errore rispetto a Energy Plus del 20 e del 24% rispetto a Trnsys.

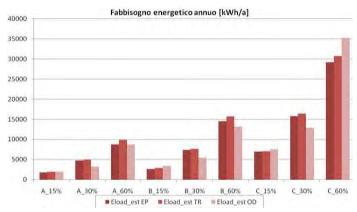


Figura 293. Fabbisogno energetico (Eload) Roma Ciampino

Tabella 75. Errore fabbisogno energetico estivo

		ERRORE		VALO	RE ASSOLUTO E	RRORE
	(1-TR/EP)	(1-EP/OD)	(1-TR/OD)	(1-TR/EP)	(1-EP/OD)	(1-TR/OD)
	Eload_est	Eload_est	Eload_est	Eload_est	Eload_est	Eload_est
Edificio_A_15%	-10.1%	6.6%	-2.8%	10.1%	6.6%	2.8%
Edificio_A_30%	-5.4%	-47.0%	-54.8%	5.4%	47.0%	54.8%
Edificio_A_60%	-12.0%	-0.6%	-12.8%	12.0%	0.6%	12.8%
Edificio_B_15%	-7.5%	21.9%	16.1%	7.5%	21.9%	16.1%
Edificio_B_30%	-4.0%	-35.4%	-40.9%	4.0%	35.4%	40.9%
Edificio_B_60%	-8.1%	-10.3%	-19.2%	8.1%	10.3%	19.2%
Edificio_C_15%	-1.2%	7.9%	6.7%	1.2%	7.9%	6.7%
Edificio_C_30%	-3.5%	-22.3%	-26.5%	3.5%	22.3%	26.5%
Edificio_C_60%	-5.1%	16.9%	12.7%	5.1%	16.9%	12.7%
Edificio_D_15%	46.9%	91.2%	95.3%	46.9%	91.2%	95.3%
Edificio_D_30%	12.9%	64.6%	69.1%	12.9%	64.6%	69.1%
Edificio_D_60%	-6.5%	24.7%	19.8%	6.5%	24.7%	19.8%
err. medio ed. A-B-C-D	-0.3%	9.9%	5.2%	10.3%	29.1%	31.4%
err. medio ed. A-B-C	-5.9%	-8.6%	-14.8%	5.9%	20.3%	23.7%

L'analisi comparativa degli andamenti temporali dei singoli flussi termici che determinano il guadagno termico dimostra come questi siano molto simili (a tratti coincidenti), per cui l'errore è da attribuire al metodo utilizzato

per determinare il carico di raffreddamento; quindi, come preannunciato, l'errore sembrerebbe attribuibile ai coefficienti delle funzioni di trasferimento v e w.

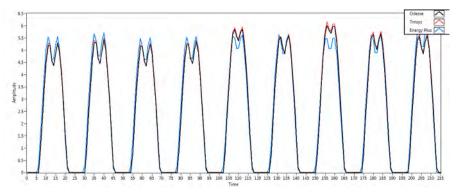


Figura 294. Andamento del flusso termico radiativo attraverso le superfici trasparenti [kW]

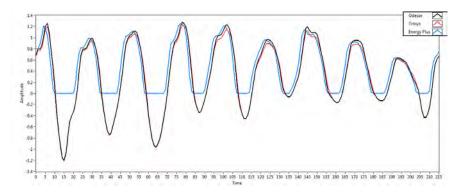


Figura 295 - Andamento del flusso termico per ventilazione [kW]

Per queste ragioni in mancanza di coefficienti v e w più precisi si è deciso di implementare un altro metodo, descritto di seguito, di più recente pubblicazione e proposto anch'esso dall'Ashrae.

o **H**eat Balance Method (HBM) e Radiant Time Series Method (RTSM)

Il *Radiant Time Series Method* deriva direttamente dal metodo di Bilancio di Calore (HBM), che viene di seguito descritto prima di passare all'RTS.

Heat Balance Method:

I processi che costituiscono il modello HBM, descritti nello schema mostrato in Figura 296, sono:

- 1. bilancio termico sulla superficie esterna
- 2. processo di conduzione del muro
- 3. bilancio termico sulla superficie interna
- 4. bilancio termico dell'aria

Lo schema mostra il processo di equilibrio termico nel dettaglio per una singola superficie opaca. La parte ombreggiata viene replicata per ciascuna delle superfici che racchiude la zona. Il processo per le superfici trasparenti è simile a quello indicato ma non ha la componente solare assorbita sulla superficie esterna che invece, è divisa in due parti: una frazione verso l'interno e una frazione verso l'esterno, che parteciperanno al bilancio termico sulle superfici interne ed esterne. Le superfici trasparenti forniscono anche una componente solare trasmessa che contribuisce al bilancio termico interno.

La formulazione del bilancio termico consiste nel descrivere matematicamente i quattro processi principali, indicati dai blocchi rettangolari riportati.

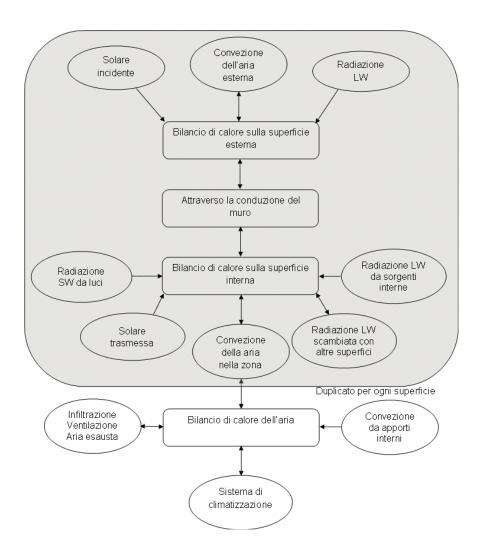


Figura 296. Descrizione del "Heat Balance Method"

Si ha bilancio termico quando la somma di tutte le componenti del flusso termico (in ingresso e in uscita) è zero:

$$\sum_{i}Q_{i}=0$$

Questo è un metodo rigoroso e, come accennato, può essere rappresentato da 4 processi distinti:

- Bilancio termico su ogni superficie esterna:

$$q_{sol} + q_{LWR} + q_{conv} - q_{conv} - q_{ko} = 0$$

con:

- q_{sol} : flusso dovuto alla radiazione solare diretta e diffusa
- q_{LWR} : flusso dovuto alla radiazione a onda lunga scambiato con l'aria circostante
- q_{conv} : flusso di scambio convettivo con l'aria esterna
- q_{ko} : flusso conduttivo all'interno del muro
- Processo di conduzione attraverso i muri che può essere risolto attraverso varie tecniche (differenze finite, elementi finiti, metodo delle trasformate, metodo delle serie temporali)
- Bilancio termico su ogni superficie interna:

$$q_{LWX} + q_{SW} + q_{LWS} + q_{ki} + q_{sol} + q_{conv} - = 0$$

con:

- q_{LWX} : flusso dovuto alla radiazione a onda lunga scambiata tra le superfici della zona

- q_{SW} : flusso dovuto alla radiazione a onda corta delle luci sulle superfici
- q_{LWS} : flusso radiativo a onda lunga dalle apparecchiature presenti
- q_{ki} : flusso conduttivo attraverso i muri
- q_{sol} : flusso radiativo solare trasmesso e assorbito alla superficie
- q_{conv} : flusso convettivo dell'aria nella zona
- Bilancio termico dell'aria:

$$q_{Conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sys} -= 0$$

con:

- q_{Conv} : calore trasferito per convezione dalle superfici
- $q_{\it CE}$: parti convettive del carico interno
- q_{IV} : carico sensibile causato da infiltrazione e ventilazione
- q_{sys} : calore trasferito a\da impianti di condizionamento e trattamento della'aria (HVAC system).

Radiant Time Series (RTS) Method

Il Radiant Time Series Method (RTSM) è un metodo relativamente nuovo per effettuare il calcolo del carico di raffrescamento, deriva direttamente dalla HBM e sostituisce tutti gli altri metodi semplificati (non a bilancio termico) come il Transfer Function Method (TFM), il Cooling Load Temperature Difference - Solar Cooling Load - Cooling Load Factor Method (CLTD - SCL - CLFM), e il Total Equivalent Temperature Difference - Time Averaging Method (TETD - TAM).

Il metodo RTS è stato sviluppato per fornire un metodo rigoroso che non richiedesse i calcoli iterativi dei metodi precedenti. Inoltre, i coefficienti usati nei calcoli, come i fattori di risposta periodica (Periodic Response Factors o PRF) e i fattori temporali radianti (Radiant Time Factors o RTF) sono di chiaro significato fisico consentendo, inoltre, di valutare gli effetti dello smorzamento e del ritardo di tempo sui guadagni di calore di conduzione e quindi la risposta della zona termica.

L'utilità del metodo RTS sta nella chiarezza della procedura, ma non nella sua semplicità. Infatti utilizza una procedura "ridotta" di bilancio termico per generare i coefficienti Radiant Time Series (RTS), che è computazionalmente laboriosa.

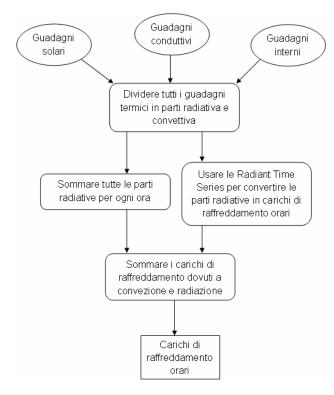


Figura 297. Procedura di calcolo del Radiant Time Series Method

I metodi semplificati precedenti dipendevano da coefficienti (room tranfer function coefficients) che nascondevano completamente l'effettivo processo di trasferimento del calore che modellavano. Invece i coefficienti RTS, basati sul bilancio termico, forniscono alcune informazioni sul rapporto tra l'edificio analizzato e la dipendenza dal tempo dei processi di trasferimento del calore dell'edificio.

Il metodo RTS riassume la risposta termica dell'edificio che deriva dal più rigoroso metodo HBM e presenta gli effetti dei processi fisici, complessi ed interdipendenti, in termini relativamente più facili da capire. L'astrazione richiede delle ipotesi semplificatrici e alcune approssimazioni. La Figura 297 mostra la procedura di calcolo che definisce il RTSM.

Nel metodo RTS il guadagno di calore conduttivo per ogni superficie viene calcolato utilizzando dei fattori di risposta aria-aria. I guadagni di calore conduttivo ed i guadagni di calore interno sono poi suddivisi in parte radiante e parte convettiva.

Tutte le parti convettive sono istantaneamente convertite in carichi di raffrescamento e sommati per ottenere la frazione oraria del carico totale di raffrescamento per convezione.

I guadagni di calore radiante per conduzione, le sorgenti interne, e la trasmissione solare sono gestiti dall'RTS per determinare la frazione di guadagno di calore che verrà convertito in un carico di raffrescamento nell'ora corrente ed in quelle successive.

Questi carichi di raffrescamento frazionario si aggiungono alle appropriate porzioni convettive orarie già calcolate per ottenere il carico totale di raffrescamento orario. Quanto detto è descritto dall'algoritmo in Figura 298.

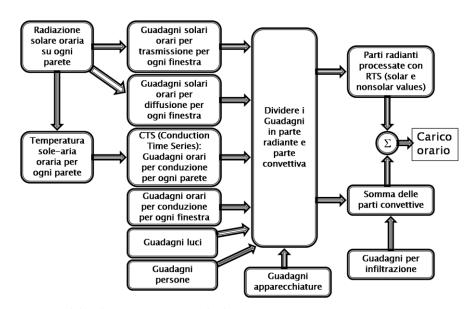


Figura 298. Descrizione del Radiant Time Series Method

La novità sostanziale descritta da tale approccio è quella di dividere i guadagni in parte radiante e parte convettiva ed applicare alla prima il processo RTS vero e proprio, cioè applicare quella parte dell'algoritmo che tiene conto dell'inerzia termica attraverso la "pesatura" con valori che tengono conto della massa dell'edificio. Si parte dai valori di radiazione oraria sulle pareti per poter calcolare i guadagni solari per trasmissione e diffusione su ogni finestra e per poter calcolare le temperature equivalenti aria-sole. Da queste ultime vengono calcolati i guadagni per conduzione attraverso il metodo CTS (Conduction Time Series). Tale approccio è descritto nell'Handbook ed in ogni caso è un metodo iterativo con dei coefficienti che descrivono il comportamento delle singole chiusure opache (inerzia termica delle pareti e delle coperture) attraverso i loro valori di massa frontale, trasmittanza e capacità termica. Da tabelle (o fogli di calcolo) ne derivano coefficienti che descrivono l'attenuazione e lo sfasamento delle stesse fino a 24 ore.

Vengono poi calcolati i guadagni per conduzione delle finestre ed infine gli apporti termici dovuti a luci, apparecchiature e persone. Come precedentemente detto, tutti i guadagni vengono suddivisi in parte radiante e parte convettiva. Tale partizione è stata ampiamente studiata dall'Ashrae.

La parte radiante viene processata attraverso dei fattori di pesatura chiamati NonSolar RTS e Solar RTS Values. Questi fattori vengono scelti in base al tipo di costruzione dell'edificio (da leggera a pesante) ed in base alla presenza o meno di moquette nella zona interna di esso. Anche questi come i coefficienti CTS sono tabellati o possono essere forniti da fogli di calcolo e tengono conto dell'inerzia fino a 24 ore.

Dopo aver trovato la parte radiante (istantanea) per ogni componente, a questa viene sommata la parte convettiva (istantanea) precedentemente tolta. In questo modo si ha la singola componente del carico a quell'istante.

Eseguendo tale procedimento per tutte le componenti e sommando i risultati ottenuti si ottiene il carico totale ora per ora.

RTS Values:

Come detto in precedenza gli RTS Values sono di 2 tipi:

- Solar: utilizzati per il guadagno dovuto alla trasmissione solare diretta (energia radiante che si assume distribuita su pavimenti e arredamento interno);
- *Nonsolar*: utilizzati per gli altri tipi di guadagni (energia radiante da persone, luci, apparecchiature, muri, pavimenti e tetti).

Il calcolo del contributo radiante del carico termico ad ogni istante, per come detto in precedenza, è:

$$Q_{\theta} = r_0 q_{\theta} + r_1 q_{\theta-\delta} + r_2 q_{\theta-2\delta} + \dots + r_{23} q_{\theta-23\delta}$$

con:

 θ : istante attuale;

r₀. r₁, r₂, ...r₂₃: RTS Values;

 $q_{\theta}q_{\theta-\delta}q_{\theta-2\delta},...q_{\theta-23\delta}$: componente del carico all'ora θ -2 δ , ... θ -23 δ rispettivamente.

Componente pareti opache

Usando la Temperatura aria-sole la componente istantanea delle pareti opache è data da:

$$q = \sum_{i} A_{i} \alpha_{pi} I_{i} + \mathbf{h_{o}}(t_{o} - t_{s}) - \varepsilon \Delta R = \sum_{i} A_{i} \mathbf{h_{o}}(t_{e} - t_{s})$$

L'ingresso della componente conduttiva del carico all'esterno è definita come:

$$q = \sum_{i} U_{i} A_{i} (t_{e} - t_{room})$$

cioè per l'nima superficie:

nelle precedenti equazioni si è usata la seguente terminologia:

- $A = area [m^2]$
- α = coefficiente di assorbimento
- I = radiazione solare [W/m²]
- h_0 = coefficiente di scambio termico [W/m²K]
- t_0 = temperatura aria esterna [K]
- t_s = temperatura superficie [K]
- ε = emissività
- ΔR = differenza tra radiazione LW cielo corpo nero [W/m²]
- $\varepsilon \Delta R \approx 0$
- $t_e = t_0 + \alpha I/h_0 + \varepsilon \Delta R/h_0 \cong t_0 + \alpha I/h_0 \underline{\text{temperatura aria-sole}}$ [K]
- $U = \text{trasmittanza} [W/m^2 K]$
- θ = istante attuale; θ n = n ore prima [h]
- t_{room} = temperatura ambiente [K]

Quindi il guadagno conduttivo attraverso le pareti e le coperture può essere calcolato usando gli ingressi per le componenti conduttive (equazione 1) per l'ora attuale e per le 23 passate, attraverso l'algoritmo CTS (Conduction Time Series):

$$q_{\theta} = c_0 q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + \dots + c_2 q_{i,\theta-23}$$

dove:
$$C_{0}$$
, C_{1} , C_{2} , ... $C_{23} = \frac{Roof}{wall}$ Conduction Time Series (CTS) factors

e q_{θ} sono le componenti che andranno divise in parte radiante e parte convettiva. Come visto la parte radiante è trattata con l'RTS e poi sommata con la restante parte convettiva per ottenere il carico totale per le pareti opache.

Componente finestre

Usando i Solar Heat Gain Coefficients calcoliamo le componenti delle finestre:

- Componente per radiazione diretta: $q_b = A \cdot I_{beam} \cdot SHGC(9) \cdot SC$
- Componente per radiazione diffusa: $q_d = A \cdot (I_d + I_r) \cdot SHGC_{Em} \cdot SC$

ed inoltre

388

• Componente per conduzione: $q_c = U \cdot A \cdot (t_{out} + t_{in})$

Nelle precedenti equazioni si è usata la seguente terminologia:

• $A = area [m^2]$

- *I_{beam}* = radiazione solare diretta [W/m²]
- I_d = radiazione solare diffusa [W/m²]
- I_r = radiazione solare riflessa (albedo) [W/m²]
- SHGC(3) = Solar Heat Gain Coefficieny funzione dell'angolo di incidenza (radiazione diretta)
- SHGC_{Em} = Solar Heat Gain Coefficieny emisferico (radiazione diffusa)
- SC = coefficiente di attenuazione
- U = trasmittanza [W/m² K]
- T_{out} = temperatura esterna [K]
- T_{in} = temperatura interna [K]

La componente q_b che dipende dalla sola componente diretta della radiazione viene trattata con i *Solar RTS Values*. Le componenti $(q_d + q_c)$ che dipendono dalla componente diffusa della radiazione (più l'albedo) la prima, e dalla sola conduzione delle finestre la seconda, vengono trattate con i *Nonsolar RTS Values*.

Da q_b calcoliamo la componente Q_b del carico e da $(q_d + q_c)$ calcoliamo la componente $Q_{diff+cond}$.

La componente totale della finestra sarà: $Q_{window} = Q_b Q_{diff+cond}$.

Confronti

Per verificare la corretta implementazione dell'algoritmo RTS in ODESSE è stato effettuato un confronto con l'esempio proposto nell'Handbook dell'Ashrae.

Vengono dati i valori di ingresso (aree, struttura e trasmittanze delle pareti e dei vetri ed esposizioni) e le condizioni al contorno (dati climatici). Vengono poi forniti i valori di uscita, cioè i guadagni ed i singoli carichi trovati con l'algoritmo. Tutti i valori sono riportati in tabelle. In ODESSE sono stati estratti i valori elaborati ad ogni passo. In questo modo si è potuto verificare se le singole componenti fossero coincidenti ed in caso negativo dove si è verificato l'errore. Ovviamente sono stati presi gli stessi coefficienti *Solar RTS e Nonsolar RTS Values*, e *CTS (Conduction Time Series)*.

Nelle Tabelle 76 e 77 possiamo verificare i corretti risultati ottenuti durante l'elaborazione dell'algoritmo e il risultato finale. Nelle colonne a sinistra (in opaco) sono riportati i valori di confronto (Handbook) ed a destra quelli di ODESSE.

Tabella 76. Confronti handbook ODESSE per la componente delle pareti opache

	PARETI							
Sol-Air Temp.		Heat Input, W (prima della CTS)		Heat Ga	in, W (dopo la CTS)	Total Cooling Load, W (dopo la CTS)		
23,2	23,2	-3	-3,51225	0	-0,6322	10	-0,48389	
22,8	22,8	-6	-5,51925	-3	-0,99346	6	-0,7604	
22,4	22,4	-8	-7,52625	-5	-4,55589	3	-3,56477	
22,1	22,1	-9	-9,0315	-7	-7,09474	1	-5,82772	
21,8	21,8	-10	-10,5368	-9	-8,8609	-1	-7,54841	
22,6	22,6406	-7	-6,31904	-9	-9,35609	-2	-8,26629	
25,8	25,7991	10	9,528734	-5	-4,41848	2	-4,71558	
29,9	29,9092	31	30,15116	9	9,268597	12	6,008554	
34	33,9907	51	50,63009	29	28,25407	28	21,71832	
37,4	37,3906	68	67,68909	48	47,96087	44	38,89938	
40,3	40,3195	83	82,38484	66	65,421	60	54,91994	
42,9	42,8982	96	95,32347	81	80,50445	73	69,26714	
51,9	51,9754	142	140,8683	101	99,82844	90	86,79185	
60,8	60,8547	187	185,4202	138	137,4393	121	118,6733	
66,3	66,3031	215	212,7576	179	177,8267	156	154,317	
67,1	67,2136	219	217,326	207	205,2368	183	181,1425	
62,7	62,7315	196	194,8371	213	211,0881	193	191,1133	
52,6	52,6745	145	144,3761	192	190,9687	181	179,4119	
36,7	36,6811	65	64,12917	144	142,9418	144	143,4273	
27,6	27,6	19	18,56475	78	77,20527	91	90,21686	
26,6	26,6	14	13,54725	32	31,80694	50	49,20369	
25,5	25,5	8	8,028	16	15,58056	30	30,24776	
24,6	24,6	4	3,51225	9	8,740485	21	20,54255	
23,9	23,9	0	0	4	4,184595	14	14,3583	

Tabella 77. Confronti handbook ODESSE per la componente dei vetri

	VETRI								
Beam	Beam Heat Gain, W		(Beam) Cooling Load, W		Total Heat Gain, W		Cooling Load, W		
0	0	57	0	-16	16,53918	32	12,65909		
0	0	57	0	-26	25,99014	20	19,89285		
0	0	57	0	-35	35,4411	11	29,15905		
0	0	57	0	-43	42,52932	1	36,39943		
0	0	57	0	-49	49,61754	-7	43,36809		
0	0	57	0	-12	11,45706	17	15,58385		
0	0	57	0	143	-143,005	135	-104,8		
0	0	56	0	316	-314,928	276	-249,461		
0	0	50	0	475	-475,052	415	-392,367		
0	0	39	0	608	-606,154	535	-516,138		
0	0	25	0	713	-713,57	634	-621,411		
0	0	12	0	826	-824,552	737	-727,664		
157	-157,824	88	-85,2251	924	-924,032	830	-825,183		
640	-638,946	371	-370,282	990	-988,242	898	-894,707		
1091	-1091,18	704	-704,097	999	-994,944	922	-917,139		
1343	-1343,07	957	-957,274	934	-934,464	883	-882,437		
1287	-1286,67	1028	-1027,28	792	-791,421	777	-776,683		
931	-930,764	882	-881,897	576	-577,17	604	-605,344		
298	-297,903	514	-513,539	293	-291,546	368	-367,997		
0	0	244	-243,676	88	-87,4214	181	-181,199		
0	0	145	-145,404	63	-63,794	131	-132,368		
0	0	98	-97,8826	38	-37,8038	95	-95,4911		
0	0	73	-74,3075	17	-16,5392	69	-68,6896		
0	0	60	-65,2538	0	0	49	-49,0064		

In particolare nella Tabella 76 abbiamo i risultati del calcolo della componente delle pareti opache e nella Tabella 77 i risultati del calcolo della componente dei vetri. Possiamo vedere che a regime i valori sono pressoché identici, mentre i valori ottenuti nelle prime 5-6 ore sono differenti. Questo accade perché in ODESSE partiamo da un istante in cui non conosciamo il carico nelle ore precedenti e quindi inizialmente i coefficienti RTS (come i CTS) moltiplicheranno valori inizializzati a 0. Andando avanti con la simulazione tale errore si riduce.

Dopo tali verifiche si è passati alla fase di confronto con gli edifici benchmark. In questo caso sono stati trovati i coefficienti RTS e CTS attraverso gli algoritmi di calcolo dell'Ashrae che vengono forniti nel Manuale "Load Calculation". Il carico estivo viene in questo caso calcolato sempre ma posto a 0 se non si supera la temperatura di comfort, in questo caso i 26 °C estivi. Otteniamo un andamento del carico totale paragonabile a quello ottenuto con altri software quali Trnsys e Energy Plus. Un esempio per uno degli edifici benchmark è riportato in Figura 299.

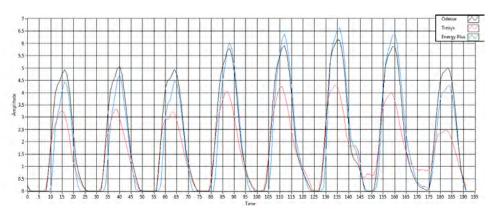


Figura 299. Carico termico totale edificio A15

Si vuole sottolineare il ruolo delicato che svolge in questo caso la temperatura interna della stanza che viene calcolata secondo l'equazione differenziale implementata in ODESSE descritta nel rapporto redatto nel primo anno di attività del progetto.

Valutazione dei profili orari di consumo di energia elettrica e ASC

Per valutare correttamente il dimensionamento e le prestazioni del sistema edificio impianto, si è ritenuto necessario implementare in ODESSE una procedura per la ricostruzione degli altri principali profili di consumo, oltre al carico termico, che caratterizzano gli edifici:

- Consumo di acqua calda sanitaria
- Consumo di energia elettrica.

Per integrare la previsione dei precedenti consumi all'interno della piattaforma di simulazione dinamica, la ricostruzione del profilo ha una definizione simile al passo di integrazione del simulatore dinamico (un'ora).

La stima del consumo elettrico e termico per ACS con passo orario consente all'utente-progettista un dimensionamento più accurato degli impianti (soprattutto in presenza di mix complessi) normalmente effettuato sul picco di domanda o addirittura sull'energia complessivamente richiesta dal carico su base annua.

La stima del profilo orario dei consumi, consente inoltre di valutare gli effettivi risparmi energetici ed economici indotti dalla scelta di più soluzioni impiantistiche.

Stima del consumo orario acqua calda sanitaria

Per valutare correttamente il dimensionamento di un impianto solare termico è necessario conoscere il consumo medio giornaliero e, nel caso si disponga di un codice di calcolo dinamico, anche il profilo orario di acqua calda sanitaria.

In questo studio è stata implementata una procedura per la stima oraria del flusso di acqua calda sanitaria consumato dalle utenze mono e multi famigliare investigando la metodologia adottata dalla Task 26 della International Energy Agency (IEA SHC): Solar Combisystems.

In particolare, vengono definite quattro categorie di carichi giornalieri per l'ACS espressi in Litri/giorno:

- Categoria A: carico di breve durata (lavaggio delle mani, ecc);
- Categoria B: medio carico (lavastoviglie, ecc);
- Categoria C: vasca da bagno;
- Categoria D: doccia.

Per ciascuna categoria è stata definita la funzione "probabilità di distribuzione" della portata media (V°_{mean}) di tipo Gaussiana, applicata ai sei profili di consumo di seguito indicati:

ACS₁₀₀: 100 litri/giorno
 ACS₂₀₀: 200 litri/giorno
 ACS₄₀₀: 400 litri/ giorno
 ACS₈₀₀: 800 litri/ giorno
 ACS₁₆₀₀: 1600 litri/ giorno
 ACS₃₂₀₀: 3200 litri/ giorno.

Per ricostruire il profilo orario di qualsiasi consumo medio giornaliero di ACS, è stata implementata in Simulink una combinazione lineare dei precedenti profili con la seguente relazione:

$$ACS_d = a \cdot ACS_{100} + b \cdot ACS_{200} + c \cdot ACS_{400} + d \cdot ACS_{800} + e \cdot ACS_{1600} + f \cdot ACS_{3200}$$

Una procedura automatizzata, associa ai coefficienti a,b,c,d,e,f valori compresi tra 0 - 1 combinando i profili orari dati per ottenere la distribuzione oraria del consumo giornaliero indicato dall'utente.

Si riporta di seguito (Figura 300) la ricostruzione del profilo orario di consumo di acqua calda sanitaria (valutato attraverso la portata di acqua complessivamente consumata per un edificio o unità immobiliare da 100 m² con un consumo medio giornaliero complessivo di 200 litri/giorno).

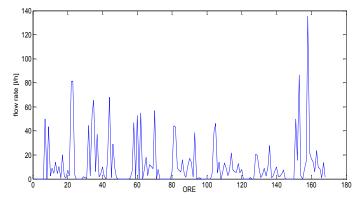


Figura 300. Distribuzione oraria del consumo netto di ACS settimanale in L/h (prima settimana dell'anno)

Diagramma orario del carico elettrico

La stima del consumo di energia elettrica per consumi non dovuti al condizionamento dell'edificio è stata effettuata elaborando un profilo "tipo" da misure reali come di seguito specificato. I dati sui fabbisogni di energia elettrica per uso residenziale sono stati estrapolati da uno studio compiuto da RSE S.p.A. (allora CISE) nell'ambito di Ricerca di Sistema (2001), dal quale è stato possibile tracciate le curve di carico relative ai fabbisogni energetici di un utenza residenziale di 40 appartamenti di diverse aree geografiche dell'Italia, differenziate cioè in base alla collocazione al Nord, al Centro e al Sud.

La ricostruzione del profilo orario medio di una utenza tipo "ufficio" è stata effettuata tramite una campagna di misura dedicata presso due edifici del centro ENEA di Casaccia: l'edificio C59 (4 piani, superficie utile 3600 m²) e l'Edificio F40. (3 piani, superficie utile 5700 m²).

La campagna di misure, durata un anno solare, è stata effettuata monitorando distintamente il consumo per illuminazione, prese e climatizzazione installando multimetri collegati con una interfaccia TCP/IP che permette di inviare i dati periodicamente presso un server centrale dove è possibile visionare, tramite apposita applicazione, sia le misure storiche sia le misure in tempo reale da qualsiasi postazione internet.

I dati acquisiti sia per l'edificio a uso uffici che per il settore residenziale, sono stati post elaborati in modo da individuare un consumo specifico orario tale da essere estrapolato con procedura automatizzata in ambiente Simulink all'effettivo consumo dell'edificio simulato.

Per un edificio (uso residenziale) costituito da una superficie utile di 400 m² in zona climatica B o C il software riproduce il seguente diagramma orario settimanale:

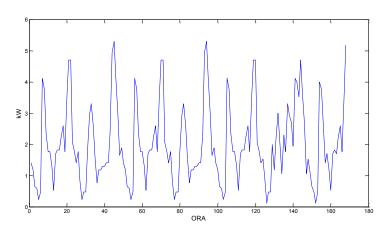


Figura 301. Diagramma di carico settimanale per edificio con superficie utile 400 m² in zona climatica B o C

L'integrale del carico orario restituisce una bolletta annua pari ad un consumo di 17.600 kWh.

Modelli impianti

Lo studio in regime dinamico del sistema edificio – impianto che si propone di effettuare la piattaforma di simulazione ODESSE non può prescindere dall'utilizzo di modelli matematici dettagliati di sistemi di generazione di energia elettrica e termica a sevizio dell'utenza simulata.

ODESSE inoltre si propone come strumento per verificare mix energetici complessi e soluzioni tecnologicamente avanzate a servizio delle utenze termiche ed elettriche dell'edificio simulato (es. impianti di micro-cogenerazione, trigenerazione, impianti elioassistiti, ecc); per cui sono stati sviluppati, in collaborazione con le principali Università italiane, i modelli matematici sia relativi alle soluzioni impiantistiche tradizionali, sia relativi a sistemi tecnologicamente evoluti. Di seguito si riporta la sintesi di alcuni modelli matematici delle soluzioni impiantistiche che verranno integrati all'interno della piattaforma ODESSE.

Modello accumulo termico

L'accumulo termico è modellato all'interno della sessione impianti e consente di valutare, in maniera semplificata, l'inerzia nel funzionamento dei sistemi di riscaldamento e condizionamento degli edifici.

La dinamica dell'accumulo termico è governato da una equazione differenziale del primo ordine attraverso la quale viene determinata ad ogni time step la temperatura media dell'accumulo (non è stata considerata la

possibilità di valutare la stratificazione della temperatura) in funzione della capacità termica totale, dell'apporto delle sorgenti ausiliare, delle dispersioni e del carico termico lato utente.

Il modello prevede l'utilizzo di una valvola a tre vie nel circuito secondario (lato edificio) per miscelare l'acqua di mandata con quella di ritorno; un regolatore PID aziona la valvola a tre vie in funzione della differenza tra la

temperatura dell'acqua di mandata e la temperatura di set point. Quest'ultima è determinata in funzione della temperatura esterna in modo da ridurre la temperatura del circuito di riscaldamento durante l'ultimo periodo della stagione invernale quando la temperatura esterna ha valori superiori alla media stagionale. Con l'utilizzo della valvola miscelatrice l'accumulo termico si mantiene in temperatura con minori apporti da parte della caldaia (vedi paragrafo successivo) e altri circuiti ausiliari presenti nel layout di impianto.

In Figura 302 si riporta l'andamento della temperatura all'interno di un accumulo termico da 5 m³; è stato simulato un periodo pari a 8 giorni con una sollecitazione a gradino all'inizio della seconda ora del primo giorno con condizione iniziale 70 °C.

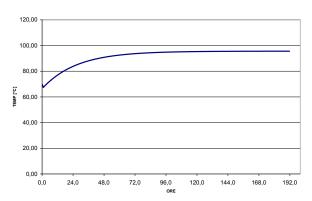


Figura 302. Risposta al gradino: modello matematico accumulo termico

Come si evince dalla Figura 302, la risposta della temperatura interna dell'accumulo, alla sollecitazione a gradino, presenta una saturazione a circa 130 ore, da cui si deduce un transitorio termico pari a circa 5 giorni, in linea con la sua costante di tempo calcolata analiticamente.

Modello caldaia a gas metano

Il modello matematico della caldaia è stato suddiviso in due blocchi Simulink: controllo e impianto.

Nel primo blocco è implementata la strategia di controllo della caldaia con logica del tipo "termostato", la caldaia si aziona o si spegne in funzione della temperatura raggiunta dall'accumulo termico rispetto da una temperatura di set point impostabile dall'utente e dipendente dal tipo di sistema di distribuzione.

Infatti, se nel layout dell'impianto termico è previsto un sistema di terminali del tipo pavimenti radianti o fan coil, la temperatura di set point sarà impostata a circa 35 °C, se invece il sistema di terminali è del tipo tradizionale (radiatori), la temperatura di set point sarà di circa 75 - 80 °C.

Al fine di evitare numerosi on-off della caldaia, è stata applicata una banda morta di ±3 °C attorno al set point di temperatura.

Nel secondo blocco è implementato il calcolo della portata di combustibile e della potenza termica erogata in funzione del rendimento termico utile dipendente dalla tipologia di caldaia scelta.

Modello impianto fotovoltaico

L'impianto fotovoltaico modellato è del tipo "grid connected", cioè connesso alla rete elettrica pubblica di bassa tensione in parallelo alle utenze dell'edificio.

Durante la simulazione dell'impianto, una parte della potenza prodotta andrà a coprire il diagramma di carico elettrico dell'edificio simulato, mentre la parte in eccesso della potenza prodotta verrà immessa in rete.

Per la modellazione matematica dell'impianto fotovoltaico sono state esaminate le curve caratteristiche di funzionamento di moduli commerciali mono e policristallino.

In particolare, dalle curve sperimentali, che forniscono la potenza erogata in funzione dell'irradianza (a temperatura costante), è stato estrapolato il funzionamento alla massima potenza erogabile dal modulo fotovoltaico al variare delle condizioni ambientali (a temperatura costante della cella).

L'algoritmo che ricerca la massima potenza erogabile dal campo fotovoltaico, MPP (Maximum power point), è implementato in tutti gli inverter commerciali per applicazioni fotovoltaiche "grid connectd", ed è necessario per far lavorare l'impianto a ciascuna ora del giorno e al variare dell'irradianza solare al massimo valore di potenza erogabile dal modulo fotovoltaico.

Per determinare l'effettiva potenza elettrica trasferita sul lato alternata (e immessa in rete) è stata implementata una curva di efficienza di un inverter "tipo" per applicazioni grid connected, variabile in funzione della potenza erogata.

Per tener conto del comportamento elettrico del generatore fotovoltaico al variare della temperatura della cella, esaminando la normativa CEI 82-25, è stata implementata la relazione che fornisce la variazione del rendimento della cella fotovoltaica e le perdite di potenza quando la cella supera la temperatura di Test Standard Condition: 25 °C.

Il calcolo della temperatura della cella è ricavato in funzione della radiazione solare incidente sul modulo e della temperatura ambiente, entrambi forniti dal weather generator di ODESSE.

Il simulatore fotovoltaico, valido esclusivamente per impianti integrati o parzialmente integrati negli edifici e per potenze installate fino a 200 kWp, include, inoltre, l'algoritmo per il calcolo dei ricavi economici derivati dall'energia annualmente prodotta, ed in particolare:

- l'incentivo pubblico "in conto energia" come previsto dal DM 19 febbraio 2007 "Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare".
- il regime di "scambio sul posto" con il Distributore locale secondo la Delibera ARG/elt 74/08.

In figura 303 si riporta la stima del profilo orario relativo alla produzione di energia elettrica da un impianto fotovoltaico da 10 kWp installato presso un edificio da 300 m² nel comune di Roma e il consumo elettrico orario dello stesso edificio, stabilito secondo le procedure precedentemente riportate.

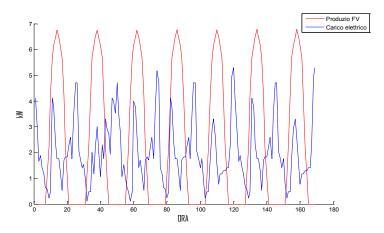


Figura 303. Produzione oraria da impianto FV con potenza installata 10 kWp (settimanale) - Profilo orario del carico elettrico totale (escluso condizionamento) per edificio da 300 m²

Stimare contemporaneamente la produzione e il consumo di energia elettrica su base oraria consente la possibilità al progettista di poter valutare correttamente i flussi energetici nelle fasce tariffarie di appartenenza associando il corretto valore alla quota parte di energia prodotta e auto consumata e alla parte immessa in rete.

In Tabella 78 è riportata la sintesi del calcolo energetico economico effettuato con il modello matematico precedentemente descritto, relativo ad un impianto fotovoltaico installato su copertura di un edificio con superficie utile 300 m² nel Comune di Roma.

Tabella 78. Calcolo energetico economico impianto fotovoltaico 10 kW installato su copertura edificio da 300 m²

Bolletta elettrica annua prima dell'installazione (quota energia)	2640	kWh
Bolletta elettrica annua dopo l'installazione (quota energia)	1652	kWh
Fabbisogno elettrico annuo	17600	kWh
Produzione annua totale da impianto FV	14770	kWh
Effettiva energia auto consumata	6951	kWh
Effettiva energia elettrica immessa in rete	8182	kWh
Risparmio in bolletta per energia auto consumata	988	€
Rimborso economico bolletta (quota energia) per servizio scambio sul posto	924	€
Effettivo costo annuo energia elettrica	728	€
Ricavo da conto energia	5466	€

o Modello Pompa di calore ad assorbimento

Le pompe di calore ad assorbimento attualmente presenti sul mercato sono del tipo acqua-ammoniaca o bromuro di litio-acqua. Sono alimentate a gpl, metano o gas, dalla cui combustione in un apposito bruciatore si ricava l'energia termica necessaria per alimentare il processo termodinamico in sostituzione dell'energia elettrica assorbita dalle classiche pompe di calore a compressore.

Il modello implementato nella piattaforma ODESSE è del tipo acqua-ammoniaca (NH_3/H_2O) in grado di produrre una potenza frigorifera di 16,9 kWf e una temperatura acqua di mandata 7 °C, con una performance (GUE) pari a 0,67 in condizioni di funzionamento nominale.

uttavia, vista la possibilità reale di utilizzare queste macchine per sfruttare il calore recuperato da effluenti caldi liquidi (alimentazione da collettore solare: solar cooling) o gassosi di scarto (es. alimentazione da fumi esausti di motori a combustione interna o microturbine per applicazioni rigenerative) e vista la presenza all'interno della piattaforma ODESSE di un mix impiantistico in grado di simulare tali configurazioni, al modello della macchina è stato integrato un modulo per sostituire il bruciatore con uno scambiatore di calore alimentato da fumi esausti o da acqua calda.

L'effettivo rendimento (GUE Gas Utilization Efficiency) della pompa di calore dipende dalla temperatura ambiente e dalla temperatura di mandata dell'acqua refrigerante, come implementato in simulink in una relazione di tipo empirico tratta da letteratura.

o Validazione modelli di calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio

Allo scopo di validare l'algoritmo di funzionamento del codice Odesse, nelle sue differenti versioni, è stata avviata una collaborazione con il Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito del Politecnico di Milano che ha avuto come oggetto un'estensiva attività comparativa con gli strumenti TRNSYSE Energy plus ai fini della validazione dello strumento ODESSE/Modulo edificio monozona e in relazione alla risoluzione di anomalie tipiche della simulazione dinamica della climatizzazione estiva.

Ai fini della verifica degli algoritmi sono stati implementati dapprima i 4 edifici tipo definiti da ENEA, dotati di differenti dimensioni, rapporti S/V, percentuali di superficie vetrata (15, 30 e 60%), ecc.. Tali edifici sono stati simulati con i tre strumenti citati e per tre differenti località climatiche (per un totale 162 casi simulati): Milano, Roma e Palermo, città scelte come rappresentative delle principali condizioni climatiche del territorio italiano.

Gli edifici fanno riferimento allo stesso pacchetto murario (doppio mattone forato con isolante) e allo stesso tipo di finestre (vetro doppio). La percentuale vetrata è stata assunta variabile tra il 15, 30 e 60% della superficie laterale complessiva. In tal modo, gli edifici simulati risultano essere tutti di tipo medio o leggero . Gli edifici sono stati introdotti come semplici parallelepipedi, con un fattore di forma variabile tra 0,3 e 0,6 m⁻¹ a seconda dell'edificio, senza alcuna ripartizione in piani e zone termiche (si sta infatti testando il modulo ODESSE monozona). Tutti gli edifici sono stati simulati con una ventilazione naturale pari a 0,5 volumi/ora costanti per tutte le ore dell'anno e senza alcun tipo di guadagno interno.

Sono stati confrontati, per tutte e tre località, gli output riguardanti i fabbisogni di riscaldamento invernale e di condizionamento estivo, l'andamento delle temperature all'interno dell'edificio e gli scambi di calore dovuti alla ventilazione e ai guadagni solari.

Nelle Figure 304-307 si riportano i risultati delle simulazioni relative alla zona climatica di Roma sia per i fabbisogni invernale che quelli estivi per le 12 tipologie di edifici analizzati.

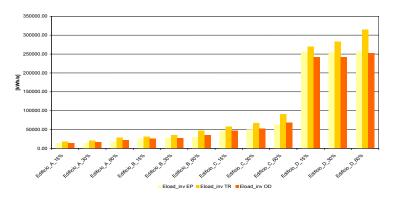


Figura 304.Confronto tra i fabbisogni energetici invernali delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

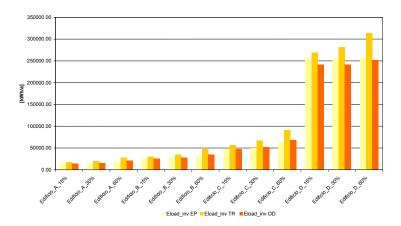


Figura 305. Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

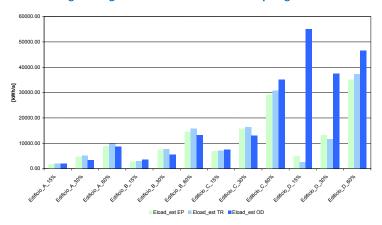


Figura 306. Confronto tra i fabbisogni energetici estivi delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

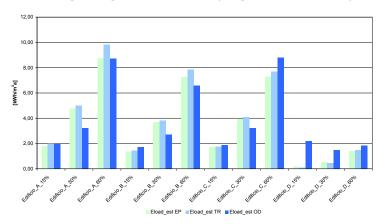


Figura 307. Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m³ delle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

Le domande di *heating* e *cooling* sono state valutate in assenza di impianto e semplicemente ponendo 20°C e 26°C come temperature di *set point*, rispettivamente, per la stagione invernale ed estiva. In generale è possibile notare delle differenze contenute nei risultati ottenuti. È possibile fare però alcune osservazioni:

- in inverno, in genere, la domanda di riscaldamento ottenuta con TRNSYS è superiore. Tale risultato potrebbe essere ricondotto alle routine di calcolo e all'adozione di una finestra tratta dalla libreria disponibile e avente proprietà leggermente differenti rispetto a quelle indicate.
- in estate vi sono differenze rispetto all'edificio D; ODESSE non si comporta come gli altri due strumenti e ciò accade con maggiore enfasi al diminuire della componente vetrata.

Per la ventilazione naturale e i guadagni solari, i 3 strumenti impiegati forniscono invece risultati del tutto confrontabili in termini di contributo alla domanda termica.

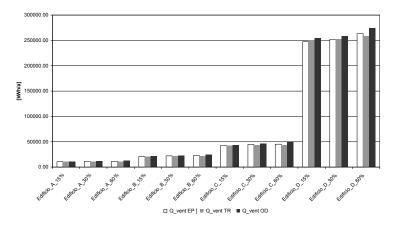


Figura 308. Confronto tra calore scambiato per ventilazione naturale nelle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

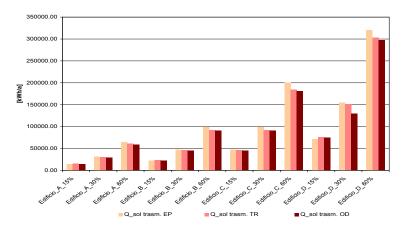


Figura 309. Confronto tra la radiazione solare attraverso i vetri nelle 12 tipologie di edifici simulate per Roma

In definitiva, complessivamente è possibile verificare congruenze significative sui risultati ottenuti con i 3 software, in particolare considerando il comportamento degli edifici A, B e C.

Come emerge dai confronti mostrati in Tabella 79 , l'errore medio tra i risultati delle simulazioni effettuate con i 3 software risulta accettabile se si considerano i tre edifici A, B, C.

Tabella 79. Confronti tra i risultati ottenuti con i tre diversi software; errore calcolato a partire dai dati in kWh/anno per i diversi casi

Edifici	Confronto ODESSE - Energy Plus (OD-EP/OD)		Confronto ODESSE – Trnsys (OD-TR/OD)		Confronto Energy Plus – Trnsys (EP-TR/EP)	
	Eload_inv	Eload_est	Eload_inv	Eload_est	Eload_inv	Eload_est
Edificio_A_15%	1,0%	6,9%	-21,7%	-2,5%	-23,0%	-10,1%
Edificio_A_30%	9,8%	-46,5%	-27,7%	-54,3%	-41,5%	-5,3%
Edificio_A_60%	19,5%	-0,5%	-31,6%	-12,2%	-63,6%	-11,7%
Edificio_B_15%	-1,8%	22,2%	-20,4%	16,3%	-18,3%	-7,5%
Edificio_B_30%	4,2%	-34,9%	-28,1%	-40,2%	-33,7%	-3,9%
Edificio_B_60%	14,0%	-9,9%	-33,3%	-18,5%	-54,9%	-7,9%
Edificio_C_15%	0,2%	8,2%	-20,7%	7,1%	-20,9%	-1,2%
Edificio_C_30%	5,7%	-21,7%	-28,6%	-25,8%	-36,4%	-3,4%
Edificio_C_60%	7,1%	17,0%	-34,4%	13,3%	-44,6%	-4,5%
Edificio_D_15%	-6,3%	91,3%	-11,7%	95,4%	-5,1%	47,0%
Edificio_D_30%	-5,3%	64,8%	-16,9%	69,3%	-11,0%	12,9%
Edificio_D_60%	-1,9%	25,1%	-24,8%	20,2%	-22,5%	-6,5%
Errore medio ed. A-B-C-D	3,8%	10,2%	-25%	6%	-31,3%	-0,2%
Errore medio ed. A-B-C	6,6%	-6,6%	-27%	-13%	-37,4%	-6,2%
Errore medio ed. D	-4,5%	60,4%	-18%	62%	-12,8%	17,8%

In tali casi, è possibile notare che, se confrontato con Energy plus, ODESSE tende a sovrastimare la domanda invernale e a sottostimare quella estiva. Tale risultato potrebbe dipendere da lievi differenze nei dati climatici impiegati o da un modo differente di trattare i guadagni solari (in ODESSE il loro effetto sarebbe dunque leggermente sottostimato). Il margine di errore è in ogni caso inferiore al 10% in termini assoluti, pertanto, lo strumento ODESSE risulta sicuramente affidabile e comparabile, in termini di prestazioni, con Energy plus.

Invece, sempre in riferimento agli edifici A, B e C, se confrontato con TRNSYS, ODESSE tende a sottostimare sia la domanda invernale sia quella estiva. Tale risultato potrebbe dipendere da lievi differenze nei dati climatici impiegati, da un modo differente di trattare i guadagni solari, da eventuali lievi differenze nelle prestazioni termofisiche delle finestre inserite ecc. In questo caso, il margine di errore è inferiore al 30% in termini assoluti; lo strumento ODESSE risulta quindi comparabile con TRNSYS.

In generale è possibile individuare un comportamento analogo dello strumento ODESSE anche per le altre due realtà climatiche di confronto (Milano e Palermo). A titolo di esempio si riporta un confronto in Figura 310.

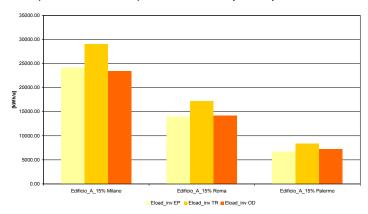


Figura 310. Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici C 30% simulati per Milano, Roma, Palermo

Poiché per l'edificio D le differenze tra i risultati ottenuti con ODESSE e quelli ottenuti con i due strumenti di confronto sono di gran lunga superiori, in particolare in relazione al comportamento estivo dell'edificio, si è provveduto a svolgere elaborazioni più specifiche e ulteriori approfondimenti. Data la grande superficie in pianta e il grande volume dell'edificio, si è pensato dapprima che lo strano comportamento potesse essere legato e eventuali instabilità di ODESSE dovute alle grandi dimensioni e al grande volume di aria coinvolto nella trasmissione del calore. Pertanto, si è pensato di affrontare delle simulazioni su edifici geometricamente simili, ma con le 3 dimensioni lineari ridotte rispettivamente a 1/3 e 1/2 di quelle originarie.

I risultati delle simulazioni ottenute con Energy plus e TRNSYS confermano la stabilità degli strumenti al variare delle dimensioni dell'edificio e sono tra loro comparabili e ragionevolmente proporzionali al variare delle geometria e delle superfici vetrate.

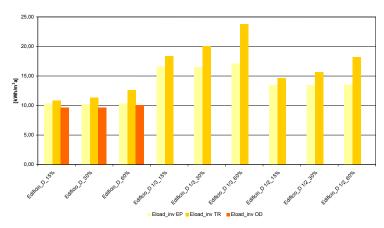


Figura 311. Confronto tra i fabbisogni energetici invernali al m³ degli edifici D, D 1/3 e D 1/2 con i 3 tipi differenti di vetrature simulati per Roma

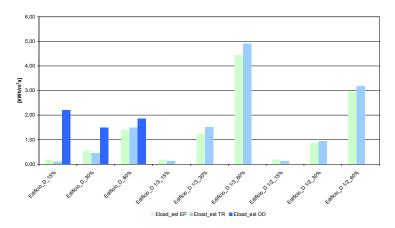


Figura 312. Confronto tra i fabbisogni energetici estivi al m3 degli edifici D, D 1/3 e D 1/2 con i 3 tipi differenti di vetrature simulati per Roma

Anche in questo caso le domande ricavate con TRNSYS sono maggiori rispetto a quelle ricavate con Energy plus sia in estate che in inverno. Tale risultato potrebbe dipendere da un modo differente di trattare i guadagni solari e da eventuali differenze nelle prestazioni termofisiche dell'involucro, in particolare delle finestre inserite.

Sulla base delle analisi comparative svolte, complessivamente è possibile verificare congruenze significative sui risultati ottenuti con i tre software, in particolare considerando il comportamento degli edifici A, B e C. In tali casi, rispetto a Energy plus, il margine di errore è in ogni caso inferiore al 10% in termini assoluti; mentre rispetto a TRNSYS, il margine di errore è inferiore al 30% in termini assoluti. In definitiva, lo strumento Odesse sembra essere sufficientemente affidabile e comparabile in termini di prestazioni di calcolo.

Confrontando i risultati ottenuti con Energy plus e quelli ottenuti con TRNSYS, si sono riscontrate differenze notevoli: le domande ricavate con TRNSYS sono maggiori rispetto a quelle ricavate con Energy plus sia in estate che in inverno (la differenza valutata in relazione agli edifici A, B e C in inverno supera il 40%).

È stato notato anche che TRNSYS presenta in genere valori di trasmissione del calore attraverso l'involucro superiori e crescenti all'aumentare della superficie vetrata. Sembrano pertanto utili ulteriori approfondimenti tesi a comprendere meglio le possibili cause del fenomeno.

o Calcolo del fattore di ombreggiamento di una superficie generica

Ai fini di un'analisi sempre più accurata del comportamento energetico dell'edificio e del calcolo dei carichi termici orari, è stato quindi sviluppato, grazie alla collaborazione con il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, un modello ad hoc per il calcolo del fattore di ombreggiamento di una superficie di forma generica, di orientamento e inclinazione qualsiasi, in presenza di condizioni al contorno complesse.

Dati la località e il periodo di tempo per il quale si desidera effettuare la simulazione, è possibile descrivere un profilo dell'orizzonte ed inserire ostruzioni esterne di varia natura, quali edifici, vegetazione ed aggetti sulla superficie, che possono essere costruiti anche attraverso file derivanti dall'ambiente AutoCAD e 3ds Max.

Il calcolo del fattore di ombreggiamento, inoltre, può essere effettuato in qualsiasi condizione di cielo, sia esso sereno, coperto o medio.

Dalla simulazione, a scelta dell'utente può essere ottenuto un valore del fattore di ombreggiamento istantaneo, medio giornaliero oppure medio mensile, a seconda del tipo di analisi che si intende condurre (integrazione del modulo in modelli stazionari, quasi-stazionari o dinamici).

La modalità con cui il modello è stato implementato, inoltre, ne permette anche un utilizzo stand alone. Tale opzione rende il modulo implementato utilizzabile dai progettisti anche al fine dell'ottimizzazione della schermatura solare adottata, della dimostrazione della sua reale efficacia (come indicato dai Dlgs. 192/05 e 311/06) e nell'applicazione delle normative tecniche per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici (UNI-TS 11300-1), utilizzando tale valore al posto dei valori indicati nelle tabelle e validi solo per schermi semplici e aventi geometrie definite.

Nello specifico, nell'ambito di questa linea di attività, la ricerca svolta dal Politecnico di Torino, prevedeva l'implementazione di algoritmi per il calcolo dell'ombreggiamento e lo sviluppo del relativo modulo in ambiente MatLab. Date le caratteristiche il prodotto software implementato potrà essere integrato nell'ambiente di

progettazione ODESSE per migliorare l'accuratezza del calcolo del fabbisogno del sistema edificio-impianti, ma potrà essere fruibile in modalità stand-alone da utenti interessati in diversa attività.

L'aspetto principale dell'algoritmo consiste nella determinazione dell'input richiesto, il quale dipende dal tipo di analisi che si intende condurre e può essere: calcolo istantaneo, medio giornaliero e medio mensile.

Definito il tipo di calcolo (*input data*), gli input richiesti dal sistema riguarderanno la posizione geografica della località (*input geografici*), le caratteristiche radiative del contesto (*input riflessione terreno*), la geometria della superficie ombreggiata (*input superficie ombreggiata*), il profilo dell'orizzonte (*input profilo dell'orizzonte*), la geometria delle ostruzioni esterne (*input ostruzioni esterne*), il tipo di vegetazione (*input vegetazione*), gli aggetti (*input aggetti*) e il tipo di cielo (*input condizioni di cielo*), come qui di seguito specificato.

Input geografici

Tramite gli input geografici l'utente inserisce all'interno del modulo le informazioni inerenti a latitudine, longitudine, altitudine e fuso orario del luogo dove viene fatto lo studio del fattore di ombreggiamento.

Il sistema dà all'utente l'opportunità di scegliere tra due opzioni: Inserimento del nome del comune; Inserimento dei parametri numerici. Se si sceglie di inserire il nome del comune, tramite un database interno il programma caricherà automaticamente la latitudine, la longitudine e l'altitudine del comune indicato. Verrà associato anche il fuso orario, che per l'Italia è pari a GMT +1. Se si sceglie la seconda opzione, le stesse informazioni che vengono caricate in automatico nel primo caso dovranno essere inserite tramite tastiera. Questo fa sì che l'utente possa considerare anche comuni esteri o frazioni di comune italiani non appartenenti al database citato in precedenza.

Input riflessione terreno

Il valore di albedo del terreno richiesto è quello medio giornaliero. I valori accettati appartengono all'intervallo [0-1], dove albedo uguale a 0 indica mancanza di riflessione, mentre albedo uguale a 1 indica che tutta la radiazione incidente viene

Input superficie ombreggiata

riflessa.

La superficie ombreggiata definisce quella porzione di piano, orientato ed inclinato, sulla quale andranno a cadere le ombre proiettate da edifici circostanti, vegetazione e aggetti adiacenti alla superficie stessa.

L'orientamento del piano, γ , e la sua inclinazione, Σ , rispetto al terreno devono essere espressi in gradi e variano rispettivamente nell'intervallo $[0, 180]^{\circ}$ e $[0, 90]^{\circ}$.

L'azimut è assunto positivo con rotazione verso Est, con lo zero corrispondente alla direzione Sud, come mostrato in Figura 313.

Ovest Nord Nord Sud Fest

Figura 313. Orientamento ed inclinazione di una qualsiasi superficie nei sistemi di riferimento globale (x, y, z) e locale (X, Y).

Il piano sul quale viene posizionata la superficie ombreggiata passa sempre per l'origine del sistema di riferimento globale (x, y, z). L'asse x corrisponde alla direzione sud, quello y alla direzione est, mentre l'asse z corriponde all'elevazione.

Ogni informazione circa la superficie ombreggiata va inserita nel sistema di riferimento locale bidimensionale (X, Y) del piano, la cui origine corrisponde a quella del sistema di riferimento globale.

La scelta della porzione di piano per il quale calcolare il fattore di ombreggiamento può essere fatta prendendo in considerazione le seguenti opzioni:

- superficie rettangolare: i dati richiesti sono altezza e larghezza della superficie (finestra, facciata o falda per la quale si vuole effettuare il calcolo) e la posizione rispetto all'origine del piano di giacitura;
- superficie curva: (tipologia circolare, ellittica con qualsiasi rotazione, ad arco di cerchio, ad arco di ellisse)
 i dati richiesti sono coordinate del centro della curva [x_c y_c], coordinate della posizione della finestra [P_x P_y], eccentricità della curva, angoli di inizio e fine arco;
- superficie particolare: viene richiesto l'inserimento da tastiera delle coordinate cartesiane che delimitano la superficie, ordinate in senso orario.

Indipendentemente dalla scelta fatta, la superficie ombreggiata dovrà essere un poligono convesso. Qualora si avesse la necessità di modellare una superficie ombreggiata concava, la geometria di tale superficie deve essere trattata come somma di superfici convesse, le quali andranno analizzate separatamente.

Input profilo dell'orizzonte

Possono essere modellati come orizzonte oggetti la cui distanza dalla superficie fa sì che essi non proiettino più ombra su di essa, ma determinino soltanto presenza o assenza di radiazione diretta. In questo modo la

presenza di un profilo dell'orizzonte introduce un "interruttore" per il quale, a seconda che il sole sia al di sopra o al di sotto dell'orizzonte, si hanno radiazione diretta, diffusa e riflessa, oppure solo radiazione diffusa e riflessa.

Per la definizione del profilo dell'orizzonte si può scegliere tra tre opzioni:

- cattura dell'orizzonte da file (formato AutoCAD e 3ds Max);
- · inserimento delle coordinate da tastiera;
- nessun orizzonte.

Input ostruzioni esterne

Le ostruzioni esterne sono costituite da tutti gli edifici ed oggetti di varia natura che, posti ad una certa distanza dalla superficie ombreggiata, proiettano la loro ombra. Delle ostruzioni fanno parte anche la vegetazione, gli aggetti orizzontali e le bande laterali.

Il modulo mette a disposizione tre opzioni per introdurre eventuali ostacoli ombreggianti:

- cattura degli oggetti vicini da file;
- inserimento delle coordinate degli oggetti vicini da tastiera;
- nessun oggetto vicino.

La prima opzione richiede il nome del file da cui importare le informazioni opportune, mentre la seconda opzione richiede l'introduzione da tastiera delle coordinate. Sia in caso di cattura dei dati da file che di inserimento da tastiera, le coordinate relative alle ostruzioni esterne devono essere inserite nel sistema di riferimento globale.

Input vegetazione

La vegetazione rappresenta un ulteriore tipo di ostruzione esterna. Dato che la rappresentazione dei particolari di un albero è molto complessa, la vegetazione viene stilizzata tramite tre figure solide (cilindro, tronco di cono ed ellissoide) con le quali si possono rappresentare un numero finito ma completo di piante.

Si può inserire la vegetazione scegliendo tra una serie di sagome già presenti su file, oppure la si può realizzare da tastiera. In primo luogo si chiede di inserire il numero di piante presenti (0 se assenti), poi, per ogni albero o arbusto, viene chiesto di scegliere se inserire un albero predefinito caricato da file, oppure un albero particolare da descrivere nel dettaglio.

Input aggetti

Tramite gli *input aggetti* viene data la possibilità di rappresentare geometricamente tutto ciò che circonda da vicino la superficie, per esempio balconi, tende da sole, sporgenze orizzontali e verticali rispetto al piano della finestra

Gli aggetti sono considerati con spessore nullo, quindi sono rappresentati da delle porzioni di piano e descritti nel sistema di riferimento locale della superficie. Gli aggetti si dividono principalmente in due tipi:

- aggetti orizzontali: ostruzioni poste sulla parte superiore della superficie;
- bande laterali: ostruzioni poste lateralmente alla superficie ombreggiata.

Qualora la superficie ombreggiata fosse diversa da quella rettangolare, le distanze degli aggetti dalla superficie sono calcolate a partire dal rettangolo che circoscrive la finestra.

Input condizioni di cielo

Una volta introdotti tutti gli input che descrivono la geometria del sistema, viene chiesto di inserire la condizione di cielo per la quale calcolare il fattore di ombreggiamento. È possibile scegliere tra:

- cielo medio (noti H_{bh} e H_{dh});
- cielo generico (noto H_{th});
- · cielo sereno.

A seconda che si sia scelto un calcolo istantaneo oppure uno medio giornaliero, sarà possibile scegliere tra tutte le opzioni, mentre, per il calcolo medio mensile, sarà disponibile il solo cielo medio.

Una volta introdotti gli input circa le condizioni di cielo, il programma calcolerà l'irradianza diretta e diffusa (calcolo istantaneo) oppure l'irraggiamento diretto e diffuso (calcolo medio) sul piano inclinato.

In presenza di ostruzioni che impediscono parzialmente la vista della volta celeste, un corretto calcolo dell'irradianza diffusa su una superficie inclinata richiede la conoscenza della distribuzione della radianza sulla volta celeste.

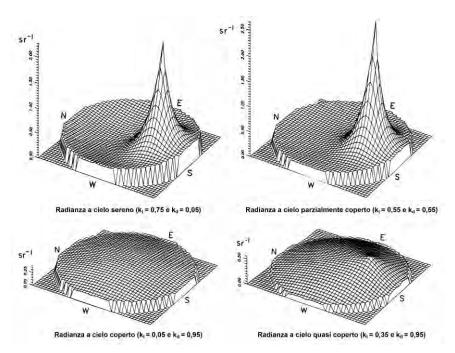


Figura 314. Esempi di distribuzioni di radianza normalizzata

Normalmente, per cieli sereni, la distribuzione della radianza mostra un'intensità massima nella zona circumsolare e un aumento di intensità verso l'orizzonte. I cieli coperti, invece, mostrano un'intensità massima in direzione dello zenit e una diminuzione monotona di intensità verso l'orizzonte. Per cieli coperti non opachi, infine, le caratteristiche mostrate dipendono dal grado di opacità delle nuvole.

Il modello di calcolo adottato per valutare la distribuzione della radianza sulla volta celeste è quello proposto da Brunger e Hooper (1993).

<u>Cielo medio (noti H_{bh} e H_{dh})</u> - Le informazioni richieste per descrivere il cielo medio sono l'irraggiamento diretto medio giornaliero su piano orizzontale, H_{bh} , e quello diffuso, H_{dh} , in MJ/m². I dati di riferimento per le località italiane sono riportati, mese per mese, nella UNI 10349:1994.

Partendo dai dati giornalieri, il programma stimerà dapprima i dati di irraggiamento globale orario secondo relazione di Collares-Pereira e Rabl come modificata da Gueymard, e poi, tramite la relazione di Liu e Jordan, stimerà i valori orari dell'irraggiamento diffuso su piano orizzontale.

L'opzione di cielo medio può essere utilizzata anche per condizioni di cielo generico, qualora siano noti i dati di irraggiamento giornaliero diretto e diffuso separatamente.

<u>Cielo generico (noto H_{th})</u> - L'informazione richiesta per descrivere il cielo generico è l'irraggiamento globale giornaliero su piano orizzontale, H_{th} , in MJ/m².

In condizioni di cielo qualsiasi, noto l'irraggiamento globale giornaliero su piano orizzontale, è possibile definire la quota di irraggiamento diretto e quella di irraggiamento diffuso. A tale scopo è stato implementato il metodo proposto da Ruiz-Arias et al. (2010).

<u>Cielo sereno</u> - In caso di cielo sereno, il calcolo dell'irradianza solare diretta e diffusa è effettuato secondo il modello REST2 (Gueymard, 2008).

I dati richiesti per il calcolo sono:

- la colonna di ozono [atm-cm] (pari a 0,35 se ignota);
- la colonna di biossido di azoto [atm-cm] (pari a 0.0002 se ignota);
- la colonna d'acqua precipitabile [cm] (pari a 1,5 se ignota);
- il coefficiente di torbidezza di Ångström [-], α_1 [-] ed α_2 [-];

La quantità e la qualità dei dati di input, qualora noti con esattezza, permettono una modellazione molto precisa della radiazione solare. Tuttavia, anche se ignoti, è possibile inserire dei valori standard.

Le informazioni più importanti per una valutazione corretta dell'irradianza solare sono il coefficiente di torbidezza di Ångström e i coefficienti α_1 ed α_2 (esponenti della lunghezza d'onda). Essi identificano la quantità di aerosol presenti in atmosfera.

 β_A varia generalmente da 0 a 0,4 per atmosfere da molto limpide a molto torbide. Se ignoto, lo si può assumere pari a:

- 0,05 per siti rurali;
- 0,10 per siti urbani;
- 0,20 per siti industriali.

Se ignoto, il valore consigliato per α_1 è di 1,3, corrispondente ad aerosol rurali. Se ignoto, si può assumere α_2 pari ad α_1 .

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIEET)

Il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIEET) dell'Università di Palermo ha effettuato lo studio di fattibilità e la progettazione preliminare di dimostratori di reti elettriche di distribuzione per la transizione verso reti elettriche attive ed è svolto all'interno dell'Obiettivo C.

Le attività si sono focalizzati sulla definizione di differenti scenari che rappresentano l'evoluzione di due reti di distribuzione (Mt e Bt) verso una tipologia di rete attiva, considerando gli aspetti tecnici ed economici. In fase di avvio delle attività, DIEET ed ENEA hanno concordato di fare riferimento: alla rete di distribuzione esistente in media e bassa tensione dell'area denominata "La Capanna" del Centro Ricerca ENEA di Casaccia ("Rete A") e alla rete di distribuzione esistente in media tensione dell'isola di Pantelleria ("Rete B").

La prima fase di attività ha riguardato la caratterizzazione delle due situazioni di riferimento. Nella seconda fase, sono stati identificati alcuni possibili scenari di sviluppo, Per entrambe le reti. Per ognuno degli scenari ipotizzati è stata effettuata una prima stima dei costi degli interventi previsti e una valutazione qualitativa dei benefici ad essi connessi.

Politecnico di Milano - Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito (BEST)

Le attività svolte dal Dipartimento BEST, riferite agli obiettivi C e D del presente tema, hanno avuto per oggetto un'estensiva attività comparativa, attraverso i software TRNSYS e Energy plus, ai fini della validazione dello strumento ODESSE/Modulo edificio monozona e in relazione alla risoluzione di anomalie tipiche della simulazione dinamica della climatizzazione estiva.

Politecnico di Torino - Dipartimento Energetica

L'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, inserita nell'obiettivo C, è stata finalizzata all'implementazione di algoritmi per il calcolo dell'ombreggiamento sull'involucro dell'edificio e allo sviluppo del relativo modulo in ambiente MatLab.

Con l'obiettivo di permettere una valutazione dettagliata dell'ombreggiamento al fine di una maggiore accuratezza nella determinazione dei carichi solari, è stato sviluppato un modello ad hoc per il calcolo del fattore di ombreggiamento di una superficie di forma generica, di orientamento ed inclinazione qualsiasi, in presenza di condizioni al contorno complesse.

Date le caratteristiche il prodotto software implementato potrà essere integrato nell'ambiente di progettazione ODESSE per migliorare l'accuratezza del calcolo del fabbisogno del sistema edificio-impianti, ma è anche fruibile in modalità stand-alone.

Università di Palermo – Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali (DREAM)

La collaborazione con il Dipartimento DREAM "Integrazioni allo sviluppo del modello di simulazione della piattaforma Odesse e implementazione di un tool di progettazione di impianti Solar DEC (Desiccant Cooling)" prevede attività nell'ambito degli obiettivi C e D.

Le attività svolte si sono articolate attraverso tre linee di ricerca: la definizione di un algoritmo utile a prevedere il valore orario del contenuto di vapore presente nell'aria esterna in un verosimile profilo climatico annuale medio, l'implementazione del metodo delle funzione di trasferimento delle pareti per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici e lo sviluppo di un tool per la progettazione dei sistemi Solar DEC in ambiente ODESSE.

Università di Roma "La Sapienza" – Centro interdisciplinare territorio edilizia restauro ambiente (CITERA)

La collaborazione con CITERA "Studio di un esempio dimostrativo di impiego di tecnologie energeticamente efficienti" svolta nell'ambito dell'obiettivo C, ha avuto per oggetto i seguenti argomenti:

- Studio di fattibilità per un'applicazione del modello di energia distribuita a scala di distretto. Nell'ottica di una diffusione capillare, su scala territoriale e urbana, del modello in esame l'analisi effettuata mira ad individuare la soluzione tecnica-impiantistica ottimale, che minimizza il tempo ritorno dell'investimento del contesto territoriale in cui si insedia. Il progetto preliminare sviluppato rappresenta un esempio dimostrativo di una "soluzione tecnologica energeticamente efficiente". Gli indicatori di riferimento presi in considerazione per i diversi scenari di definizione sono stati: i consumi in termini di energia primaria, i costi di esercizio all' attuale regime tariffario di acquisto della stessa, i costi di investimento e di gestione/manutenzione degli impianti, il corrispondente incremento di efficienza energetica.
- Studio di strategie per la gestione di reti locali con fonti energetiche rinnovabili. Nell'ambito della gestione e del controllo della rete di generazione distribuita della città universitaria "La Sapienza" di Roma è in atto lo sviluppo di un sistema di monitoraggio e di controllo dei flussi di energia delle isole energetiche. L'obiettivo perseguito è l'ottimizzazione dal lato utente della previsione della richiesta di energia e dal lato sorgente della gestione delle risorse energetiche.

DAGA Impiantil s.r.l.

Il progetto esecutivo dell'impianto di trigenerazione che servirà un edificio del Centro Ricerche ENEA Casaccia è stato affidato, attraverso un contratto di servizio. alla società DAGA Impianti. L'attività ha riguardato la progettazione esecutiva degli impianti meccanici ed elettrici per la produzione di energia elettrica frigorifera e termica al servizio delle utenze esistenti all'interno del fabbricato con la realizzazione di un impianto di trigenerazione (cogeneratore e gruppo termo frigorifero ad assorbimento associato), oltreché il coordinamento per la sicurezza in fase di progettazione per gli impianti e per le opere edili necessarie per le sistemazioni della copertura ed assistenze murarie per l'installazione delle apparecchiature.

Turco Group s.r.l.

La Turco Group ha concluso l'attività di installazione dell'impianto innovativo di climatizzazione caldo/freddo presso l'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia avviate nella precedente annualità ed condotto i test di funzionamento e collaudo.

ELENCO DOCUMENTI TECNICI

Tema di Ricerca 5.2.2.2

Sviluppo di un sistema innovativo di combustione oxy-combustion - di tipo "flameless" - di carbone per impianti di roduzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione. predisposti per la cattura della CO₂

- A. Di Nardo, G. Calchetti, B. De Caprariis, G. Calchetti, N. Verdone, C. Mongiello Modelli avanzati di combustione del carbone e della produzione di inquinanti. Simulazioni CFD del reattore ISOTHERM-ITEA alimentato con carbone Sulcis (ENEA, Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica dell'Università di Roma "La Sapienza")
- G. Calchetti, A. Di Nardo, C. Mongiello, Scalatura del reattore sperimentale ISOTHERM-ITEA da 5 MWt a 50 MWt (ENEA)
- F. Donato, B. Favini, E. Giacomazzi, F.R. Picchia, N. Arcidiacono, D. Cecere, F. Creta, Numerical Modelling of Pulverized Coal Oxy-Combustion (Dipartimento Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale dell'Università di Roma "La Sapienza", ENEA)
- T. Faravelli, E. Ranzi, A. Frassoldati, T. Maffei, Modellazione della volatilizzazione e ossidazione di carbone del Sulcis (Politecnico di Milano)
- B. de Caprariis, G. Liuzzo, N. Verdone, Produzione dei prodotti di devolatilizzazione del carbone e individuazione del modello cinetico ottimale in oxy-combustione flameless (Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza")
- A. Cavaliere, M. de Joannon, Studio delle strutture reattive locali in un bruciatore a polverino di carbone operante in condizione "flameless" (Dipartimento di Ingegneria Chimica Università di Napoli Federico II, Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR)
- R. Bruschi, M. Nobili, C. Stringola, G. Coraggio, M. Faleni, C. Galletti, L. Tognotti Test valutativo del sistema ODC su impianti IPFR e FOSPER di IFRF, operanti in condizioni di ossicombustione (ENEA, Università di Pisa, International Flame Research Foundation)
- A. D'Anna, Studio teorico-sperimentale relativo alla combustione Flameless di polverino di carbone (Università di Napoli "Federico II")
- R. Bruschi, G. Messina, Sviluppo di una pompa volumetrica per alimentazione di slurry di carbone (ENEA)
- G. Messina, S. Giammartini, "Oxygen coal pressurized combustion": simulazioni numeriche dell'impianto dimostrativo da 48 MWt (ENEA)

Tema di Ricerca 5.2.5.2

Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂

- C. Bassano, A. Assettati, G. Guidarelli, G. Manzi, M. Subrizi, P. Deiana, Sperimentazione e ottimizzazione dei processi di gassificazione del carbone (ENEA)
- A. Assettati, C. Bassano, V. Barbarossa, G. Battipaglia, G. Manzi, G. Vanga, Sperimentazione di sistemi di trattamento e conversione del syngas (ENEA)
- A. Viscogliosi, C. Bassano, P. Deiana, Analisi e modellazione di impianti di produzione elettrica a carbone equipaggiati con sistemi CCS (ENEA)
- C. Bassano, P. Deiana, Tecnologie innovative che consentano una riduzione dei costi di investimento delle centrali a polverino di carbone tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂ (ENEA)
- A.Corleto, P. Mauro, Realizzazione di attività di diffusione, informazione e allestimento sito ZEROEMISSION sulle tecnologie CCS (ENEA)
- M. Caboni, G. Calì, Migliorie di impianto e inserzione di nuova strumentazione (Sotacarbo)
- A. Pettinau, C. Frau, Sperimentazione in continuo dei processi di gassificazione (Sotacarbo)
- A. Pettinau, C. Frau, Sperimentazione con produzione di energia elettrica e idrogeno (Sotacarbo)
- G. Calì, P. Miraglia, Ottimizzazione dei sistemi di scarico ceneri (Sotacarbo)
- C. Frau, A. Pettinau, Sperimentazione di sistemi di lavaggio con liquidi e solventi di diversa natura (Sotacarbo)
- A. Orsini, Sistema di campionamento e analisi tar (Sotacarbo)
- F. Tedde, M. Caboni, G. Calì, P. Miraglia, Sperimentazione del sistema di depolverazione elettrostatica del syngas (Sotacarbo)
- A. Pettinau, C. Frau, Sperimentazione di sistemi di assorbimento dell'anidride carbonica (Sotacarbo)
- G. Calì, A.Pettinau, Progettazione dell'unità di rigenerazione termica del solvente a base amminica (Sotacarbo)
- M. Fadda, E. Maggio, Valutazione economica dei processi (Sotacarbo)
- M. Vascellari, G. Cau, Approccio CFD avanzato per la simulazione dei processi di gassificazione del polverino di carbone a letto trascinato (Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari)
- V. Tola, G. Cau, Analisi, modellazione e sperimentazione di processi di produzione e trattamento del syngas proveniente da gassificazione del carbone (Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari)
- G. Cau, S. Murgia, Modellazione e sperimentazione del processo di WGS operato sul syngas proveniente da gassificazione del carbone che utilizza CO₂ come agente gasificante (Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari)

- R. Ciccu, G. Mei, C. Tilocca, Studio sperimentale sulle miscele coal water (CWF) (Dipartimenti di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari)
- R. Ciccu, A. Mazzella, C. Tilocca, Caratterizzazione e prova di miscele di acqua e carbone e sviluppo di un sistema informativo geografico a supporto della scelta di siti idonei allo stoccaggio di CO₂ (Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari)
- R. Ciccu, A. Mazzella, C. Tilocca, Caratterizzazione e valutazione della capacità di adsorbimento/desorbimento della CO₂ del Carbone "Sulcis" (Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari)
- P. De Filippis, M. Scarsella, B. De Caprariis, G. Belotti, Tecniche di campionamento e rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas da gassificazione del carbone (Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza")
- M. G. Cutrufello, E. Rombi, I.Ferino, C. Cannas, A. Musinu, G. Piccaluga, Studio e sviluppo di processi e materiali innovativi
 per il trattamento del syngas dal carbone (Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Cagliari)
- S, Lombardi, S, Vercelli, Progetto e realizzazione di una rete di monitoraggio geochimica con controllo remoto volta alla
 caratterizzazione sperimentale dei siti idonei per il confinamento geologico della CO₂ e studio degli aspetti socio territoriali
 legati all'introduzione delle tecnologie CCS (Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma "La Sapienza", CERI)
- G. Mura, Analisi e modellazione del processo di cattura della CO₂ contenuta nel syngas da carbone (Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Cagliari)
- M. Paci, P. Tagliatesta, Studio e caratterizzazione dei principali composti provenienti dalla gassificazione del carbone (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata)
- M. Paci, P. Tagliatesta, Analisi e modellazione numerica del processo di gassificazione del carbone in reattori updraft (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali dell'Università di Pisa)

Tema di Ricerca 5.2.5.9

Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno

- C. Herce Fuente, R. Mecozzi, Interpretazione dei dati sperimentali sulla pirolisi del carbone del Sulcis con l'ausilio di codici di calcolo per la modellazione della devolatilizzazione (ENEA)
- R. Mecozzi, A. Calabrò, S. Cassani, Primo stato di avanzamento sulle attività di pirolisi del carbone Sulcis (ENEA)
- R. Mecozzi, Secondo stato di avanzamento sulle attività di pirolisi del carbone Sulcis (ENEA)
- A. Calabrò, R. Mecozzi, Programmazione delle attività teorico-sperimentali sui fenomeni di clean-up del syngas, pirolisi e devolatilizzazione del carbone (ENEA)
- S. Scaccia, A. Calabrò, Idrogassificazione del carbone Sulcis per la produzione di metano: studi preliminari (ENEA)
- A. Calabrò, Impianto ZECOMIX: Specifica di fornitura gassificatore di carbone ad ossigeno (ENEA)
- A. Calabrò, Utilizzo della cella a combustibile a carbonati fusi (MCFC) nel campo delle tecnologie CCS (ENEA)
- P.U. Foscolo, L. Di Felice, Produzione di idrogeno mediante simultanea decarbonatazione e steam reforming del syngas grezzo (Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università dell'Aquila)
- P.U. Foscolo, L. Di Felice, *Dimensionamento del decarbonatatore-reformer*. *Dimensionamento del calcinatore* (Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università dell'Aquila)
- R. Baciocchi, G. Costa, D. Zingaretti, M.Mazzotti, M. Werner, A. Polettini, R. Pomi, M. Falasca, Studio sulle potenzialità della carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio di anidride carbonica prodotta da impianti di piccola/media taglia (Università di Roma Tor Vergata, ETH Zurich Politecnico Federale di Zurigo, dell'Università di Roma "La Sapienza")

Tema di Ricerca 5.2.5.3

Sviluppo di tecnologie avanzate per componenti fotovoltaici innovativi

- F. Buatier de Mongeot, C. Martella, C. Boragno, D. Chiappe, Dispositivi fotovoltaici a film sottile potenziati da plasmoni su substrati metallo-dielettrici nanostrutturati (Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova)
- M.L. Addonizio, C. Diletto, M. Della Noce, Ottimizzazione di trattamenti superficiali e del processo di laser scribing per film di ZnO (ENEA)
- P. Morvillo, E. Giovannini, E. Bobeico, Allestimento di una linea sperimentale per la realizzazione di celle fotovoltaiche polimeriche in atmosfera controllata (ENEA)
- P. Morvillo, R. Diana, E. Bobeico, Messa a punto di un processo per la realizzazione di celle fotovoltaiche polimeriche in atmosfera controllata (ENEA)
- L. Schenetti, A. Mucci, F. Parenti, Realizzazione di polimeri semiconduttori per applicazioni in celle fotovoltaiche organiche (Dipartimento di Chimica dell'Università di Modena e Reggio Emilia)
- G. Gigli, A. Rizzo, R. Mastria, Realizzazione di celle fotovoltaiche ibride basate su una miscela di polimeri semiconduttori e nanocristalli inorganici (Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento)
- F. Biccari, C. Malerba, P. Mangiapane, A. Mittiga, E. Salza, M. Valentini, G. Arabito, L. Mannarino, Crescita e caratterizzazione di film sottili semiconduttori Cu₂-II-IV-VI₄ (ENEA)
- C. Azanza, M. D'Incau, M. Leoni, P. Scardi, Cu₂ZnSnS₄ thin films characterization by XRD (Dipartimento Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali dell'Università di Trento)

 Capizzi, A. Polimeni, M. Valentini, Caratterizzazione ottica di film di Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) (Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza")

Tema di Ricerca 5.2.5.8 Nuovo nucleare da fissione

LP1: Studi sul nuovo nucleare, e partecipazioni ad accordi internazionali/bilaterali sul nucleare da fissione. FunzioneAdvisor

- R. Tinti, Raccolta dei rendiconti della partecipazione ai Comitati internazionali sul nucleare da fissione (ENEA, CIRTEN)
- G. Glinatsis, F. Padoani, Resistenza alla proliferazione e protezione fisica: metodologie e applicazioni a sistemi innovativi in ambito GIF e IAEA (ENEA)
- M. Polidori, P. Meloni, Implementation of Thermo-Physical Properties and Thermal-Hydraulic Characteristics of Lead-Bismuth Eutectic and Lead on CATHARE Code (ENEA)
- A. Cervone, S. Manservisi, M. Polidori, P. Meloni, Valutazione e modifica del codice termoidraulico di sistema CATHARE applicato a metalli liquidi pesanti e ai dati sperimentali del benchmark LACANES (CIRTEN, ENEA)
- G.M. Giannuzzi, Relazione attività relativa all'azione CAST3M (ENEA)
- R. Calabrese, Investigations on the Italian Nuclear Scenarios (ENEA)
- M. Ricotti, G. Locatelli, M. Mancini, A. Trianni, P. Trucco, S. Boarin, Rapporto sullo sviluppo di modelli economico-finanziari per l'analisi di differenti parchi di reattori (CIRTEN)
- M. Ricotti, G. Locatelli, A. Trianni, P. Trucco, S. Boarin, Rapporto sull'analisi di uno scenario nazionale che preveda l'utilizzo di reattori di grande taglia di III generazione e, successivamente, di reattori di piccola taglia di generazione III+ (CIRTEN)
- G. Forasassi, P. Vezzoni, F. Bianchi, R. Calabrese, G. Glinatsis, A. Lantieri, S. Monti, F. Vettraino, Analisi di scenari energetici: studio preliminare dello scenario italiano (CIRTEN, ENEA)
- F. Vettraino, SMR-LR Nuclear Deployment Scenario Definition and Analysis in the Time Horizon 2020-2030: Case Study Italy (ENEA)

LP2: Reattori evolutivi INTD – International Near Term Deployment

- M. Rigamonti, Attività di predisposizione del sito per l'installazione della struttura portante SPES-3: rimozione del montacarichi esistente (SIET)
- S. Botti, Relazione tecnica intermedia sulla realizzazione della struttura portante dell'impianto SPES-3 (SIET)
- R. Ferri, SPES3-IRIS Facility RELAP5 sensitivity analyses on the containment system for design review (SIET)
- F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella, TRACE Input model for SPES-3 facility (CIRTEN)
- C. Congiu, G. Tortora, Impianto SPES-3: Design review del piping (SIET)
- R. Ferri, F. Bianchi, Follow-up of IRIS design in support to the development of the SPES-3 facility (ENEA, SIET)
- D. Papini, M. E. Ricotti, Follow-up del programma sperimentale SPES3 (CIRTEN)
- F. Romasnello, M. Furrer, M. Presaghi, A. Scotini, M. Sica, Sviluppo e calibrazione di una sonda a termocoppia riscaldata per misure di velocità in liquidi: risultati dei lavori di revisione di una catena di misura anemometrica (ENEA)
- C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, G. Monni, B. Panella, State-of-Art and selection of techniques in multiphase flow measurement (CIRTEN)
- C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, G. Monni, B. Panella, A. Mosetto, SPES-3 Facility Analysis, reference data for
 postulated Accident Simulation, Criteria for general and special instrumentation selection (CIRTEN)
- S. Gandolfi, M. Greco, SPES3 Two-phase mass flow measurements: technical specifications (SIET)
- S. Gandolfi, M. Greco, Strumentazione speciale per l'impianto sperimentale SPES-3 (SIET)
- A. Achilli, M. Greco, Progettazione di una sonda capacitiva per misurazione del grado di vuoto medio di sezione di miscele bifase acqua-vapore (SIET)
- A. Achilli, M. Greco, Two-phase flow measurement for SPES3 facility: spool piece mathematical correlations (SIET)
- C. Congiu, M. Greco, S. Gandolfi, M. Maiocchi, A. Achilli, Impianti prova barre Progetto esecutivo. Caratteristiche e dimensionamento (SIET)
- C. Congiu, M. Greco, Realizzazione del circuito prova barre (SIET)
- A, Carnevali, N. Forgione, G. Galgani, F. Oriolo, *CFD analysis in support to the experimental activity on the mixing processes in the downcomer and lower plenum of IRIS reactor* (CIRTEN)
- R. Colombo, F. Inzoli, R. Mereu, Calcoli CFD del comportamento fluido-dinamico del fondo vessel del reattore IRIS con dati sperimentali a supporto (CIRTEN)
- F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella, Modelling flow and heat transfer in helically coiled pipes. Part 2: Direct numerical simulations for laminar, transitional and weakly turbulent flow in the case of zero pitch (CIRTEN)
- F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella, Modelling flow and heat transfer in helically coiled pipes. Part 3: Assessment of turbulence models, parametrical study and proposed correlations for fully turbulent flow in the case of zero pitch (CIRTEN)

- F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella, Modelling flow and heat transfer in helically coiled pipes. Part 4: Direct numerical simulation (DNS) of turbulent flow and heat transfer in the case of zero pitch (CIRTEN)
- F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella, Modifiche del codice RELAP5 per lo studio delle perdite di carico in generatori di vapori a tubi elicoidali interessati da flussi bifase (CIRTEN)
- C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, M. Orioi, B. Panella, Instabilità termofluidodinamiche nei generatori di vapore a tubi elicoidali (CIRTEN)
- D. Papini, M. Colombo, A. Cammi, M. E. Ricotti, Progettazione di una nuova facility sperimentale (CIRTEN)
- D. Papini, M. E. Ricotti, Prove sperimentali per canali in parallelo e relative zone di instabilità (CIRTEN)
- K. W. Burn, IRIS: Monte Carlo results for selected ex-core radiation responses. Open version (ENEA)
- M. Ciotti, R. Orsi, Deterministic shielding calculations for the IRIS reactor: extended geometry (ENEA)
- M. Forni, Guidelines proposal for seismic isolation of Nuclear Power Plants (ENEA)
- A. Poggianti, M. Forni, Determinazione sperimentale delle caratteristiche di isolatori sismici in scala (ENEA)
- G. Forasassi, R. Lofrano, *Preliminary evaluation of the influence of faulted isolators in the propagation of seismic loadings* (CIRTEN)
- G. Bianchi, S. De Grandis M. Domaneschi, D. Mantegazza, F. Perotti, Seismic risk computation for the fixed-base reactor building of the IRIS NPP (CIRTEN)
- G. Bianchi, L. Corradi dell'Acqua M. Domaneschi, D. Mantegazza, F. Perotti, HDRB isolating devices: criteria for FE modeling and failure characterization (CIRTEN)
- G. Forasassi, R. Lofrano, Preliminary analysis of an aircraft impact (CIRTEN)
- A. Gandini, A. Naviglio, S. Zanot, Analisi di configurazioni critiche di noccioli PWR di piccola taglia ad alto burnup (CIRTEN)
- N. Burgio, Valutazione con metodi Monte Carlo del K∞ e del burn-up di un elemento di combustibile 17x17 per noccioli PWR di piccola taglia (ENEA)

LP3: Reattori innovativi di quarta generazione – Generation IV

- P. Gaggini, V. Labanti, Raccolta dati catene di strumentazione e elementi primari di misura della sezione di prova ICE (ENEA)
- P. Gaggini, V. Labanti, Raccolta dati componenti meccanici impianti ausiliari ICE (ENEA)
- P. Gaggini, V. Labanti, Specifica montaggio sezione sperimentale ICE (ENEA)
- P. Gaggini, V. Labanti, M. Querci, V. Sermenghi, M.Tarantino, G. Venturi, Sistema di alimentazione e controllo potenza sezione di prova ICE (ENEA)
- M. Tarantino, Integral Circulation Experiment: Thermal-Hydraulic Simulator of a LFR Primary System (ENEA)
- M. Tarantino, Progettazione concettuale dell'impianto a metallo liquido pesante HELENA per la qualifica componenti per sistemi LFR (ENEA)
- M. Tarantino, Pompa centrifuga per impianto a metallo liquido pesante (ENEA)
- N. Forgione, F. Oriolo, S. Palazzo, RELAP 5 pre-test analysis on the HELENA facility for operational transients (CIRTEN)
- A. Ciampichetti, D. Bernardi, N. Forgione, Analysis of the LBE-Water Interaction in the LIFUS 5 Facility to support the investigation of an SGTR Event in LFRs (ENEA, CIRTEN)
- A. Ciampichetti, D. Bernardi, N. Forgione, Simulation activity in support of LIFUS 5 new test section's design and test conditions setup (CIRTEN)
- A. Gessi, Realizzazione sezione di prova e provini per caratterizzazione fuori pila di materiali strutturali (ENEA)
- A. Gessi, Matrice di prova LEXURII (ENEA)
- G. Bandini, M. Polidori, Benchmark on Thermo-Fluid Dynamics of an Open Square Lattice Core of a Lead Cooled Reactor with SIMMER-III and FEM-LCORE Codes (ENEA)
- S. Bna, S. Manservisi, O.Le Bot, Simulation of the Thermo-Hydraulic Behaviour of Liquid Metal Reactors Using a Three-Dimensional Finite Element Model (CIRTEN)
- S. Dulla, P. Ravetto, S. Han, F. Alcaro, Development of a Model for Core Dynamics Neutronics (CIRTEN)
- G. Grasso, P. Console Camprini, S. Bortot, C. Artioli, C. Petrovich, S. Monti, F. Rocchi, M. Sumini, M.E. Ricotti, Static-dynamic DEMO core characterization (ENEA, CIRTEN)
- S. Bortot, A. Cammi, P. Console Camprini, C. Artioli, Sviluppo di un modello di dinamica di nocciolo per un DEMO LFR (CIRTEN)
- L. Rinaldi, S. Sau, Relazione Tecnica relativa alla realizzazione di strumentazione per la determinazione delle proprietà termofisiche di una miscela di sali fusi (ENEA)
- P. Meloni, F. S. Nitti, Pre-Test Analysis for an Experimental Campaign in the Upgraded HE-FUS3 Loop (ENEA)
- N. Burgio, Simulazioni neutroniche e progettazione set-up TAPIRO per interfaccia core-riflettore VHTR. Stima del rateo di dose equivalente sviluppata nell'attivazione dei materiali del dispositivo (ENEA)
- M. Frullini, L, Gramiccia, I. Antonelli, Simulazioni neutroniche in geometria dettagliata per la nuova configurazione del reattore TAPIRO e definizione di massima dei piani di irraggiamento della sezione di prova (CIRTEN)

LP4: Attività a supporto della individuazione e scelta di un sito e per la successiva realizzazione di un impianto di smaltimento dei rifiuti radioattivi di II categoria e di un deposito di stoccaggio a medio-lungo termine dei rifiuti ad alta attività e lunga vita (III categoria)

- R. Bove, A. Massi, M. Cozzi, DBRR-SIAP Sistema informativo ai fini dell'aggiornamento dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi e modalità di gestione futura (ENEA)
- M. Ferrando, Progetto preliminare del laboratorio di caratterizzazione radiologica mediante tecniche di analisi distruttive (ENEA)
- N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro, L. Silvi, Progetto preliminare del laboratorio di caratterizzazione radiologica mediante tecniche di analisi non distruttive (ENEA)
- A. Capone, N. Cherubini, A. Dodaro, L. Silvi, Progetto preliminare del laboratorio di caratterizzazione chimico-fisica delle matrici di contenimento dei rifiuti radioattivi (ENEA)
- N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro, L. Silvi, Progetto particolareggiato di un prototipo di sistema integrato di caratterizzazione radiologica non distruttiva (ENEA)
- R. Remetti, F. Manni, Progetto particolareggiato di un prototipo di sistema integrato di caratterizzazione radiologica non distruttiva. Progetto ed ottimizzazione della cavità di rivelazione e del sistema di termalizzazione dei neutroni; Progetto ed ottimizzazione dei targets per la produzione di radiazione X di bremsstrahlung e per la produzione di neutroni di interrogazione (CIRTEN)
- M. Mariani, S. Scaravaggi, M. Zilocchi, F. Giacobbo, Analisi critica delle norme UNI inerenti la caratterizzazione radiologica dei rifiuti radioattivi ai fini di una valutazione dei contenuti sulla base degli attuali standards internazionali e di una proposta di modifiche orientate al miglioramento e ad una maggiore fruibilità delle norme stesse (CIRTEN)
- A. Compagno, Performance assessment di depositi di smaltimento di rifiuti radioattivi: potenzialità e limiti del Codice AMBER (ENEA)
- R. Levizzari, Un approccio metodologico strutturato nella caratterizzazione geologico-ambientale di un sito per l'ubicazione di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi di seconda categoria (ENEA)
- F. Zarlenga, R. Levizzari, Considerazioni geologico-territoriali e ambientali nella scelta di un'area per l'ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi a bassa attività (ENEA)
- E. Zio, F. Cadini, J. De Sanctis, D. Avram, A. Cherubini, Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso Fase 2. Il codice AMBER (CIRTEN)
- E. Zio, F. Cadini, J. De Sanctis, D. Avram, A. Cherubini, Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso Fase 2. Definizione del Caso Studio (CIRTEN)
- M. Frullini, C. Rusconi, F. Manni, Metodologie di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi (CIRTEN)
- A.Mura, A.Orsini, Relazione di partecipazione ad ARIUS ed ERDO-WG (ENEA)
- A. Luce, Relazione di Partecipazione a "Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform (IGD-TP)" (ENEA)

LP5: Supporto all'Autorità istituzionale di sicurezza per gli iter autorizzativi, anche al fine di elevare il grado di accettazione dei reattori di III generazione. Comparazione delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche

- P. Turroni, Relazione sugli impianti nucleari evolutivi di tipo LWR (ENEA)
- L. Burgazzi, F. De Rosa, M. Sangiorgi, Sicurezza dei reattori evolutivi: confronto e considerazioni su EPR e AP1000 (ENEA)
- P. Vestrucci, G. Zappellini, Analisi delle Linee Guida IAEA ed NRC per l'Analisi dei Rapporti di Sicurezza (CIRTEN)
- R. Genovese, L. Gramiccia, A. Naviglio, D. Vitale di Maio, Analisi critica di concetti di reattori evolutivi PWR di piccola taglia ed identificazione di aree di potenziale miglioramento (CIRTEN)
- A. Di Giulio, G. Locatelli, M. Mancini, Modello flussi nella fase di realizzazione di una centrale nucleare (CIRTEN)
- L. Burgazzi, K. Burns, R. Calabrese, F. De Rosa, C. Lombardo, V. Peluso, C. Petrovich, M. Sangiorgi, *Rapporto sulla modellistica applicata ai reattori evolutivi* (ENEA)
- C. Lombardo, S. Migliori, M. Polidori, V. G. Peluso, C. Petrovich, M. Sangiorgi, Installazione e impiego di piattaforme di calcolo avanzate per le analisi di sistema e di sicurezza (ENEA)
- M. Sumini, F. Teodori, Linee guida alla valutazione del Rischio da Installazioni Nucleari (CIRTEN)
- F. Bassenghi, G. Bornia, A. Cervone, S. Manservisi, FISSICU platform on CRESCO-ENEA grid for thermal-hydraulic nuclear engineering (CIRTEN)
- A. Cammi, Relazione programmatica sul simulatore (CIRTEN)
- S. Baccaro, Qualificazione di sistemi e componenti in ambito nucleare (ENEA)
- C. Lombardo, K. Voukelatou, Interventi per il ripristino dell'impianto SPES (ENEA)
- S. Baccaro, A. Colaiuda, P. D'Attanasio, F. Frenquellucci, G. Gherardi, A. Lantieri, S. Tirini, P. Turroni, K. Voukelatou, *Programma di qualifica sperimentale* (ENEA)

- G. Cattadori, A. Achilli, S. Gandolfi, M. Rigamonti, Specifica degli interventi sugli impianti sperimentali della SIET (SIET)
- S. Gandolfi, G. Tortora, Installazione del nuovo PLC per l'area sperimentale della SIET (SIET)
- S. Gandolfi, M. Rigamonti, G. Tortora, Attività di manutenzione straordinaria su gruppi di potenza da 8 MW e 4 MW (SIET)
- G. Cattadori, Attività di termoidraulica sperimentale per la qualificazione di componenti e sistemi di reattori LWR (SIET)

LP6: Formazione scientifica funzionale alla ripresa dell'opzione nucleare in Italia

- G. Buceti, Analisi e valutazioni delle necessità formative per il programma nucleare italiano (ENEA)
- G. Forasassi, R. Lo Frano, Analisi e valutazione delle necessità formative per la ripresa del nucleare in Italia, in relazione alle necessità del mondo industriale e ad esperienze in altri paesi e organismi internazionali (CIRTEN)
- G. Forasassi, R. Lo Frano, G. Pugliese, Web pages and present studies related to the information on nuclear wastes management (CIRTEN)
- L. Gramiccia, L. Ferroni, Pagine Web e aggiornamento studi internazionali nel campo della comunicazione in tema di gestione dei rifiuti radioattivi (CIRTEN)
- G. Buceti, S. Del Bufalo, L. Moretti, D. Fioravante, E. Pasta, L'accettazione sociale del nucleare (ENEA)
- A. Andreini, A. Dattola, D. Savelli, FOCUS Fissione Nucleare: un contributo ENEA alla conoscenza (ENEA)
- G. Forasassi, R. Lo Frano, L. Moretti, Comunicazione e Informazione in tema di energia nucleare (CIRTEN, ENEA)
- G. Forasassi, R. Lo Frano, G. Buceti, Corsi e stage specialistici nucleari in Italia (CIRTEN (ENEA)

Tema 5.2.5.11

Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative

- A. Molino, G. Fiorenza, Alimentazione di celle a combustibile a carbonati fusi con gassificatori di biomasse: analisi dei sistemi di clean up del gas e accoppiamento di un gassificatore di tecnologia nazionale con uno stack di celle (ENEA)
- E. Simonetti, R. Lo Presti, C. Paoletti, F. Zaza, Effetto delle composizioni del gas anodico sulle prestazioni di cella MCFC e sviluppo di nuovi anodi alternativi (ENEA)
- A. Moreno, E. Massi, Sviluppo di sistemi alimentati con gas derivante da scarti e residui agricoli e zootecnici (ENEA)
- S. Frangini, Celle a combustibile a carbonati fusi per la cattura di CO₂ da gas combusti: prospettive e limiti di applicazione in settori industriali soggetti alla Direttiva EU-ETS (ENEA)
- G. Monteleone, M. De Francesco, S. Galli, M. Marchetti, V. Naticchioni, Alimentazione di celle a carbonati fusi con biogas: sperimentazione dei processi e progettazione di un sistema completo digestore/clean-up; prove in cella con gas simulati, con componenti sia tradizionali che innovativi. Sistemi di Purificazione. Rapporto finale (ENEA, Dipartimento Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza")
- G. Monteleone, M. De Francesco, S. Galli, M. Marchetti, V. Naticchioni, *Alimentazione di celle a carbonati fusi con biogas:* sperimentazione dei processi e progettazione di un sistema completo digestore/clean-up; prove in cella con gas simulati, con componenti sia tradizionali che innovativi. Abbattimento di H₂S mediante adsorbimento. Studio sperimentale (ENEA, Dipartimento Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza")
- A. Pozio, A. Mura, Applicazioni di ossido di titanio nano-strutturato (ENEA)
- C. Arrighetti, L. Leto, Sviluppo di un modello di calcolo per lo studio dei sistemi ibridi basati sull'accoppiamento di turbine con celle a combustibile ad ossidi solidi (Dipartimento Meccanica e Aeronautica dell'Università di Roma "La Sapienza"))
- G. Bagnasco, C. Cammarano, L. Micoli, S. Ruggiano, D. Tafuri, M. Turco, Studio sperimentale di processi per l'adsorbimento di H₂S contenuto nel biogas proveniente dalla digestione anaerobica di reflui zootecnici per invio a MCFC (Dipartimento Ingegneria Chimica dell'Università di Napoli "Federico II")
- V. Palma, E. Palo, P. Ciambelli, Alimentazione di celle a carbonati fusi con biogas: sperimentazione dei processi e progettazione di un sistema completo digestore/clean up; prove in cella con gas simulati, con componenti sia tradizionali che innovativi (Dipartimento Ingegneria Chimica e Alimentare dell'Università di Salerno)
- U. Desideri, G. Discepoli, G. Cinti, D. Penchini, E. Sisani, Studio dell'influenza di agenti contaminanti sulle prestazioni delle celle a combustibile a carbonati fusi mediante prove in monocelle MCFC (Dipartimento Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia)
- A. Polletini, R. Pomi, Messa a punto di un sistema di co-digestione anaerobica di FORSU e fanghi da depurazione di acque reflue urbane (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Edile e Ambientale dell'Università di Roma "La Sapienza")
- N. Jand, A. La Vista, P.U. Foscolo, *Hydrosin: modello del reattore di gassificazione a letto fluido internamente ricircolante, per ottimizzare l'accoppiamento con una cella a combustibile* (Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università dell'Aquila)
- K. Gallucci, L. Di Felice, P. U. Foscolo, Studi modellistici e termodinamici per l'accoppiamento dell'impianto Joule di idrogassificazione di biomasse con la MCFC da 125 kWe. Sistema di abbattimento gas acidi (Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università dell'Aquila)
- F. Reale, M. Sarnataro, S. Scarfogliero, G. F. Iuliano, A. Buonomano, Sviluppo di un modello di calcolo per la valorizzazione energetica delle biomasse prodotte dalle diverse filiere "Waste to Energy" (DETEC dell'Università di Napoli "Federico II")
- G. Mulas, Trasformazione di energia solare in energia chimica: produzione di idrogeno mediante processi fotocatalitici in soluzioni acquose (Dipartimento di Chimica dell'Università di Sassari)

- S. Licoccia, Preparazione e caratterizzazione di materiali compositi resistenti all'avvelenamento da H₂S da utilizzare come anodi per celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC) alimentate con gas proveniente da biomassa (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata)
- F. Bianco, A. C. Tito, C. Mazzocchia, *Individuazione di catalizzatori da impiegare con celle a combustibile a carbonati fusi alimentati da biogas* (Dipartimento Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano)
- L. Ferraris, Standardizzazione delle condizioni di prova per la qualifica in stack dei componenti ottenuti mediante formatura in plastico (Politecnico di Torino sede di Alessandria CESAL)
- A. Saccone, M. R. Pinasco, Supporto scientifico all'ottimizzazione della polvere di Litio Alluminato per matrici MCFC in plastico ed allo studio delle caratteristiche chimico-fisiche e microstrutturali degli elettrodi metallici (anodi, catodi) da ottenere in plastico (Dipartimento Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Genova)
- V. Verda, A. Sciacovelli, F. Colella, Modello termofluidodinamico di uno stack di celle a combustibile a carbonati fusi FN per la qualifica delle matrici in plastico e l'ottimizzazione del dispositivo (Dipartimento di Energetica delPolitecnico di Torino)
- E. Ghisolfi, Sviluppo di processi a basso costo per la produzione di matrici ed elettrodi per celle a combustibile a carbonati fusi (FN SpA Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati)

Tema di Ricerca 5.4.1.1/2

Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. interazione condizionamento e illuminazione

- G. Riva G. Murano , V. Corrado, P. Baggio, G. Antonacci, Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane (Emilia Romagna - Friuli Venezia Giulia – Liguria – Lombardia – Piemonte - Toscana – Trentino Alto Adige - Valle D'Aosta – Veneto) (CTI)
- L. Terrinoni, P. Signoretti, D. Iatauro, C. Romeo, A. Federici, *Prima applicazione dell'indice di severità climatica "Dll Weather"* per la definizione delle zone climatiche dell'Italia per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione estiva deali edifici (ENEA)
- V. Corrado, S. Paduos, Strumenti di calcolo e dati di riferimento per la certificazione energetica degli edifici (Politecnico Torino)
- P. Cesaratto, M. De Carli, Studio comparativo tra fabbisogni energetici netti, lato edificio, sia per la climatizzazione estiva che per quella invernale di edifici residenziali e del settore terziario situati in climi differenti (Università di Padova)
- L. Belicini, F. Toso, Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso alberghiero, applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani (CRESME)
- S. P. Corgnati, E. Fabrizio, F. Ariaudo, L. Rollino, Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico (medie superiori e istituti tecnici), applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani (Politecnico Torino)
- S. Ferrari, V. Zanotto, M,. Bonomi, M. Baldinazzo, Analisi delle prestazioni energetiche di un parco edifici del terziario (Politecnico di Milano, Campus Città e Campus Bovisa), con particolare riferimento al potenziale di riduzione degli consumi elettrici in fase d'uso (Dipartimento di Energia del Politecnico Milano)
- L. Pagliano, M. Pietrobon, P Zangheri, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico. Applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani (Dipartimento di Energia del Politecnico Milano)
- P. Romagnoni, E. Antonini, M. Boscolo. F. Cappelletti, Riqualificazione di edifici scolastici: risultati di una campagna di monitoraggio energetico (Università di Venezia)
- F. Bianchi, M. Acciari, S. Fiori, M. E. Cannata, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso commerciale grande distribuzione applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani (Architettura dell'Università Roma TRE)
- Ezio Santi, Stefano Elia, Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso grande distribuzione commerciale (Dipartimento Ingegneria Energetica dell'Università di Roma "La Sapienza")
- F. Belcastro, D. Di Santo, G. Fasano, Indici di benchmark di consumo per diverse tipologie di edificio e all'applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani negli edifici ospedalieri (ENEA, Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia FIRE)
- F. Margiotta, Metodologia per la determinazione delle caratteristiche strutturali ed impiantistiche di "Edifici Tipo" del Parco Edilizio Nazionale ad uso ufficio e Valutazione del Potenziale di Risparmio energetico sulla base della fattibilità degli interventi di riqualificazione energetica (FIRE)
- A. Fanchiotti, E, Carnielo, Impatto di tecnologie Cool Roof sulle prestazioni energetiche degli edifici. Caso studio (Università di Roma TRF)
- P. lacomussi, G. Rossi, Proprietà ottiche e termiche dei manti stradali e condizioni di applicazione nell'illuminotecnica e nell'analisi dell'isola di calore urbana (INRIM)
- M. Zinzi, E. Carnielo, Impatto di tecnologie cool roof sulle prestazioni energetiche di edifici residenziali in area mediterranea (ENEA)
- M. Zinzi, S. Agnoli, G. Fasano, Impatto dei sistemi schermanti sulle prestazioni energetiche ed illuminotecniche di edifici per uffici (ENEA)
- M. Cellura, Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione
 estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione interazione condizionamento e illuminazione. Attività della Task
 40 dell'International Energy Agency (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali dell'Università di Palermo)

- F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti. *Linee guida per l'utilizzazione della luce naturale. Attività della Task 45 dell'International Energy Agency* (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma "La Sapienza")
- S. Ferrari, M. Lavagna, V. Zanotto, Holistic Assessment Tool-Kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings (EnERGO). Attività della Task 46 dell'International Energy Agency (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- M. Masoero, C. Silvi, J. Toniolo, Casi di studio di sistemi a pompa di calore per edifici del terziario. Attività della Task 48 dell'International Energy Agency (Politecnico di Torino)
- P. Caputo, A. Angelotti, Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Attività della Task 49 dell'International Energy Agency (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- M. Filippi, S. P. Corgnati, F. Causone, N. Tala, R. Daniela, V. Fabi, Total Energy Use in Buildings Analysis and evaluation methods. Attività della Task 53 dell'International Energy Agency (Politecnico di Torino)

Tema di Ricerca 5.4.1.3

Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili

- L. Rubini, M. Di Veroli, G. Habib, M. Lavra, Studio sulla applicabilità di sistemi e componenti assistiti da fonti rinnovabili (ISES
 International Solar Energy Society ITALIA)
- A. Mottana, M.P. Campolunghi, Strutturazione di una banca dati in ambiente G.I.S. per lo sviluppo di impianti innovativi finalizzati alla gestione delle georisorse (Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma TRE)
- A. Simonetti, G. Corallo, R. Caria, L. Cipolletta, Realizzazione dell'impianto di solar cooling dell'edificio F51 del Centro ENEA della Casaccia - Monitoraggio dell'impianto (ENEA)
- M. Beccali, P. Finocchiaro, B. Nocke, Studio sperimentale per l'ottimizzazione energetica di cicli di trattamento desiccant cooling (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali dell'Università di Palermo)
- V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio, Analisi delle problematiche connesse alla caratterizzazione energetica di collettori a media temperatura e realizzazione delle facility necessarie alla qualificazione e sperimentazione di componenti solari a media temperatura (ENEA)
- G. Corallo, A. Simonetti, A. Franchi, R. Latini, R. Trinchieri, Realizzazione di una test facility per pompe di calore con evaporatore elioassistito (ENEA)
- G. Corallo, Studio preliminare e realizzazione di un prototipo reversibile di macchina ad assorbimento da 18 kW con alimentazione ad acqua calda da adibire al solar cooling and heating (ENEA)
- A.Mariani, N. Calabrese, L. Simonetti, A. Lattanzi, Realizzazione di una test facility per la caratterizzazione di heat pipe utilizzati per la realizzazione di pannelli solari del tipo a tubi evacuati (ENEA)
- L. Pistocchini, Ottimizzazione termofluidodinamica e dimensionamento di uno scambiatore di calore in controcorrente con layer adsorbenti e raffreddamento evaporativo indiretto (ECOS) per impianti innovativi di solar air-conditioning destinati a utenti industriali e commerciali (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- M. Beccali, P. Finocchiaro, B. Nocke, *Sviluppo della nuova logica di controllo per il sistema di solar cooling DEC* (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali dell'Università di Palermo)
- M. Motta, Relazione sulle attività del Task 38 Solar Air-Conditioning and Refrigeration del "Solar Heating and Cooling" Programme - Agenzia Internazionale dell'Energia (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- M. Beccali, Partecipazione al gruppo di lavoro internazionale del Task 38 "Solar Air Conditioning and Refrigeration", IEA Solar Heating and Cooling. Partecipazione al gruppo di lavoro internazionale del Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration", IEA Solar Heating and Cooling (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali dell'Università di Palermo)

Tema di Ricerca 5.4.3.1

Elettrotecnologie innovative per i settori produttivi: applicazioni su scala reale

- M. Bianchi, P.R. Spina, Integrazione di sistemi cogenerativi innovativi di piccolissima taglia nelle reti di distribuzione dell'energia elettrica, termica e frigorifera (Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia Università di Bologna; Dipartimento di Ingegneria Università di Ferrara)
- D. Di Santo, D. Forni, M. Bramucci, Uso razionale dell'energia nei centri di calcolo (FIRE Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia)
- N. Anglani, G. Petrecca, E. Ferrero, Opportunità di ottimizzazione dei consumi nella produzione, distribuzione, utilizzo dell'aria compressa nei settori industriali più sensibili (Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università di Pavia, ENEA)
- D. Di Santo, D. Forni, M. Bramucci, Linee guida per la progettazione di datacenter ad alta efficienza (Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia - FIRE)
- D. Di Santo, Osservazioni sul meccanismo dei Certificati Bianchi e spunti per l'aggiornamento (Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia - FIRE)
- V. Venturini, Il meccanismo dei Certificati Bianchi in Europa (Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia FIRE)
- E. Biele, M. Bramucci, D. Forni, E. Ferrero, Metodologie per la definizione di risparmi energetici, nell'ambito del meccanismo dei titoli di efficienza energetica, attraverso metodologie semplificate (Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia – FIRE, ENEA)

- M. Badami, A. Portoraro, Micro-cogenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di motori a combustione interna: sviluppo di un modello matematico per la simulazione oraria e analisi di un caso reale (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino)
- E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino, Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: realizzazione di un tool di progettazione per il dimensionamento su basi statistiche e validazione sperimentale della modellistica atta a descrivere le performance di tali sistemi di accumulo (Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano)
- E. Pagano, P. Tricoli, Impianti industriali di sollevamento con sistemi di accumulo elettrici a supercondensatori: gestione con
 convertitori interfaccia per scambi energetici mutui (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli "Federico
 II")
- A. Di Napoli, C. Polini, Messa a punto e validazione di un software di simulazione in simulink per il controllo di una piccola rete in utenze caratterizzate da assorbimenti discontinui di potenza e/o in applicazioni di peak-shaving (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università di Roma TRE)
- M. Conte, M. Pasquali, F. Vellucci, Sistema di accumulo con batterie al litio nel terziario: l'applicazione ad una funivia (ENEA)
- R. Giglioli, M. Ceraolo, Installazione sperimentale pilota per l'applicazione di batterie a sistemi di trasporto a fune (Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa)
- F. Alessandrini, G. B. Appetecchi, M. Conte, Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie al litio nelle reti elettriche stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici (ENEA)
- R. Giglioli, D. Poli, Valutazione dell'impatto dell'utilizzo delle batterie al litio nelle applicazioni stazionarie (Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa)

Tema di Ricerca 5.4.3.2

Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica

- P. Soardo, Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l'alto (AIDI, Associazione Italiana Di Illuminazione)
- Progetto MSE-ENEA: Illuminazione Pubblica Marcallo con Casone (ASSIL)
- F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti, Confronto tra software illuminotecnici (Dipartimento di Fisica Tecnica, dell'Università di Roma "La Sapienza")
- F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti, Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes) (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma "La Sapienza")
- F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti, *Metodologie di progettazione e valutazione di sistemi di illuminazione pubblica* (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma "La Sapienza")
- F. Bisegna, F. Gugliermetti, M. Barbalace, L. Monti, *Applicazione della metodologia di progettazione dell'illuminazione urbana* (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma "La Sapienza")
- G.Forcolini, M.Rossi, Contributo per la realizzazione pilota di illuminazione efficiente in una situazione applicativa.
 Progettazione della illuminazione pubblica di uno dei casi studio (zone campione di Piazza Italia a Marcallo) (Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano)
- M. Rossi, F. Musante, Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo del software per progettazione illuminotecnica mirata all'efficienza energetica (Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano)
- M. Rossi, F. Musante, Contributo alla ricerca sperimentale su prodotti innovativi, sviluppo di sistemi di controllo intelligenti, misure di laboratorio (Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano)
- D. Gadia, D. Villa, Visualizzazione in ambienti di Realtà Virtuale di scenari fotorealistici basati su dati e calcoli illuminotecnici.
 Applicazione agli esterni urbani (Dipartimento di Informatica e Comunicazione dell'Università di Milano)
- S. Fumagalli, G. Leonardi, Il laboratorio di prova per le verifiche energetico-ambientali di sistemi di illuminazione "CORVO" (ENEA)
- S. Fumagalli, G. Leonardi, A. Frascone, R. Pollidori, V. Longoni, Requisiti illuminotecnici in zone campione del Comune di Marcallo con Casone (ENEA)
- Progetto Stapelia (ENEA, OMEGA Impianti)
- F. Moretti, M. Annunziato, S. Panzieri, Sviluppo di un sistema di controllo integrato ed adattivo per l'illuminazione pubblica (ENEA, Dipartimento di Informatica e Automazione dell'Università di Roma TRE)
- P. lacomussi, G. Rossi, Caratterizzazione di impianti di illuminazione ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto (INRIM)
- G. Giuliani, N. Gozo, C. Honorati Consonni, C. Meloni, R. Pollidori, M. Annunziato, Il Progetto Lumière (ENEA)
- Presentazione del Progetto Lumière (ENEA)

Tema di Ricerca 5.4.4.7/8

Sviluppo di strumenti di programmazione e pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana

■ F. Ceravolo, B. Di Pietra, F. Margiotta, G. Puglisi, *ODESSE: simulazione dinamica del sistema edificio-impianti per la climatizzazione estiva* (ENEA)

- L. Castellazzi, B. Di Pietra, Studio e progettazione di un impianto di trigenerazione dimostrativo presso il Centro ENEA di Casaccia (ENEA)
- M. Presutto, S. Fumagalli, Sviluppo di specifiche per la progettazione ecocompatibile: definizione metodi e acquisizione strumentazione tecnico-scientifica (ENEA)
- G. Villani, V. Tarantini, G. P. Bottani, G. Leonardi, V. Longoni, Il laboratorio ENEA sugli elettrodomestici del freddo e forni elettrici: caratteristiche e potenzialità di prova (ENEA)
- M. Presutto, S. Fumagalli, D. Scarano, Il mercato degli elettrodomestici e la sua evoluzione temporale (ENEA)
- M. Presutto, P. Pistochini, V. Longoni, I laboratori per la market surveillance sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica (ENEA)
- V. Corrado, V. Serra, Y. Cascone, C. Toma, Calcolo dell'ombreggiamento sull'involucro dell'edificio (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino)
- L. de Santoli, G. Caruso, F. Bonfà, Studio di un esempio dimostrativo di impiego di tecnologie energeticamente efficienti (Centro Interdisciplinare Territorio Edilizia Restauro Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza")
- M. Beccali, V. Lo Brano, A. Orioli, Integrazioni allo sviluppo del modello di simulazione della piattaforma ODESSE e implementazione di un tool di progettazione di impianti Solar DEC (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali dell'Università di Palermo)
- P. Caputo, S. Ferrari, G. Costa, *Strategie e modelli di efficienza energetica alla scala urbana* (Dipartimento di Scienza e Tecnologia dell'Ambiente Costruito del Politecnico di Milano)
- I. Bertini, V. Cosentino, S. Favuzza, G. Graditi, M.G. Ippolito, F. Massaro, E. Riva Sanseverino, G. Zizzo, Studio di fattibilità e progettazione preliminare di dimostratori di reti elettriche di distribuzione per la transizione verso reti attive Caratterizzazione delle reti attuali e analisi di possibili scenari di sviluppo (Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni dell'Università di Palermo; ENEA)
- I Bertini, S. Favuzza, G. Graditi, M. G. Ippolito, F. Massaro, R. Musca, E. Riva Sanseverino, G. Zizzo, Studio di fattibilità e progettazione preliminare di dimostratori di reti elettriche di distribuzione per la transizione verso reti attive Simulazioni e valutazioni di progetto per gli scenari selezionati (Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni dell'Università di Palermo; ENEA)

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito ENEA all'indirizzo:

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico



Edito dall'ENEA

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

www.enea.it

Copertina: Bruno Giovannetti