

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del primo anno di attività

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO  
Risultati del primo anno di attività

A cura di *Marina Ronchetti*

con i contributi di  
*S. Giammartini, P. Deiana, A. Calabrò, V. Motola, S. Monti, A. Moreno,  
M. Citterio, G. Fasano, I. Bertini, E. Ferrero,*

2010 ENEA  
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76  
00196 Roma

ISBN 978-88-8286-230-5



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

Accordo di Programma MSE-ENEA

## **RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO**

Risultati del primo anno di attività

a cura di

Marina Ronchetti

con i contributi di

S. Giammartini, P. Deiana, A. Calabrò, V. Motola, S. Monti,  
A. Moreno, M. Citterio, G. Fasano, I. Bertini, E. Ferrero

### *Ringraziamenti*

Un sentito ringraziamento ai colleghi che hanno partecipato all'elaborazione della pubblicazione:

Vincenzo Cincotti  
Vincenzo Gerardi  
Agostino Iacobazzi  
Rosa Provaroni



|                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PRESENTAZIONE .....                                                                                                                                                                                                                      | 7   |
| PRODUZIONE DI ENERGIA E FONTI RINNOVABILI                                                                                                                                                                                                |     |
| Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone .....                                                                                                                             | 9   |
| <i>Responsabile scientifico: Stefano Giammartini</i>                                                                                                                                                                                     |     |
| Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO <sub>2</sub> .....                                                                                                                                             | 29  |
| <i>Responsabile scientifico: Paolo Deiana</i>                                                                                                                                                                                            |     |
| Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno .....                                                                                                                                                            | 89  |
| <i>Responsabile scientifico: Antonio Calabrò</i>                                                                                                                                                                                         |     |
| Censimento del potenziale energetico nazionale delle biomasse .....                                                                                                                                                                      | 111 |
| <i>Responsabile scientifico: Vincenzo Motola</i>                                                                                                                                                                                         |     |
| Nuovo nucleare da fissione .....                                                                                                                                                                                                         | 137 |
| <i>Responsabile scientifico: Stefano Monti</i>                                                                                                                                                                                           |     |
| Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative .....                                                                                                                                                                     | 155 |
| <i>Responsabile scientifico: Angelo Moreno</i>                                                                                                                                                                                           |     |
| 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 illuminazione .....   | 177 |
| <i>Responsabile scientifico: Marco Citterio</i>                                                                                                                                                                                          |     |
| Sviluppo di linee guide ed indici di riferimento per il legislatore .....                                                                                                                                                                | 191 |
| <i>Responsabile scientifico: Gaetano Fasano</i>                                                                                                                                                                                          |     |
| Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e di pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana ..... | 239 |
| <i>Responsabile scientifico: Ilaria Bertini</i>                                                                                                                                                                                          |     |
| Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali .....                                                                                                                                                                 | 277 |
| <i>Responsabile scientifico: Ennio Ferrero</i>                                                                                                                                                                                           |     |
| ELENCO DOCUMENTI TECNICI .....                                                                                                                                                                                                           | 341 |



## Presentazione

Il presente volume riporta i risultati delle attività svolte dall'ENEA, in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 24 Università e 48 dipartimenti coinvolti) e le società partecipate Sotacarbo ed FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, nella prima annualità dell'Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico 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, 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 stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo 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 dieci tematiche di ricerca all'interno, come previsto dal Piano triennale, di due grandi aree di ricerca: Area Produzione e fonti energetiche (studi e ricerche sulle biomasse, sull'utilizzo sostenibile del carbone e le tecnologie di cattura e sequestro dell'anidride carbonica, sul nuovo nucleare da fissione e sullo sviluppo di celle a combustibile) e Area Usi finali (sviluppo di linee guida e studi prenormativi a supporto del legislatore, determinazione dei fabbisogni energetici nel settore civile residenziale e non e studi sull'interazione condizionamento illuminazione, applicazioni di elettrotecnologie innovative per i settori produttivi).

Di seguito per ognuna delle 10 tematiche di ricerca viene riportata una sintetica 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/attivita\\_ricerca/energia/ricerca\\_sistema\\_elettrico.html](http://www.enea.it/attivita_ricerca/energia/ricerca_sistema_elettrico.html)), che consente di accedere a tutta la documentazione tecnica prodotta.

*Vincenzo Porpiglia*  
*Responsabile Unità di Progetto*  
*Ricerca di Sistema Elettrico*



## Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone

Il carbone rappresenta oggi a livello internazionale un'alternativa concreta e sicura per la produzione di energia. Il nostro Paese, in questo quadro, si sta indirizzando verso un incremento nell'uso di tale fonte (oggi allo 11% contro il 34% medio dell'Europa) anche attraverso un insieme di attività di R&S volte allo sviluppo di tecnologie pulite, in grado di aumentare l'efficienza di conversione e nello stesso tempo contenere i costi di investimento.

Dal punto di vista ambientale l'utilizzo tecnologicamente avanzato del carbone consente di raggiungere limiti di emissioni contenuti e molto al di sotto di quelli consentiti dalla legge, per la SO<sub>2</sub>, per gli NO<sub>x</sub> e per le polveri, mentre per i metalli pesanti sono ancora necessari ulteriori miglioramenti. Per quanto riguarda la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> si può intervenire sicuramente attraverso l'incremento dell'efficienza, ma ancor più significativamente attraverso la separazione, cattura e successivo sequestro.

Il carbone può essere impiegato in impianti a vapore (SC e USC) oppure in impianti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycles): in un caso si ha combustione diretta del polverino di carbone in una caldaia per la produzione di vapore, nel secondo caso esso viene prima gassificato e poi ossidato in un combustore di turbogas; in entrambi i casi si pone l'esigenza di ridurre fortemente le emissioni di CO<sub>2</sub> anche attraverso lo sviluppo di tecnologie CCS (Carbon Capture and Storage).

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 due volte innovativo:

- perché realizza una combustione altamente controllabile, efficiente ed a bassissime emissioni, di tipo flameless;
- perché si basa sulla oxy-combustione, che mira alla separazione e cattura della CO<sub>2</sub> prodotta, per un suo successivo confinamento geologico.

La più elevata efficienza energetica della nuova camera di combustione è ottenuta adottando la tecnica di combustione "*Flameless*", nota anche come combustione "senza fiamma" in considerazione della mancanza di un vero e proprio fronte di fiamma e della bassa emissività nel visibile della reazione. In essa viene realizzata una combustione diffusa in un volume omotermo, in maniera molto vicina ad un "*volume combustor*" ideale, ottenendo efficienze di ossidazione elevate anche con combustibili di basso pregio e potere calorifico. La reazione esotermica avviene all'interno di un fluido di lavoro prevalentemente costituito da prodotti di reazione (uniformità chimica) riciccolanti, via via arricchiti di ossigeno puro.

La combustione con ossigeno (*oxy-combustion*) produce un effluente gassoso da cui, per condensazione del contenuto di vapore, si ricava CO<sub>2</sub> concentrata disponibile ad un processo di cattura. Si desidera rimarcare quest'ultima considerazione, in quanto la possibilità di catturare CO<sub>2</sub> costituirà un fattore economico-competitivo da considerare nello sviluppo dei sistemi futuri. Ad oggi 1 ton di CO<sub>2</sub> in un ipotetico mercato di scambio di inquinanti quale quello americano per gli NO<sub>x</sub>, o normativo (Carbon Tax), è valutabile tra i 20 ed i 40 €/t, di cui più del 75% sono rappresentati dal costo di separazione dall'effluente, mentre la quota minoritaria pari a circa il 25% quale costo di segregazione.

Il nuovo sistema di combustione opera in pressione, a temperatura alta ed uniforme. Azzerà nei fumi gli inorganici tossici, e fonde le ceneri incombustibili, impiegando combustibili di qualsiasi tipo, gassosi liquidi e solidi. Riduce pertanto drasticamente le problematiche legate alle caratteristiche dei fumi di combustione da combustibili "sporchi" come il carbone, ed in particolare quello del Sulcis, offrendo di conseguenza una drastica riduzione dei limiti e delle complessità, connesse ai sistemi pratici di produzione ed al raggiungimento di valori di efficienza di conversione voluti.

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, NO<sub>x</sub>, metalli pesanti, ed altri inquinanti, riducendo significativamente la necessità di sistemi di depurazione dei gas;
- produzione di scorie vetrificate inerti facilmente riciclabili;

- gas combustibili costituiti prevalentemente da CO<sub>2</sub> e da vapor d'acqua, il che consente la cattura e la separazione della CO<sub>2</sub> senza pesanti penalizzazioni economiche ed energetiche;
- rendimenti complessivi nella produzione di energia elettrica più elevati rispetto ai tradizionali cicli a vapore in configurazione con sequestro della CO<sub>2</sub>. 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;

Si fa presente che la tecnologia di Ossi-Combustione rappresenta una delle tre possibili tecnologie genericamente indicate con l'acronimo di CCS. Essa tuttavia "viaggia" su canali assolutamente paralleli alle tecnologie di Pre e Post-Combustione, non prevedendo particolari trattamenti preliminari del combustibile, né interventi gravosi per la successiva separazione della CO<sub>2</sub> dagli effluenti.

Un possibile ed auspicabile punto di convergenza si può altresì trovare a valle della separazione, per quanto attiene ai problemi di stoccaggio, ed in particolare per quanto riguarda l'aspetto della qualità della CO<sub>2</sub> catturata e della sua purificazione, prima di procedere al suo sequestro geologico.

La tecnologia flameless ha avuto significative (in Italia solo sporadiche) applicazioni in campo siderurgico, relativamente al settore dei forni di riscaldamento e trattamento termico di materiali grezzi o semilavorati, marginali nel settore del vetro. Non risultano applicazioni significative, a livello internazionale, nel campo del carbone, della produzione di energia elettrica, e men che meno sulla taglia del dimostrativo e dell'impianto industriale proposto.

Anche il settore della ossi-combustione risulta fortemente innovativo non esistendo, nel panorama internazionale, realizzazioni di sistemi di taglia significativa destinati alla produzione di energia.

Un elemento essenziale per questa tecnologia, anche in chiave di sostenibilità economica, è quello riguardante la messa a punto di un sistema economico di produzione dell'ossigeno che, per un impianto di circa 50 MWt, dovrà avere potenzialità stimata in 20 ton/h a costi contenuti

## 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 CO<sub>2</sub>, da impiegare in impianti per produzione di elettricità, che utilizza polverino di carbone e aria arricchita in ossigeno, applicando la tecnologia avanzata di combustione "flameless", già sperimentata su scala pilota.

Obiettivo finale è quello di realizzare un impianto dimostrativo di scala significativa (50 MWt circa) per la produzione di energia a costi competitivi, ad elevata efficienza energetica, caratterizzato da un ridotto impatto ambientale sia in termini di emissioni nocive, sia in termini di produzione di CO<sub>2</sub> (principale gas climalterante) perché predisposto per il suo sequestro.

Il progetto si sviluppa nell'arco di tre anni secondo lo schema seguente:

- attività di sperimentazione sul combustore ISOTHERM da 5 MW realizzato presso il centro Ansaldo Caldaie di Gioia del Colle;
- sviluppo di diagnostica avanzata per il monitoraggio ed il controllo del reattore;
- sviluppo e validazione dei sistemi di simulazione per la progettazione del combustore di taglia industriale;
- analisi dei cicli basati sull'impiego di tale combustore e loro efficientamento;
- 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.

Le attività del primo anno sono articolate in tre obiettivi intermedi che prevedono:

#### A. Sviluppo dei criteri di progettazione e “scaling” di un bruciatore di slurry di carbone operante in condizioni di “oxy-combustione flameless”

- Sviluppo e applicazione di codici di simulazione termofluidodinamica. Impiego di codici commerciali (FLUENT) e codici proprietari ENEA (es. codice Heart<sup>®</sup>), opportunamente arricchiti con specifiche routines esterne, per la simulazione stazionaria e dinamica del complesso processo di oxy-combustione flameless di uno slurry di carbone, in ambiente ricco di CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>O. Analisi di sensitività su: granulometria del polverino, percentuale di ricircolo e concentrazione di vapore. Messa a punto metodologie numeriche avanzate per la simulazione dei processi radiativi di tipo gas-gas e per la combustione di sistemi bifase (solido-gas);
- Prove sperimentali condotte sull'impianto pilota esistente da 5 MWt di Gioia di Colle (ITEA/SOFINTER - ISOTHERM), 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 su: additivi di scarificazione, pulizia fumi, polveri, metalli pesanti, ecc.);
- Messa a punto dei criteri di progettazione. Sulla base anche delle prove di validazione effettuate, vengono messi a punto i criteri per la progettazione del prototipo reale di taglia significativa (da 5 a 50 MWt).

#### B. Sviluppo e test di sistemi diagnostici avanzati

- Sviluppo ed applicazione di sistemi e metodi per la diagnostica ed il controllo avanzati. Messa a punto ed impiego di metodi non invasivi, basati su dispositivi ottici nel visibile e nell'UV, per una caratterizzazione termica, chimica e fluidodinamica del processo di combustione e per il suo controllo. Tali sistemi forniscono informazioni sulla termo-fluidodinamica del processo e sulla sua stabilità e costituiranno strumenti affidabili e di relativo basso costo per il controllo di processo;
- Impiego tecniche di spettroscopia laser (chemiluminescenza; CARS) per misure di concentrazione chimica e temperatura.

#### C. Analisi preliminare di cicli termodinamici e configurazione di impianto

- Simulazioni di ciclo che pongono le basi per la progettazione del circuito dimostrativo finale, con particolare riferimento alle sezioni di recupero energetico e sottrazione della CO<sub>2</sub>;
- Studi per la progettazione di apparati specifici per la particolare applicazione industriale (pompaggio slurry, produzione di ossigeno, gas cleaning) da integrare nel sistema.

### RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

#### A. Sviluppo dei criteri di progettazione e “scaling” di un bruciatore di slurry di carbone operante in condizioni di “oxy-combustione flameless”

Relativamente allo **“Sviluppo e applicazione di codici di simulazione termofluidodinamica”** l'attività è stata preceduta da uno studio generale circa lo stato dell'arte relativo alle applicazioni industriali della tecnologia Flameless o MILD: bruciatori recuperativi, rigenerativi, generatori di vapore; principalmente nei settori del riscaldamento materiali (siderurgia) e in quello della generazione di potenza. Lo studio, condotto da **Sotacarbo** ha preso in esame lo stato dell'arte della modellistica sia i tipo RANS (Reynolds Average Navier Stokes) che di tipo LES (Large Eddy Simulation), i principi generali, i principali modelli implementati, con particolare riferimento ai processi di interesse nella combustione MILD di uno slurry di carbone.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, nonché dell'attuale know-how di ENEA, sia nel settore della modellistica RANS che in quella LES, in ENEA sono stati condotti:

- un primo studio parametrico della termofluidodinamica e chimica del sistema al fine di caratterizzare gli effetti delle principali variabili in gioco, utilizzando modellistica RANS (codice FLUENT);
- uno studio relativo alla simulazione del processo di oxy-combustione MILD, alle condizioni di pressione di 5 bar, di uno slurry di carbone Sulcis, con tenore di zolfo pari al 6 - 7 % ;
- lo studio dell'interazione bifase (fase solida - fase gassosa) in zona primaria reazione, utilizzando modellistica LES ed il codice proprietario HearT<sup>®</sup> - ENEA.

Circa la prima attività sono state condotte simulazioni, tendenti a valutare il diverso comportamento del reattore ISOTHERM (impianto pilota da 5 MWt operante presso Gioia del Colle) nel caso di impiego di combustibile liquido (utilizzato peraltro nella fase di preriscaldamento) e di slurry di carbone. Tali simulazioni sono state condotte utilizzando il codice FLUENT in modalità RANS, ed il codice CHEMKIN per simulazioni di cinetica chimica.

E' stata poi eseguita un'accurata analisi di sensitività relativa al processo, considerando l'effetto sull'efficienza di combustione dei seguenti parametri fondamentali:

- granulometria del carbone
- portata di ricircolo dei gas combusti
- contenuto percentuale di acqua nello slurry
- temperatura gas ricircolo.

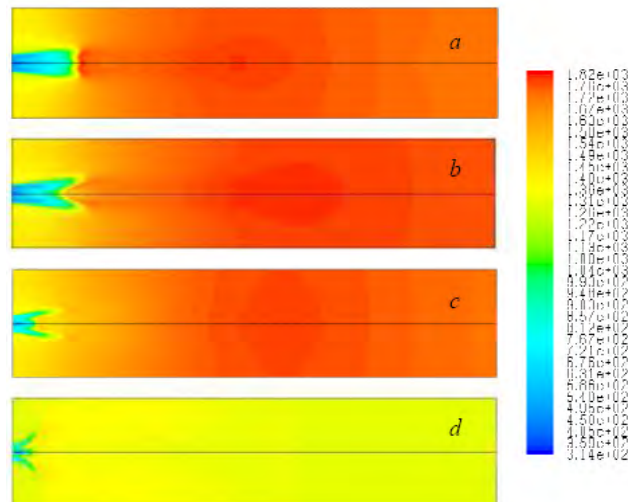


**Figura 1. Esempio di analisi comparativa rispetto al caso “a”, di riferimento; nel caso “b” viene variata la granulometria del carbone (aumentata), nel caso “c” viene variata (aumentata di 270 K) la temperatura dei fumi riciccolati, nel caso “d” viene variata la portata dei fumi riciccolati (raddoppiata)**

Le simulazioni, effettuate, con griglie di tipo bi e tri-dimensionali non strutturate, hanno permesso di ricavare i campi fluidodinamici, termici e chimici al variare delle condizioni di input. Sono state anche individuate le condizioni per la, almeno apparente, realizzazione di combustione MILD, ovviamente caratterizzata da una maggiore portata di fumi riciccolanti.

Le simulazioni hanno permesso di trarre conclusioni in merito alle condizioni ottimali di combustione, in particolare portata e temperatura dei gas riciccolanti, concentrazione di ossigeno nel comburente, contenuto di acqua nello slurry. Tali condizioni sono quelle che, nonostante il rapido rilascio delle specie volatili, consentono una zona di combustione più ampia, con picchi di temperatura più bassi e profilo più omogeneo.

Per quanto riguarda le simulazioni che ipotizzano l'impiego di carbone Sulcis con significativo tenore di zolfo, si è considerata l'evoluzione e l'interazione di due fasi distinte: le particelle di slurry (fase discreta) e la fase gassosa (fase continua).

Nel dettaglio le fasi di simulazione hanno riguardato :

- modellazione della fase discreta (particelle)
- calcolo delle traiettorie
- trasferimento del calore
- evaporazione dell'acqua
- devolatilizzazione
- combustione superficiale
- accoppiamento fase continua (gassosa)– fase dispersa
- modellazione della fase continua



- post processing per calcolo ossidi di zolfo
- post processing per calcolo ossidi di azoto.

Una volta evaporata l'acqua assorbita nelle particelle ha inizio il rilascio dei componenti volatili. La distribuzione granulometrica adottata influenza la crescita di temperatura delle particelle: ciò comporta che il rilascio dei volatili avviene in modo disuniforme. Quando la singola particella ha terminato il rilascio dei volatili, può cominciare la combustione superficiale. Si nota una ristretta zona situata poco dopo l'immissione dello slurry, in cui si registra il massimo tasso di combustione, anche perché le particelle sono ancora addensate. Il grosso della combustione eterogenea avviene comunque nella seconda metà del reattore, e ciò è in accordo con le risultanze sperimentali. Si osserva inoltre come parte del carbone stia ancora bruciando nel momento in cui le particelle si vanno a depositare sul fondo della camera di combustione. Ciò significa che le condizioni di prova adottate, con particolare riguardo alla granulometria utilizzata, sono tali da non garantire la completa conversione del carbonio contenuto, attestandosi intorno al 70%. Per quanto attiene allo studio delle traiettoria delle particelle, nella prima parte del reattore la quantità di moto, e quindi l'inerzia del getto, è tale da non risentire dell'effetto del flusso gassoso; nella seconda parte invece le particelle leggere seguono lo stesso andamento delle linee di flusso, subendo l'effetto del ricircolo interno, mentre quelle più pesanti proseguono indisturbate, andando ad impattare sulla parete frontale o sul fondo. I tempi di residenza sono dell'ordine di quattro secondi per quelle che escono direttamente dal camino, e di dieci secondi per quelle riciclate, divenute oramai ceneri. Nel caso di particelle grandi i tempi di residenza prima dell'impatto non superano il secondo. Per ciò che riguarda le temperature (Figura 2), effettivamente si registra una distribuzione termica abbastanza uniforme, con un leggero picco di 1740 K nella seconda parte della camera di combustione. Anche la distribuzione del radicale OH (Figura 3) risulta estremamente uniforme. Queste considerazioni dimostrano chiaramente l'esistenza di un regime di combustione dislocato quasi ovunque nel reattore con assenza di fronte di fiamma, cioè un regime *mild*.

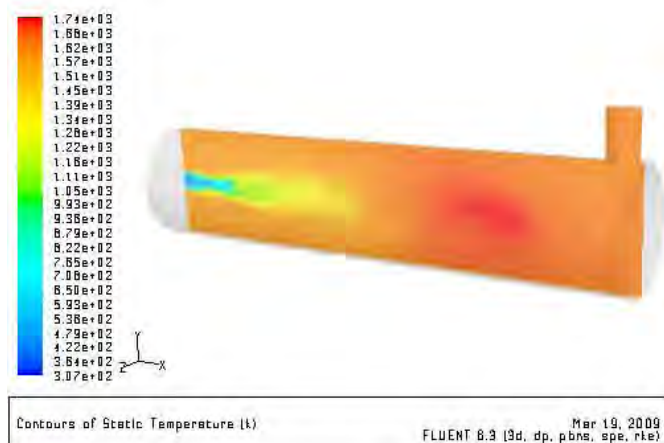


Figura 2. Distribuzione di temperatura

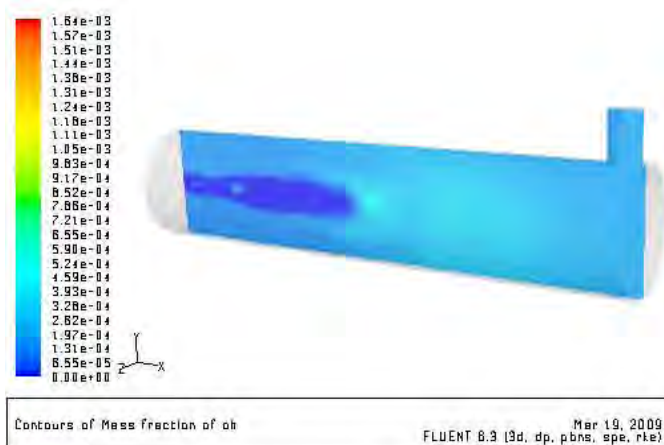


Figura 3. Distribuzione della concentrazione di OH

Infine qualche considerazione relativa agli inquinanti. Per quel che riguarda il monossido di carbonio (CO) le emissioni risultano molto limitate. Il calcolo degli ossidi di zolfo e degli ossidi di azoto viene effettuato in maniera disaccoppiata rispetto al calcolo delle altre grandezze (velocità, temperature, ecc.). Questo perché si tratta di concentrazioni molto modeste, che non influenzano il fenomeno nel suo complesso. La formazione degli ossidi di zolfo è legata al rilascio di  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  nella fase di devolatilizzazione e combustione del carbonio fisso. Infatti le maggiori concentrazioni di  $\text{SO}_x$  (vedi Figura 4) si rilevano proprio nelle zone in cui questi due eventi sono più intensi. I livelli termici modesti e la scarsa presenza di azoto nel comburente sono tali da ridurre al minimo la formazione degli ossidi di azoto proprio di origine termica. Pertanto il contributo più consistente viene dall'ossidazione dell'azoto presente nel carbone.

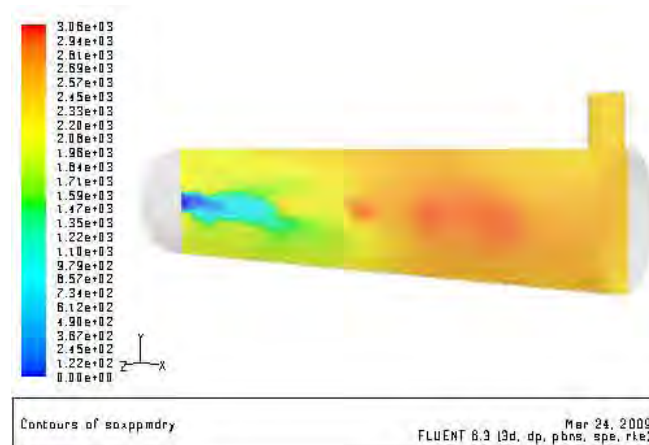


**Figura 4. Concentrazione di  $\text{SO}_x$  (ppm dry)**

L'attività di modellistica bifase, svolta da ENEA, per indagare con maggiore dettaglio i processi di interazione solido-gas, ha in particolare riguardato:

- l'individuazione di un modello matematico adatto a descrivere processi di combustione di polverino di carbone;
- l'analisi di tale modello;
- l'individuazione di un'appropriata strategia di risoluzione numerica;
- l'implementazione all'interno del codice HeaRT<sup>®</sup> sviluppato da ENEA.

Per quanto riguarda la modellizzazione si è scelta una formulazione euleriana-euleriana (per entrambe le fasi) per flussi dispersi. Il modello di partenza è quello mesoscopico sviluppato all'IMFT di Tolosa. La scelta di tale tipo di formulazione è dovuta sia alla relativa semplicità d'implementazione nel codice pre-esistente, sia alla possibilità di mettere a frutto l'esperienza che su tale tipo di modelli esiste presso ENEA. I flussi dispersi così modellizzati sono infatti facilmente paragonabili a flussi fortemente comprimibili. Altra motivazione per la scelta fatta è la possibilità di applicare con maggiore facilità tecniche di parallelizzazione già implementate nel codice HeaRT<sup>®</sup>.

L'analisi del modello di partenza ha evidenziato l'opportunità di intervenire sullo stesso per meglio tener conto degli effetti dell'inerzia delle particelle disperse nel fluido. Una variante ispirata a modelli per flussi di gas rarefatti è stata proposta.

Per ciò che attiene agli aspetti prettamente numerici, le equazioni del nuovo modello sono state introdotte in HeaRT<sup>®</sup>, in una prima fase, con la medesima strategia di soluzione numerica fino ad oggi utilizzata per la fase continua. Dopo una serie di test, data la peculiarità dei flussi in esame, si è scelto di cambiare discretizzazione spaziale. La scelta è ricaduta su un metodo upwind con controllo delle oscillazioni.

E' inoltre stata introdotta una discretizzazione per classi sulla fase dispersa: questa consiste nel risolvere contemporaneamente più set di equazioni per la fase dispersa, al fine di poter tener conto sia della presenza di più fasi disperse (acqua e carbone nel caso del combustore ISOTHERM), sia delle diverse dimensioni che le particelle di una data fase possono avere in un dato volume di controllo. Questa tecnica permette di simulare flussi polidispersi, ma ha un costo piuttosto elevato. E' stata inoltre prevista la possibilità di descrivere l'evoluzione della particella di carbone in gruppi funzionali, secondo quanto previsto dal modello in sviluppo presso il Politecnico di Milano.

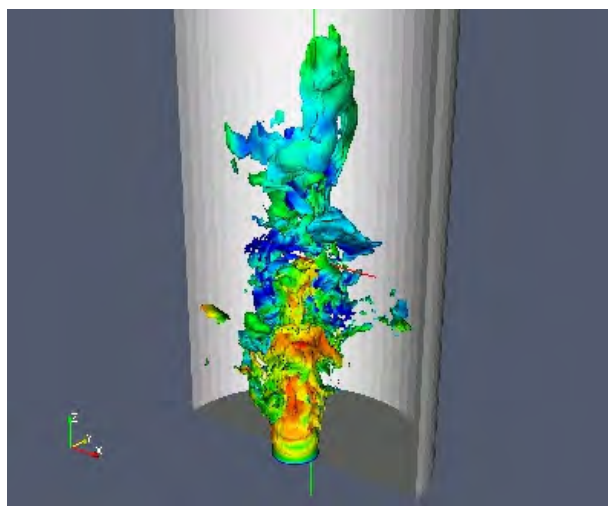


Figura 5. Isolivello di frazione volumetrica di fase dispersa per un campo istantaneo del caso test<sup>1</sup>. I colori si riferiscono al modulo della velocità della fase dispersa

L'attività di validazione del modello di trasporto implementato per la fase dispersa è in corso. Si è scelto di riprodurre i risultati di un test case di letteratura<sup>1</sup>, nel quale particelle di vetro vengono iniettate in un getto swirlato. Il numero di swirl è 0,47 (simile a quello del combustore ISOTHERM) mentre il numero di Reynolds è circa 50000. I risultati preliminari mostrano come il modello adottato sia in grado di riprodurre la dispersione di un getto di particelle dovuta all'interazione con il flusso del fluido circostante. Di fondamentale importanza per cogliere tali aspetti è la riproduzione dei fenomeni turbolenti, ed è in questo che l'adozione di una tecnica LES porta i maggiori vantaggi. Per dare una migliore idea del fenomeno in questione si riporta in Figura 5 un isolivello di frazione volumetrica di fase dispersa ottenuto ad un dato istante per la simulazione di validazione in corso di svolgimento. I diversi colori rappresentano diversi valori assunti localmente dal modulo di velocità della fase dispersa. Come si può apprezzare, la turbolenza della fase continua induce l'insorgere di strutture nella fase dispersa. Queste non potranno che avere un'influenza nell'andamento di processi reattivi, tendendo ad introdurre inhomogeneità nel campo. Gli strumenti in corso di sviluppo in ENEA sono appunto finalizzati a poter cogliere tali elementi nell'evoluzione del sistema.

Lo studio delle condizioni di combustione determinate dal forte ricircolo di gas esausti ha richiesto un importante lavoro di identificazione dei campi di stabilità locali. Tale obiettivo, oggetto di attività dell'**Università di Napoli**, è stato ottenuto per mezzo della individuazione dei regimi ossidativi e la caratterizzazione delle strutture reattive che si possono ottenere nelle zone in cui la miscela di combustibili gassosi, derivanti dalla devolatilizzazione e/o gasificazione delle particelle di carbone, è investita dalla corrente ossidante, fortemente diluita e preriscaldata. La combustione del polverino di carbone, come è ben noto dalla letteratura, avviene per mezzo di numerosi processi fisici e chimici che si verificano in serie-parallelo. Tra questi, vi sono i processi di devolatilizzazione e gasificazione della particella di carbone che determinano la formazione di una frazione volatile di sostanze (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ecc.) che danno luogo ad una successiva ossidazione. Le strutture ossidative che si formano dipendono dalle condizioni di lavoro del sistema in esame. In presenza di elevati livelli di ricircolo, tali strutture sono caratterizzate da una distribuzione di temperatura e di specie differente da quelle che si verificano in condizioni di combustione standard. L'obiettivo principale di questa prima parte di attività è stato quello di identificare le modalità e le condizioni che saranno utilizzate come riferimento nello studio delle strutture locali di fiamma in condizione di elevata diluizione, che verranno svolte nella seconda fase dell'attività di ricerca.

Sebbene il metano non costituisca la frazione principale delle specie prodotte dalla devolatilizzazione e dalla gasificazione delle particelle di carbone, in prima analisi si è scelto di focalizzare l'attenzione sulla ossidazione di tale specie in condizioni di forte diluizione e temperatura. Tale scelta è stata fatta sulla base delle informazioni presenti in letteratura. E', infatti, disponibile per questo combustibile un numero significativo di modelli cinetici, validati in condizioni standard per mezzo di un copioso database di dati sperimentali.

<sup>1</sup> Sommerfel and Qiu, Int. J. Heat and Fluid Flow, vol. 12, No. 1, March 1991

Ciò premesso è stato individuato il meccanismo cinetico da utilizzare, tra quelli disponibili in letteratura, in grado di simulare la cinetica di sistemi di combustione eserciti in condizione di elevata diluizione. La scelta è stata effettuata sulla base di una prima selezione a cinque schemi cinetici, selezionati in base alla loro provata affidabilità nel simulare il comportamento di sistemi eserciti in condizioni di lavoro convenzionali. Per la loro validazione sono state effettuate numerose simulazioni in condizioni standard e in condizioni di forte diluizione e comparati i risultati ottenuti.

Un primo confronto è stato realizzato simulando il ritardo all'ignizione di miscele fortemente diluite di metano ed ossigeno, in un sistema chiuso al variare della temperatura e pressione. In queste condizioni è stato verificato che i risultati ottenuti con i differenti modelli cinetici sono equivalenti in un ampio campo di temperature. Uno scostamento poco significativo è rilevabile solo nel campo delle basse temperature. E' stato, quindi, effettuato il confronto tra i modelli cinetici utilizzando la configurazione di fiamma a controdiffusione che sarà utilizzata nello studio delle strutture di fiamma di interesse. Le simulazioni sono state realizzate al variare della pressione, della temperatura e della diluizione del metano in azoto.

I risultati sono stati comparati sulla base dei profili di temperatura e del rilascio del calore in funzione della frazione di miscelamento lungo la coordinata assiale del sistema. Sebbene le simulazioni abbiano messo in evidenza la presenza di strutture ossidative sostanzialmente differenti in funzione del grado di diluizione del getto di combustibile, le principali caratteristiche delle strutture di ossidazione, i profili delle temperature di lavoro e del rilascio di calore associato alle reazioni di ossidazione sono coerenti al variare del modello cinetico utilizzato. In alcune condizioni sono state rilevate differenze trascurabili ed imputabili al differente numero di specie presente nei singoli modelli. Sulla base dei risultati ottenuti, della diffusione in letteratura, del numero di specie e reazioni coinvolte è stato identificato un modello, tra i cinque valutati, che sarà utilizzato per lo studio dettagliato delle strutture reattive locali, previsto nella seconda fase di questa attività di ricerca.

In una seconda fase l'attività (descritta in dettaglio nei documenti disponibili sul sito ENEA) ha riguardato l'analisi delle strutture reattive locali. L'analisi delle strutture ossidative di interesse utilizzando il modello cinetico dettagliato è stata effettuata al variare della temperatura del getto ossidante, della composizione del getto ossidante, della velocità iniziale del flusso, della pressione e della tipologia del gas diluente. La diluizione della corrente ossidante è stata ottenuta considerando una variazione della frazione molare dell'ossidante da 0,21 a 0,01.

Sulla base di queste considerazioni, sono state identificate su un piano  $T_{in}-\Delta T$  (ove  $T_{in}$  rappresenta la temperatura di ingresso dell'ossidante,  $\Delta T$  rappresenta il massimo incremento di temperatura ottenibile funzione di  $X_{O_2}$ ) le zone in cui si verificano i differenti regimi. Nella Figura 6 è stata riportato il piano  $T_{in}-\Delta T$  ottenuto alla pressione di 10 atm ed una velocità di flusso iniziale pari a 100 cm/s.

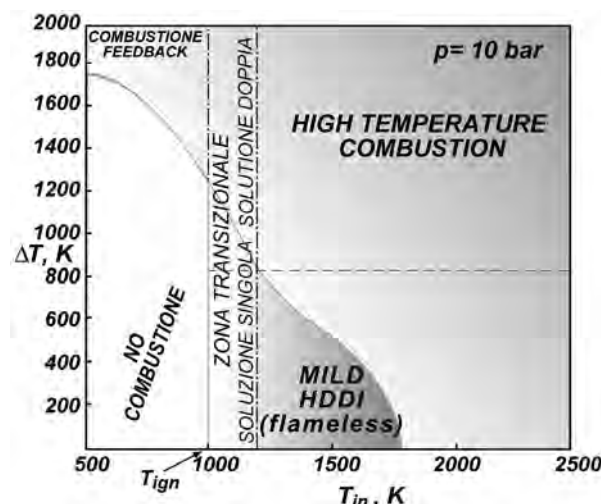


Figura 6. Piano  $T_{in}-\Delta T$  ottenuto alla pressione di 10 atm ed una velocità di flusso iniziale pari a 100 cm/s

Nella mappa riportata in Figura sono state identificate quattro zone principali. In corrispondenza della zona in basso a sinistra (no combustione) il sistema non dà luogo a reazioni di ossidazione. All'aumentare del  $\Delta T$  il sistema evolve in condizioni di combustione tradizionale, in cui si stabilizzano le strutture diffusive ben note in letteratura. All'aumentare della temperatura iniziale è stata identificata una zona di transizione in cui è possibile ottenere soluzioni multiple di differente tipologia. Per temperature iniziali maggiori della temperatura di ignizione ( $T_{ign}$ ) si ottengono le strutture ossidative ben evidenziate. In particolare, in corrispondenza di elevati  $\Delta T$  si stabilizzano

strutture ossidative tipiche del regime identificato come “High temperature Combustion”. Al diminuire del  $\Delta T$  si incontra la regione del piano associata alla combustione flameless in cui non è più presente una strutturazione complessa della zona di reazione.

Le indagini numeriche condotte alla pressione di 10 bar sono state effettuate a pressione inferiore per mettere in evidenza l'influenza di tale parametro sulle cinetiche di ossidazione. Le stesse fenomenologie evidenziate alla pressione di 10 bar sono state rilevate anche a pressione atmosferica sebbene i campi dei parametri in cui sono presenti i differenti regimi cambiano, come è evidente dalla Figura 7. In particolare la diminuzione di pressione sposta gli intervalli di temperatura di esistenza dei differenti regimi verso valori più bassi. L'effetto maggiore è rilevabile sul regime flameless per il quale è significativa l'estensione della zona in cui i profili di rilascio di calore hanno l'andamento tipico, verso valori di  $T_{in}$  maggiori.

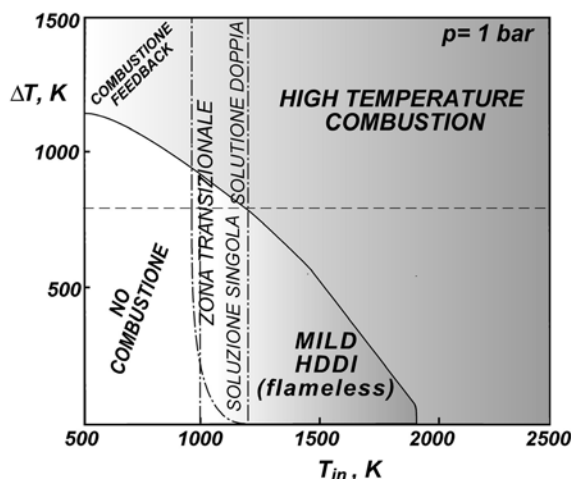


Figura 7. Piano  $T_{in}$ - $\Delta T$  ottenuto alla pressione di 1atm ed una velocità di flusso iniziale pari a 100cm/s

E' stato visto, inoltre, che la stabilizzazione delle strutture ossidative dipende, oltre che dalla temperatura e dalla concentrazione, anche dalla velocità di flusso iniziale che da una indicazione del tempo di residenza delle specie nella zona in cui può avvenire la reazione. Valori della velocità flusso iniziale troppo elevati corrispondono a tempi di permanenza ridotti, i quali non danno l'opportunità di instaurare una struttura stabile. In condizioni di ossidazione, invece, una variazione della velocità di velocità flusso iniziale determina una significativa variazione della velocità di rilascio di calore. Per una fissata condizione di alimentazione, in termini di temperatura e composizione della miscela, questo può determinare una variazione di regime e, quindi, una variazione della estensione delle varie zone identificate nelle mappe riportate nelle figure.

Altro aspetto fondamentale per la simulazione dei fenomeni di interesse riguarda il parallelo sviluppo di una modellistica più avanzata della cinetica di volatilizzazione e ossidazione del carbone, che tenga conto della particolare natura del carbone Sulcis, ricco di zolfo. A tal fine il **Politecnico di Milano** ha condotto un'importante attività basata sulla constatazione che i modelli di rilascio di composti solforati presenti in letteratura sono pochi, specifici per tipo di carbone e non analizzano il problema nella sua integralità. In particolar modo si possono individuare: modelli *One Step*, modelli ad energia distribuita, modelli a più reazioni. Il difetto di tutti questi modelli risiede nella necessità di dati sperimentali specifici per ciascun carbone e non risultano quindi predittivi. Alla luce di queste limitazioni è stato sviluppato un modello semplice, ma generale, quindi non specifico per tipo di carbone, in grado di essere predittivo sulla base della sola analisi elementare del carbone stesso. Per caratterizzare la composizione in termini di composti solforati, si fa riferimento semplicemente al rango del carbone, ovvero al contenuto relativo di carbonio e ossigeno. La struttura sulfurica della matrice carboniosa risulta infatti legata alla maturazione del carbone. Sfruttando la composizione dettagliata in termini di zolfo organico (alifatico o aromatico), piritico e proveniente da solfati di alcuni carboni ampiamente analizzati in letteratura (Argonne Coals), sono state sviluppate delle correlazioni semplici (generalmente lineari) per identificare la percentuale relativa delle varie componenti solforate. Sulla scorta di questa composizione iniziale è stato proposto un modello cinetico di sei reazioni, che descrive il rilascio di zolfo sotto forma di  $H_2S$ , zolfo nel tar e infine zolfo residuo nel char. Il meccanismo tiene implicitamente conto della diversa natura dei legami chimici, presentando costanti cinetiche diverse a seconda del tipo di legame zolfo-carbonio. La peculiarità di tale modello risiede appunto nella sua potenziale generalità, ovvero non richiede analisi sperimentali di volatilizzazione del carbone. Il modello è stato poi convalidato sfruttando le informazioni presenti in letteratura. Da questa analisi si evince che il modello presenta un comportamento soddisfacente nel caso di condizioni sperimentali a basse velocità di riscaldamento,

mentre nelle condizioni di alte velocità di riscaldamento vi è generalmente una sovrastima del rilascio di  $H_2S$ . Come detto il limite di tale modello risiede soprattutto in una mancanza di affinamento e convalida su un maggior numero di informazioni sperimentali. In tale ambito è possibile prevedere il naturale sviluppo di questa attività di ricerca. Il modello sarà accoppiato a un modello di degrado del carbone per consentire la simulazione del degrado termico complessivo. Tale modello si confronterà con risultati sperimentali specifici del carbone del Sulcis. In tal modo verrà operata una ulteriore convalida, accompagnata da una fase di messa a punto sul carbone di specifico interesse. Tali dati sperimentali dovranno essere ricavati con analisi della perdita in peso e della formazione dei principali composti solforati. Successivamente, uno schema cinetico in fase omogenea consentirà di caratterizzare l'ossidazione di  $H_2S$  in  $SO_2$  per analizzare l'insorgenza di potenziali fenomeni corrosivi.

In base a quanto sopra illustrato, al fine di determinare i dati sperimentali indispensabili all'attività di modellazione condotta da ENEA e dal Politecnico di Milano, **Sotacarbo** ha intrapreso e completato nel secondo semestre di attività, la realizzazione di un laboratorio per la caratterizzazione chimico-fisica dei carboni, in termini di morfologia, porosità, assorbimento di acqua. Per il laboratorio sono stati acquisiti:

- dispositivi per la preparazione in laboratorio dei campioni di carbone nelle dimensioni e pezzatura più opportuna (mulini, frantoi, setacciatrici ripartitore);
- apparecchiature per l'analisi elementare dei carboni (termogravimetro per analisi di umidità, contenuto ceneri e volatili; determinatore CHNSF per analisi elementare del carbone; calorimetro per determinare il potere calorifico; microporosimetro);
- attrezzature per analisi di base (bilancia analitica e termica, bagnomaria elettrico, PH-metro, distillatore, reagenti e vetreria da laboratorio, stufa per essiccazione);
- impianto centralizzazione gas alta purezza;
- hardware e software per acquisizione dati.

Questo insieme di azioni risultano fondamentali e propedeutiche alla produzione di dati di input per la sperimentazione c/o ISOTHERM, per l'attività di modellazione di ENEA, e per la validazione dell'attività di modellazione cinetica condotta dal Politecnico di Milano.

E' stata definita la procedura di caratterizzazione standard, e sono stati caratterizzati due campioni di carbone Sulcis ed un campione di carbone sudafricano. Sono state condotte misure di *determinatore CHN*, *determinatore S*, *analisi termogravimetrica*, *calorimetria* e *porosimetria*.

In merito alla problematica della pulizia del flue gas, sono stati considerati sistemi per la rimozione del particolato (cicloni e multicicloni, precipitatori elettrostatici, filtri ceramici a candela, filtri ceramici "cross-flow", filtri a letto granulare) e sistemi di desolforazione FDG (processi a umido, semi-secco e rigenerabili. Particolare menzione merita il processo SNOX (sviluppato dalla Haldor Topsoe). Tale sistema rimuove i composti dello zolfo sotto forma di acido solforico, e la sua applicazione è favorita dalla temperatura dei gas (circa 400 °C) e dalla pressione di esercizio, condizioni ampiamente verificate sul loop dimostrativo.

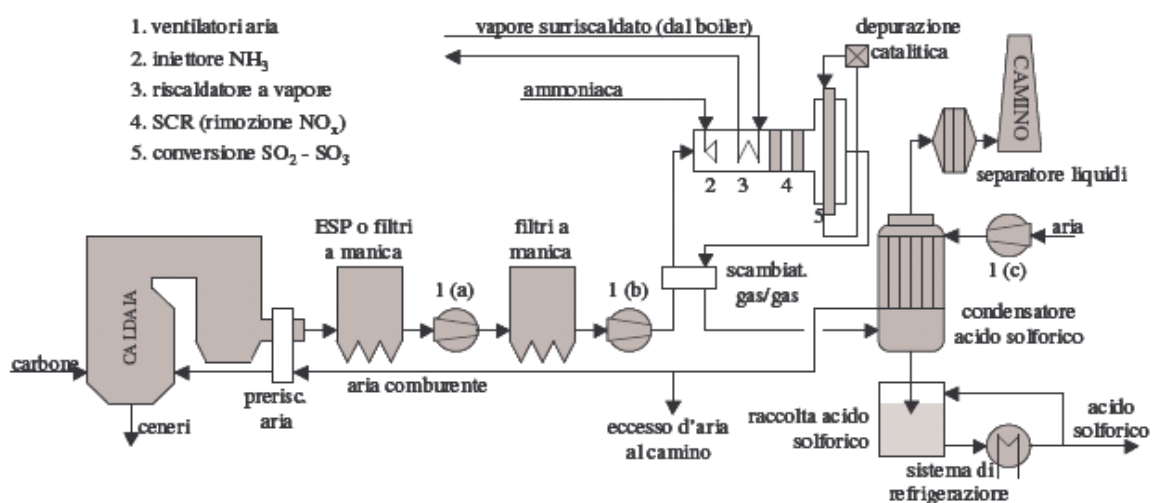


Figura 8. Schema semplificato di funzionamento di un processo SNOXTM



Nell'ambito della seconda linea dell'obiettivo, quella relativa a “Prove sperimentali”, sono state condotte campagne di prova sull'impianto pilota da 5 MWt ISOTHERM presso ITEA/ANSALDO Caldaie di Gioia del Colle, volte alla caratterizzazione delle emissioni ed alla caratterizzazione del particolato solido (collaborazione ENEA / Università di Napoli). Tali prove risultano preliminari perché condotte con carboni convenzionali, non provenienti dal Sulcis. Per quanto attiene le emissioni dei principali inquinanti i risultati ottenibili con la tecnologia ISOTHERM risultano estremamente lusinghieri e condensati in Tabella 1.

**Tabella 1. Emissioni ottenuti con tecnologia ISOTHERM**

| Emissioni gassose             |                   | Ridotto Volume Fumi:<br>1/8-1/10 che in aria |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|
| <i>GAS NOCIVI</i>             | <i>EU 2000/76</i> | <i>Isotherm PWR®</i>                         |
| CO [g/GJ]                     | ≈ 25              | <1                                           |
| NO <sub>x</sub> [g/GJ]        | ≈ 100             | 20 – 80                                      |
| SO <sub>2</sub> [g/GJ]        | ≈ 25              | <3                                           |
| TOC [mg/GJ]                   | ≈ 5700            | <50                                          |
| IPA [ng/GJ]                   | ≈ 57000           | <100                                         |
| Diossine, Furani [pg/GJ]      | ≈ 5700            | Prox. Limite analitico                       |
| CO <sub>2</sub> %v (nei fumi) | 8                 | 75                                           |

Per quanto riguarda il particolato solido emesso, è stata effettuata la caratterizzazione, in termini di composizione chimica e dimensionale, del particolato prodotto in diverse condizioni operative nel reattore ISOTHERM di Gioia del Colle, utilizzando carboni di differenti caratteristiche chimico-fisiche.

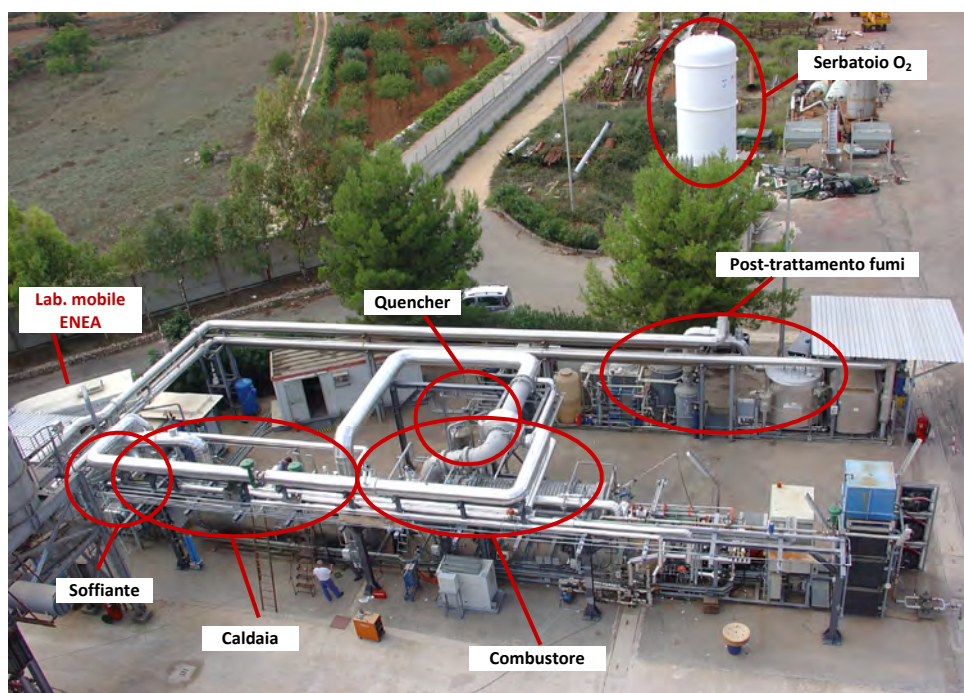


**Figura 9. Unità ISOTHERM da 5 MWt**



**Figura 10. Reattore ISOTHERM**

L'Università di Napoli, in collaborazione con ENEA, ha condotto una serie di attività volte alla messa in opera di un sistema integrato per la misura dimensionale del particolato anche sub-micronico (da 7 nm a 10  $\mu\text{m}$ ) e sulla successiva speciazione chimica.

L'attività inizialmente ha riguardato la messa a punto della linea di campionamento e delle tecniche di caratterizzazione in una campagna di misure sull'impianto di Gioia del Colle per la verifica del funzionamento del sistema di campionamento ed analisi.

La linea di campionamento è costituita da una sonda di prelievo inserita a valle del reattore di alta temperatura e di un sistema di campionamento per la raccolta delle diverse frazioni dimensionali del particolato. Il particolato con dimensioni da 0,3 a 10  $\mu\text{m}$  è stato separato con un impattore inerziale basato su sonda Andersen; quello con dimensioni inferiori a 0,3 micron è stato invece raccolto su filtri e su supporti per la microscopia SEM. Il particolato iperfine, quello con dimensioni inferiori a 0,1 micron è stato raccolto sia su supporti per microscopia a forza atomica che condensato in acqua per le successive analisi chimico-fisiche, vista l'elevata affinità in acqua del particolato ultrafine. Il particolato raccolto su filtro per microscopia SEM è stato sottoposto ad analisi EDX mentre quello sospeso in acqua è stato caratterizzato attraverso misure di assorbimento nell'UV, di analisi della mobilità differenziale delle particelle e di scattering quasi-elastico.

La linea di caratterizzazione è stata integrata per permettere l'utilizzo dell'impattore ELPI dell'ENEA in grado di misurare, con accuratezza e in real-time, l'intervallo dimensionale da 7 nm a 10  $\mu\text{m}$ . Il sistema integrato di misurazione così sviluppato permette di ottenere funzioni di distribuzione delle dimensioni del particolato da 1 nm a 10  $\mu\text{m}$  e quindi di quantificare e qualificare tutte le ceneri volanti, fini ed iperfini, eventualmente presenti nella corrente gassosa. Il sistema integrato di misura è stato utilizzato nel secondo periodo di attività per caratterizzare le ceneri volanti allo scarico del reattore di Gioia del Colle per differenti condizioni operative e caratteristiche chimico-fisiche del carbone.

Sono state successivamente condotte prove preliminari su olio e carboni i cui risultati sono riassunti in diversi documenti disponibili sul sito ENEA. L'analisi sperimentale si è focalizzata sulla determinazione dell'intera funzione di distribuzione del particolato e delle sue caratteristiche chimico-fisiche.

In Figura 11 è riportata la funzione di distribuzione delle dimensioni del particolato misurata a valle del reattore di alta temperatura con alimentazione a carbone nell'intervallo 0,4-10  $\mu\text{m}$ .



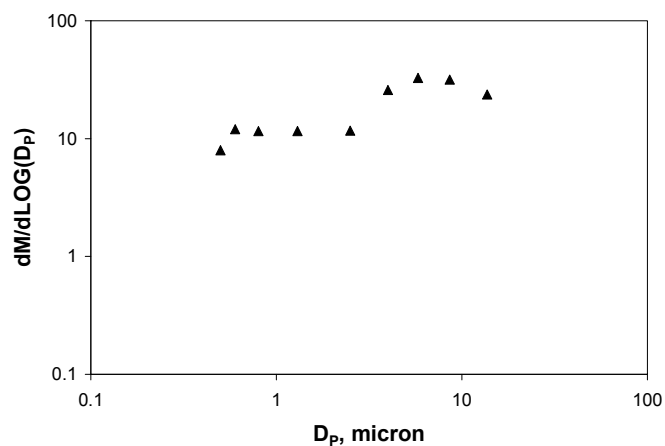


Figura 11. Funzione di distribuzione in massa determinata con la sonda di Andersen

La funzione di distribuzione delle dimensioni nell'intervallo dimensionale fino a  $0,4 \mu\text{m}$  è stata determinata con microscopia a forza atomica sul materiale depositato su supporti di mica ed è riportata in Figura 12.

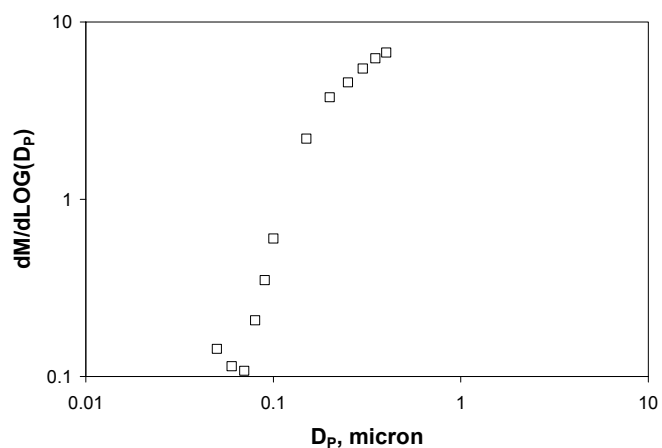


Figura 12. Funzione di distribuzione in massa determinata con AFM su supporto di mica inserito nella linea di campionamento

Il materiale di dimensioni inferiori a  $0,4 \mu\text{m}$  è raccolto mediante condensazione dell'acqua di combustione o gorgogliamento in acqua dei fumi di combustione. Nella Figura 13 è riportata la funzione di distribuzione determinata per E-DMA.

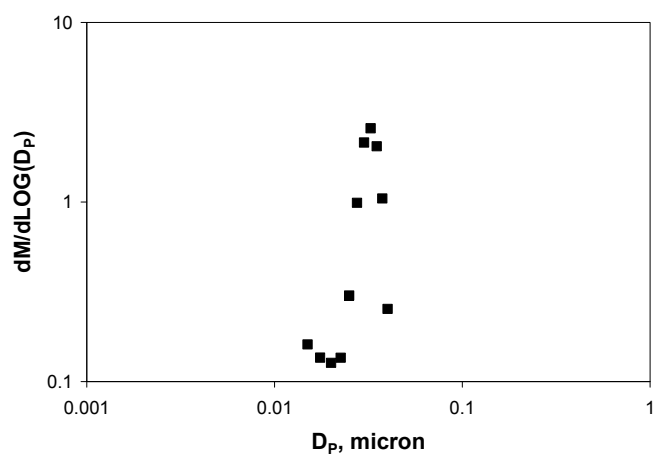


Figura 13. Funzione di distribuzione in massa determinata con E-DMA

Le tre funzioni di distribuzione determinate con differenti metodi di misura hanno permesso di ricostruire la funzione di distribuzione del particolato da 1 nm a 10  $\mu\text{m}$  e quindi di quantificare e qualificare tutte le ceneri volanti, fini ed iperfini, presenti nella corrente gassosa.

L'analisi ai raggi X del materiale raccolto (Figura 14) mostra una forte dipendenza dalla composizione chimica del combustibile alimentato oltre alla presenza di elementi tipici del materiale costruttivo dell'impianto. E' da notare la bassa concentrazione di carbonio nel particolato con dimensioni superiori a 0,4  $\mu\text{m}$ .

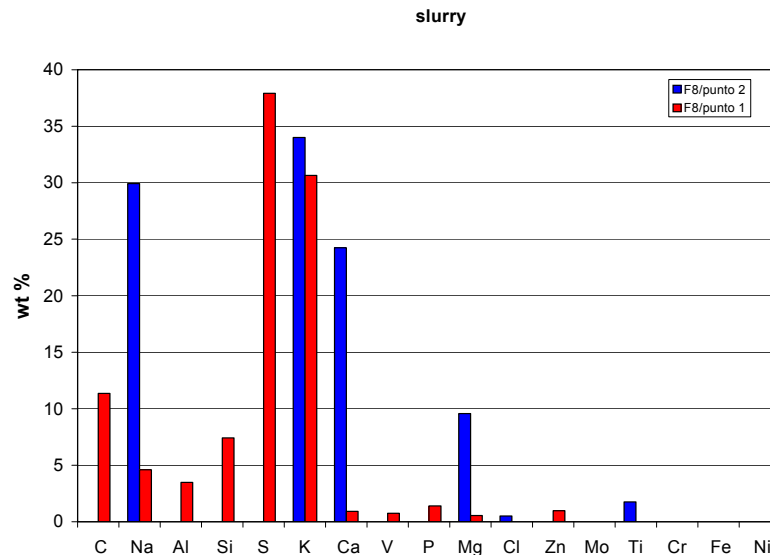


Figura 14. Analisi elementare del particolato prelevato a valle del reattore ad alta temperatura (rosso) e della zona di recupero di calore (blue) con alimentazione di slurry di polverino di carbone

Con riferimento alla terza linea dell'obiettivo, "Messa a punto dei criteri di progettazione", restano da definire i criteri di scaling. Sono a tal riguardo in corso simulazioni condotte con codice FLUENT per determinare l'effetto di scala (da 5 a 48 MWt) e l'effetto dell'orientamento del reattore (da orizzontale a verticale) che potrebbe semplificare la raccolta delle ceneri fuse entro il reattore.

## B. Sviluppo e test di sistemi diagnostici avanzati

Nell'ambito dell'obiettivo particolare rilievo riveste l'attività relativa allo sviluppo, qualificazione e ingegnerizzazione di dispositivi di misura non invasivi, basati sulla tecnologia ODC (Optical Diagnostic of Combustion), messo a punto e brevettato da ENEA.

Tale tecnologia, sviluppata in veri e propri sistemi di misura integrati, consente la misura di:

- stabilità di combustione
- velocità (misure medie e dinamiche)
- fluttuazioni di temperatura.

Il sistema è basato sull'analisi in frequenza del segnale luminoso proveniente dal sistema reagente, acquisito con un fotodiodo a banda più o meno larga (funzione dell'applicazione), operante a frequenze di acquisizione dell'ordine dei MHz. La configurazione a "testa di misura singola" permette misure di stabilità dinamica e di temperatura. La configurazione a "testa doppia" permette misure accurate di velocità.

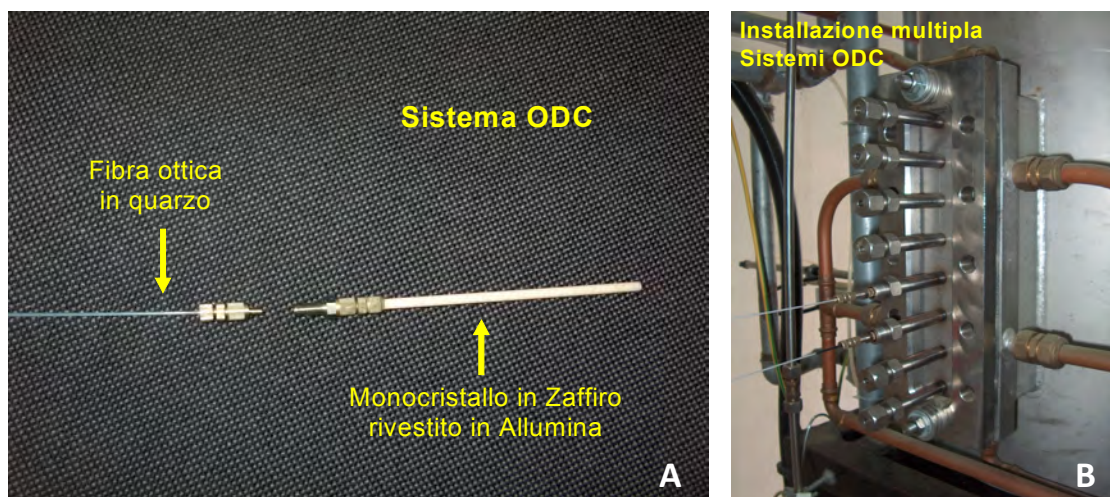


**Figura 15. Sistema ODC: (A) connettore alla fibra in quarzo e guida di luce per alte temperature in zaffiro inguainata in allumina, (B) configurazione multipla del sistema**

Il sistema di partenza, sviluppato per applicazioni di ricerca in laboratorio, è stato ingegnerizzato per rendere possibile l'applicazione in situazioni industriali, quali quella del reattore ISOTHERM, ove l'accesso alla zona reagente deve necessariamente essere miniaturizzato e reso passivo alle alte temperature, attraverso il ricorso ad un guida di luce realizzata in monocristallo in zaffiro (Figura 15). E' stato inoltre realizzata un'interfaccia virtuale per semplificare l'iterazione con il sistema di regolazione e controllo, basato su tecnologia LabView, al fine di renderlo gestibile anche da personale non esperto, o favorire il telerilevamento in remoto dei dati.

Al fine di rendere il sistema insensibile ai disturbi introdotti dall'ambiente esterno, tipicamente la componente infrarossa continua proveniente dal refrattario di rivestimento del reattore, è stata enfatizzata la risposta dinamica del sensore. Ciò è stato ottenuto utilizzando una diversa architettura del trasduttore ottico e ottimizzando il sistema di analisi.

Infine è stata sviluppata una procedura di certificazione dei sensori ottici in grado di assicurare l'affidabilità e riproducibilità delle misure.

La prima campagna di misure, realizzata utilizzando sensori ODC ha avuto come obiettivo l'individuazione, dall'analisi dei segnali, di "indicatori sintetici" (esempio asimmetria del flusso reagente o suo livellamento omogeneo) rappresentativi di aspetti qualitativi del processo, utili alla sua ottimizzazione e controllo. Gli accessi (Figura 16) attualmente utilizzati sono due: dalla culatta del reattore (lato prossimo all'iniezione del fuel) e laterale (in prossimità del centro o del fondo del reattore).

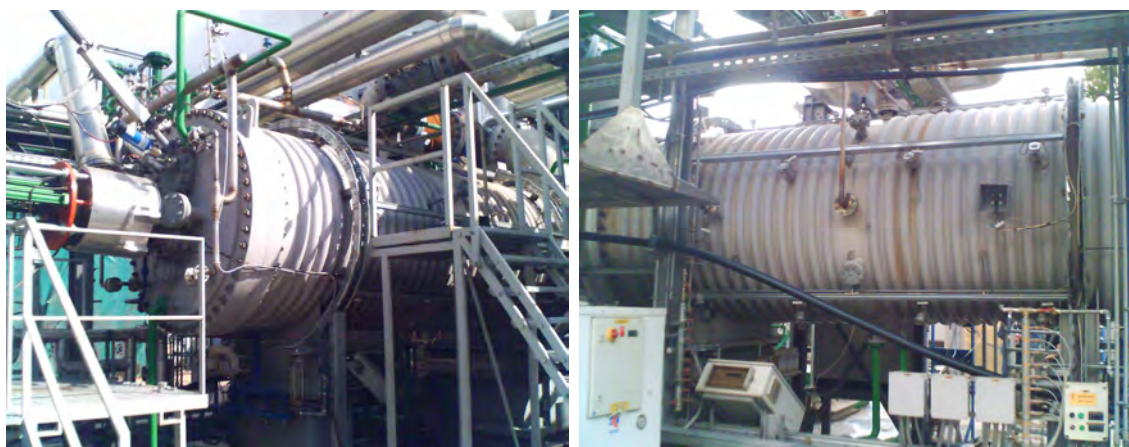


**Figura 16. Accessi alla zona reagente**

Da riscontri sperimentali ottenuti si evince la sostanziale stazionarietà del processo (andamento tipico della combustione MILD). Le variazioni di contenuto di ossigeno, portata combustibile e quantità di prodotti di combustione riciccolanti, mostrano andamenti coerenti degli indicatori suddetti, e ciò anche in transitori operazionali.

Per contro lo strumento ODC mostra una forte sensibilità alla variazioni di processo, consentendo la mappatura della zona reattiva, e risultando per tale via il solo strumento idoneo ed affidabile, allo stato delle conoscenze, per una caratterizzazione dinamica del processo.

La Figura 17 mostra come, in prossimità della lancia di immissione slurry, il processo di ossidazione risulti prevalentemente di tipo diffusivo, con concentrazioni dei reagenti che alterano le condizioni di combustione flameless. Gli impulsi luminosi, relativi ad eventi singoli di ossidazione, sono caratterizzati da un tempo di salita (brusco gradiente) e da un tempo di decadimento, come mostrato in figura.

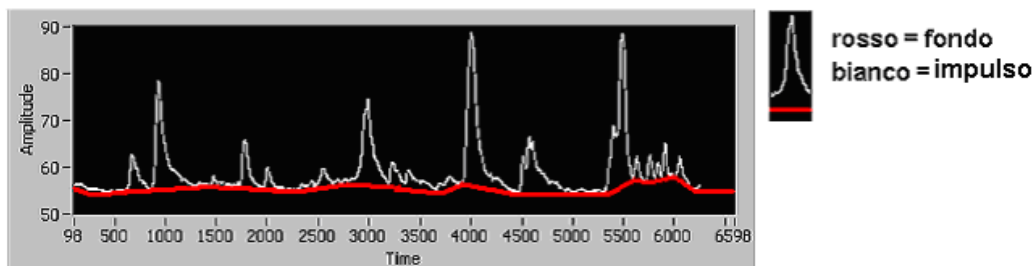


Figura 17. Segnale tipico della sonda ODC relativo a particelle di carbone in oxy-combustione, in prossimità della lancia di immissione slurry

Il segnale ODC, ed in particolare i rispettivi tempi di salita e decadimento, mostrano comportamenti coerenti con le variazioni di importanti parametri di sistema (quali: portata di ossigeno (un suo aumento corrisponde ad un incremento di reattività), portata di ricircolo gas combusti (un suo aumento determina una riduzione di reattività), come dimostrano le Figure 18-20.



Figura 18. Variazione dei tempi di salita e discesa in funzione di aumento o diminuzione di portata di ossigeno

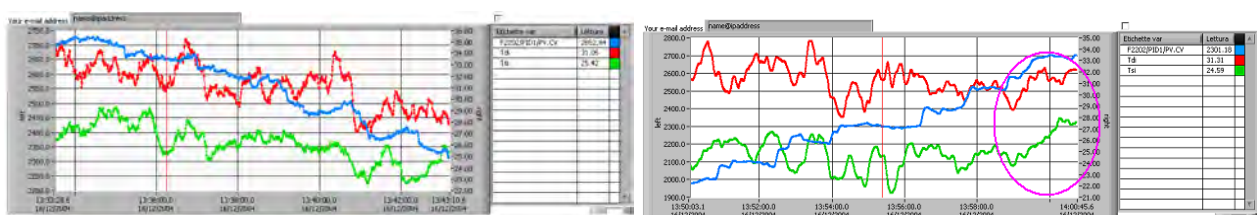


Figura 19. Variazione dei tempi di salita e discesa in funzione di diminuzione o aumento portata gas combusti



Figura 20. Variazione del numero di impulsi validati e del valor medio dell'impulso fiamma al variare della portata ossigeno



Il livello di fondo luminoso dedotto da ODC (segnale celeste nella Figura seguente) è un ottimo indicatore di temperatura (segnale verde di Figura 21). Si noti la coerenza dei due segnali in funzione dell'aumento di ricircolo.

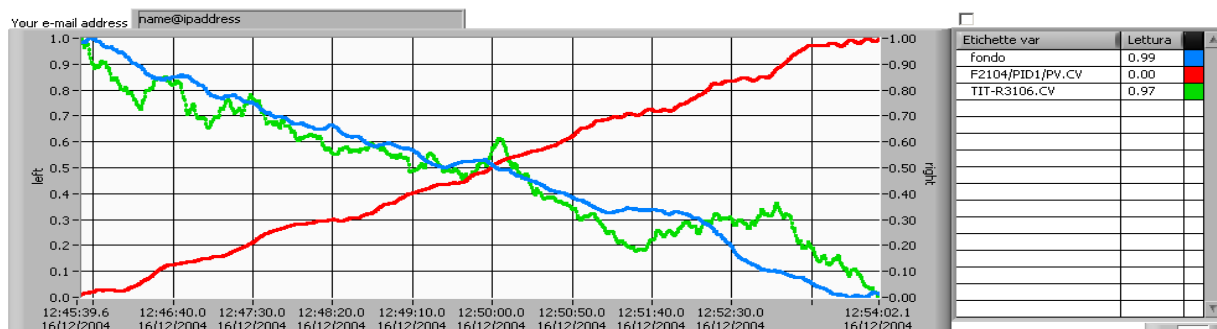


Figura 21. Coerenza tra Fondo luminoso e Temperatura (da pirometro laser), all'aumentare del ricircolo

In conclusione lo strumento ODC mostra una forte sensibilità alle variazioni di processo, consentendo la mappatura della zona reattiva, e risultando per tale via il solo strumento idoneo ed affidabile, allo stato delle conoscenze, per una caratterizzazione dinamica del processo.

### C. Analisi preliminare di cicli termodinamici e configurazione di impianto

L'obiettivo prevede attività di simulazioni di ciclo che siano di ausilio alla progettazione del circuito dimostrativo finale, che prevede il collegamento ad una caldaia di tipo USC ad elevato rendimento, con successiva sottrazione della  $\text{CO}_2$ . In questa fase sono state tuttavia valutate altre possibili alternative che prevedono l'inserimento nel ciclo, dopo la turbina a vapore, di una turbina a gas rigenerativa di varia potenza o l'esclusivo ricorso ad essa (fatta salva la possibilità di interconnettere direttamente quest'ultima al combustore oxyfuelled alimentato a carbone). A questo riguardo sono state effettuate simulazioni con codici Ipse PRO e CHEMCAD.

Un'applicazione di particolare interesse riguarda l'utilizzo di ISOTHERM come sistema di "internal heating" in un ciclo di "topping" operante sul vapore a bassa pressione in un ciclo USC.

Si pensa di operare con vapore di un ciclo USC quale fluido di lavoro che può essere surriscaldato, similmente a quanto avviene in un ciclo turbogas aperto, a temperature elevate ( $1300^\circ\text{C}$  o più) con evidenti vantaggi in termini di rendimento. Il sistema prevede l'integrazione di un ciclo Rankine classico, con un surriscaldatore aggiuntivo del vapore di bassa pressione tramite un processo di "internal heating" realizzato appunto nel reattore ISOTHERM. L'apporto entalpico avviene attraverso la combustione con ossigeno all'interno del flusso di vapore, alla stregua di quanto avviene in un turbogas il cui fluido di lavoro è invece aria. Il vapore surriscaldato fino a temperature di  $1500\text{ K}$  (non realizzabili per scambio termico indiretto in caldaia, deve espandere in una macchina simile ad un turbogas che opererà con vapore e non con aria (gas combustibili)). A valle della turbina di espansione il vapore passa a scambiatori rigenerativo/evaporativo e di economizzazione prima di avviarsi al condensatore. In particolare si evidenzia quanto segue:

- l'aumento di rendimento è notevole (il ciclo di *topping* aggiunto al ciclo base, considerando la concreta possibilità di recupero del calore di scarico, ha rendimenti teorici superiori all'80%);
- l'estrazione della  $\text{CO}_2$  prodotta dopo condensazione, seppur richieda energia non trascurabile e dipendente dal contenuto di carbonio del combustibile, riduce solo di alcuni punti percentuali il rendimento di cui sopra;
- il raffreddamento della macchina può con vantaggio essere attuato a vapore o ad acqua preriscaldata; probabilmente consentendo una TIT (*Turbine Inlet Temperature*) superiore allo standard attuale delle Turbine a gas ( $1800\text{ K}$  invece di  $1500\text{ K}$ );
- il sistema sembrerebbe idoneo anche per retrofit di impianti esistenti potendo contare su un fattore di repowering esente da produzione aggiuntiva di inquinanti.

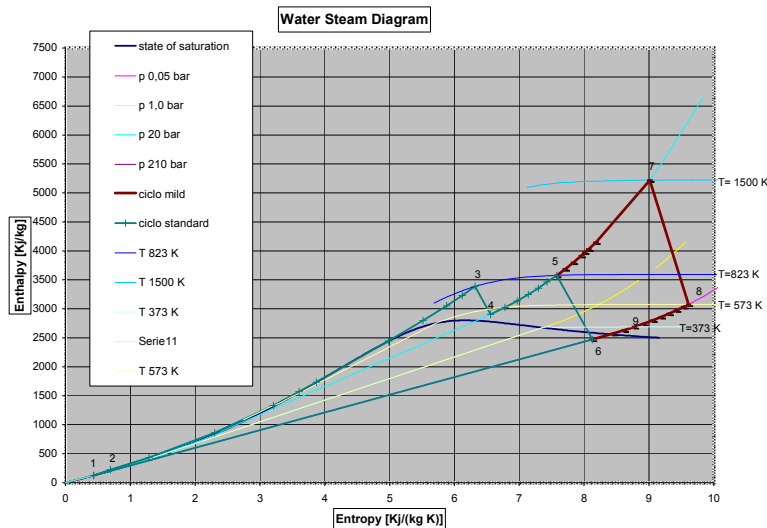


**Figura 22. Utilizzo di un sistema a ossi-combustione come elemento di “internal heating” operante su vapore BP di un ciclo ultrasupercritico**

L’obiettivo prevede inoltre studi per la progettazione di apparati specifici per la particolare applicazione industriale (pompaggio slurry, gas cleaning) da integrare nel sistema. A questo riguardo, partendo dalla considerazione che uno degli elementi critici, evidenziatisi nel corso delle sperimentazioni preliminari, è rappresentato dal pompaggio stabile dello slurry, è stata sviluppata da ENEA una tipologia innovativa pompa, definita *volumetrica a pistoni “Triplex” a flusso continuo*.

Con essa, ci si è posto l’obiettivo di realizzare una pompa volumetrica ad alto rendimento (energetico > 87%; volumetrico > 98%), con misura di portata intrinseca al funzionamento (misura del numero di giri), e con pulsatilità nulla, o comunque contenuta entro il 3% del valore della portata (attuali valori delle migliori realizzazioni > 16%), che elimini la necessità di elementi passivi quali smorzatori, e possa trattare fluidi quali slurry di carbone con granulometria grossolana (fino a 2-3 mm).

E’ stata realizzata una prima pompa prototipo da 700 L/h, con prevalenza 25 bar (vedere figure seguenti), le cui prestazioni sono state ottenute attraverso un particolare profilo di moto dei pistoni, azionati da un meccanismo desmodromico a camme. La pompa è stata testata con successo, con slurry, presso i laboratori ENEA, e se ne prevede il prossimo trasferimento sull’impianto ISOTHERM di ITEA-SOFINTER, per prove di caratterizzazione finali.

Più che di un componente pompa si può parlare di un vero “sistema” di pompaggio con capacità di autodiagnostica, poiché lo stesso, opportunamente strumentato con misuratori di pressione e accelerometri, nonché di “intelligenza” a bordo, è in grado di monitorare il suo funzionamento, segnalando l’eventuale scadimento delle prestazioni e la necessità di interventi manutentivi ordinari e straordinari, peraltro non frequenti, data la tipologia di pompa.

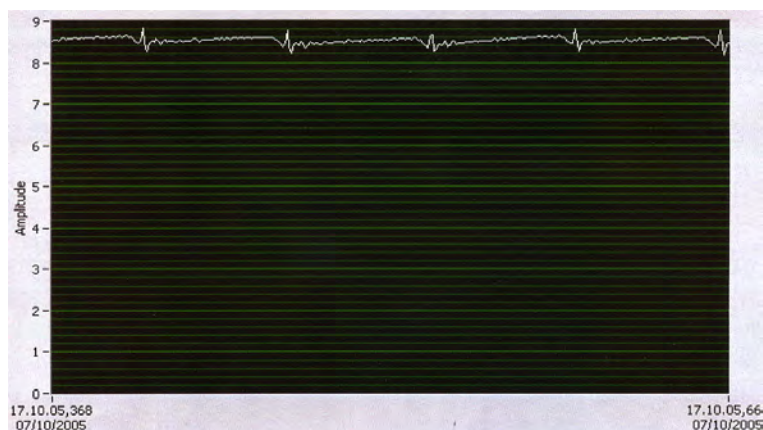
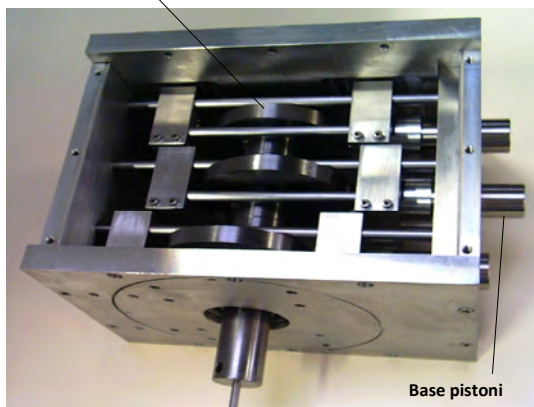


**Figura 23. Forma d’onda di pressione della nuova pompa**

Manovellismi albero-came



Base pistoni

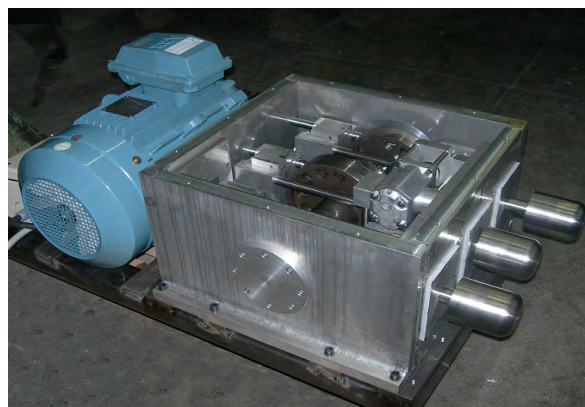


Figura 24. Nuova pompa Triplex

La sperimentazione condotta ha permesso di caratterizzare in modo qualitativo il componente prototipale sotto test, che ha mostrato una funzionalità stabile ed efficace mettendo comunque in evidenza difetti recuperabili nella fase di ingegnerizzazione (usura delle valvole, modifica della forma delle camere di pompaggio, attuazione delle valvole: utilizzo di dispositivi attivi). Il componente, nel suo stato prototipale, può essere utilizzato anche nella fase analitica in quanto, garantendo un esercizio continuativo affidabile, permettere lo studio del comportamento fluidodinamico dello slurry.

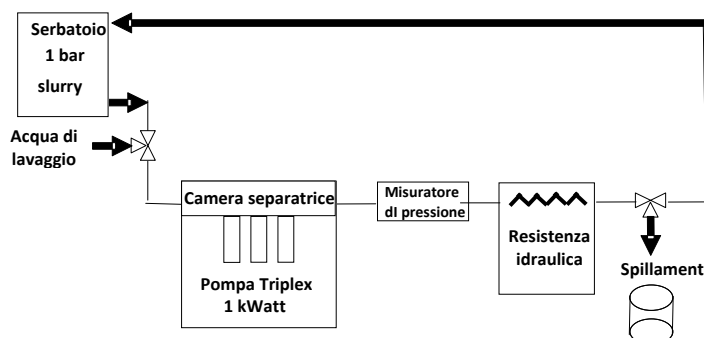


Figura 25. Loop di prova ENEC

## PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

### SOTACARBO

Nell'ambito dell'Obiettivo A le attività di SOTACARBO hanno riguardato:

- la definizione dello stato dell'arte dei modelli e codici applicabili allo specifico settore della oxy-combustione di carbone in ambiente ricco di  $\text{CO}_2$  e vapore;
- la partecipazione allo sviluppo ed applicazione di codici di simulazione termofluidodinamica. Impiego di codici commerciali (FLUENT), opportunamente arricchiti con specifiche routines esterne, per la simulazione stazionaria e dinamica del complesso processo di oxy-combustione flameless di uno slurry di carbone;
- l'allestimento di un laboratorio di analisi per la caratterizzazione chimico-fisica dei carboni, in termini di morfologia, porosità, assorbimento di acqua. In questa ottica fornisce dati di input alla sperimentazione presso il pilota ISOTHERM e per la validazione di codici termofluidodinamici e di cinetica chimica;

- lo studio delle tecnologie di pulizia dei gas derivanti dal processo di oxy-combustione con particolare riferimento alla presenza di composti solforati.

#### **Università di Napoli “Federico II”** *(accordo di collaborazione)*

Nell’ambito dell’Obiettivo A studia ed identifica le condizioni di stabilità locali che caratterizzano la combustione in condizioni di forte ricircolo di gas esausti. Tale obiettivo è ottenuto per mezzo della individuazione dei regimi ossidativi e la caratterizzazione di strutture reattive che si possono ottenere nelle zone in cui la miscela di combustibili gassosi, derivanti dalla devolatilizzazione e/o gassificazione delle particelle di carbone, è investita dalla corrente ossidante, fortemente diluita e preriscaldata. Tale studio è fondamentale per la corretta modellazione del processo condotta da ENEA.

Nell’ambito dell’Obiettivo B, conduce, in collaborazione con ENEA, attività volte alla messa in opera di un sistema integrato per il campionamento e la misura dimensionale del particolato anche sub-micronico (da 7 nm a 10 µm) allo scarico del reattore ISOTHRM. Di routine caratterizza fuori linea, con tecniche di misura avanzate, i campioni in forma solida o liquida per la relativa speciazione chimica.

#### **Politecnico di Milano**

Nell’ambito dell’Obiettivo A sviluppa modellistica avanzata relativa alla cinetica di volatilizzazione e ossidazione del carbone, che tenga conto della particolare natura del carbone Sulcis, ricco di zolfo. Sviluppa un modello cinetico di sei reazioni che descrive il rilascio di zolfo sotto forma di H<sub>2</sub>S, zolfo nel tar e infine zolfo residuo nel char. La peculiarità di tale modello risiede nella sua potenziale generalità, ovvero non richiede analisi sperimentali di volatilizzazione del carbone. Il modello viene successivamente validato con dati di letteratura ed esperienze ad hoc.

#### **ITEA-SOFINTER**

Mette a disposizione della sperimentazione l’impianto pilota ISOTHERM-PWR ed il personale ITEA per la conduzione delle prove.

#### **ANSALDO CALDAIE**

Mette a disposizione della sperimentazione l’area sperimentale che ospita l’impianto pilota ISOTHERM-PWR, i servizi (acqua, forza motrice, gas tecnici, ecc.) ed il personale ANSALDO normalmente coinvolto nella conduzione delle prove.



## Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

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

Le tecnologie per l'utilizzo del carbone in sistemi di generazione elettrica che prevedono la cattura ed il sequestro della CO<sub>2</sub>, 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 (ad esempio quelle relative alla gassificazione del carbone, alla produzione di ossigeno, alla reattoristica di water gas shift, ai processi di estrazione di gas acidi da miscele di gas). Tali tecnologie 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 CO<sub>2</sub> 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 nel giro di 10-15 anni. Ciò richiederà però coraggiosi investimenti industriali per finanziare sia una serie di impianti dimostrativi (all'interno e all'esterno dell'UE), che di iniziative politiche connesse per un periodo relativamente prolungato (da adesso fino almeno al 2020) oltre che le necessarie attività di ricerca e sviluppo che dovranno seguire in parallelo tutta la fase di dimostrazione in un processo iterativo.

Nello specifico del tema in parola, 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 poi 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 CO<sub>2</sub>.

### DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Vengono condotte una serie di azioni atte a sostenere le attività di ricerca, avviate o in fase di definizione, volte alla riduzione dei costi di investimento relativi a centrali di produzione di energia elettrica basate sull'impiego di tecnologie che utilizzano carbone a differenti granulometrie e si avvalgono di sistemi di cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>, condizione oramai considerata essenziale per lo sviluppo dei moderni impianti a carbone. Il presente progetto affronta il complesso delle problematiche esteso a tutto il 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 CO<sub>2</sub>, fino al sequestro definitivo in depositi perenni con tecniche di confinamento ECBM (Enhanced Coal Bed Methane).

Il prodotto delle attività è rappresentato, da un lato dallo sviluppo di un processo "intrinsecamente pulito" in grado di abbattere il costo dei sistemi di trattamento dei gas esausti e dall'altro dall'incremento dell'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<sub>2</sub> e dalla verifica sperimentale della fattibilità tecnico-economica di tecnologie di confinamento della CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> in linea con le tendenze attuali e gli impegni internazionali assunti dal nostro Paese sulle tematiche energetico-ambientali.

Obiettivo finale del progetto è quello di sostenere attività riguardanti l'individuazione di un unico impianto finalizzato alla generazione elettrica da carbone con cattura e successivo sequestro della CO<sub>2</sub> in bacini carboniferi profondi con riduzione dei costi di investimento. Tre sono le linee d'azione principali:

- miglioramento e riduzione dei costi dei processi di produzione dell'energia elettrica (con cattura della CO<sub>2</sub>) da syngas prodotto a partire da carbone in varia granulometria;
- studio dell'applicabilità di tecniche di confinamento della CO<sub>2</sub> (ECBM e acquiferi) con verifiche sperimentali nell'area del bacino minerario del Sulcis;
- definizione di un sistema unico comprendente produzione elettrica e sequestro della CO<sub>2</sub>.

Le attività svengono principalmente effettuate presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia a nord di Roma, presso la Piattaforma Pilota del Centro Ricerche Sotacarbo, e presso diversi Istituti e Dipartimenti dell'Università di Cagliari e Milano avvalendosi della forte collocazione territoriale nell'ambito del bacino minerario del Sulcis nel sud-ovest Sardegna, dove hanno sede e impianti la società Sotacarbo, partecipata ENEA, detentrica della Piattaforma Sperimentale di Gassificazione del Carbone, e la Carbosulcis, società concessionaria dell'area del bacino minerario.

Le attività del primo anno sono articolate in sei obiettivi:

#### **A. Valutazione del processo di gassificazione con CO<sub>2</sub> come agente gasificante**

Vengono sviluppati modelli e simulazioni numeriche del processo di gassificazione che utilizza CO<sub>2</sub> come agente gasificante, operando con diversi codici analisi di sensibilità sulla variazione dei parametri principali, quali portate, temperature e composizione dei flussi principali, utili alla valutazione del processo. In questo stesso frangente viene dato avvio alla predisposizione delle prove in appoggio con adeguamento degli impianti pre-esistenti. L'obiettivo è quello di simulare la sostituzione (fino al 100%) con CO<sub>2</sub> dell'azoto normalmente presente nell'aria gasificante in modo da moderare le temperature a parità di portate nominali di alimento lato gas.

#### **B. Sperimentazione del processo di gassificazione con CO<sub>2</sub> come agente gasificante**

Vengono svolte le attività sperimentali sugli impianti di gassificazione presso la piattaforma pilota Sotacarbo con prove e test, relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi ad acquisire competenze sul processo in oggetto e a ricavare una prima serie di dati necessari alla validazione e tuning dei modelli. L'obiettivo è quello di testare sull'impianto prova debitamente predisposto la sostituzione con CO<sub>2</sub> dell'azoto normalmente presente nell'aria gasificante.

#### **C. Analisi comparativa di diversi sorbenti nel processo di desolforazione a caldo**

Quest'ambito prevede lo sviluppo di modelli teorici e simulazioni numeriche relative al processo di desolforazione del gas di sintesi, effettuata a temperature dell'ordine dei 300-500°C con l'utilizzo di sorbenti solidi a base di ossidi metallici, con analisi delle fasi di assorbimento e rigenerazione. A questi primi risultati fa seguito l'attività di progettazione di un reattore di prova bench scale. L'obiettivo prevede l'abbattimento del contenuto in H<sub>2</sub>S dal valore di 1300 ppmv atteso nel raw syngas (nel caso più sfavorevole di alimentazione al 100% con carboni ad alto contenuto di zolfo come il carbone Sulcis) fino ai 10 ppm<sub>v</sub> richiesti per evitare l'avvelenamento del catalizzatore della successiva sezione di Coshift.

#### **D. Sperimentazione di diversi sorbenti nel processo di desolforazione a caldo**

L'obiettivo prevede la realizzazione di un reattore di prova bench scale per la rigenerazione dei sorbenti e a valle degli opportuni adeguamenti della piattaforma pilota Sotacarbo, l'avvio delle attività sperimentali sull'impianto, con l'esecuzione di una prima campagna di sperimentazione dei processi di assorbimento e desorbimento a caldo dei prodotti derivati dallo zolfo su sorbenti a base di ossidi metallici. L'elaborazione dell'assorbimento/desorbimento.

#### **E. Studio preliminare per l'applicazione di tecniche ECBM nel bacino minerario del Sulcis**

In questo ambito vengono effettuate delle valutazioni preliminari per la selezione del sito idoneo alla applicazione delle tecniche ECBM nell'area del bacino carbonifero del Sulcis, individuando le principali sorgenti antropiche di CO<sub>2</sub> utili per lo sviluppo del progetto ed effettuando delle attività di campionamento e primo screening geologico dei siti. L'elaborazione dati così ottenuti definisce l'ubicazione più idonea del sito prova.

## F. Progettazione, realizzazione e prima sperimentazione di un Test Site a tecnologia ECBM

L'obiettivo prevede lo sviluppo di modelli teorici e simulazioni numeriche, l'effettuazione di indagini geologiche, l'avvio di attività analitiche di laboratorio mirate all'applicazione delle tecniche ECBM all'interno del bacino carbonifero del Sulcis. Verrà in questo frangente eseguita la progettazione e realizzazione delle prime infrastrutture di iniezione e monitoraggio dell'impianto prova Test Site a cui farà seguito una prima campagna sperimentale di iniezione e monitoraggio. I dati così ricavati saranno elaborati e resi disponibili per ulteriori azioni di R&S.

### RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Le attività vengono di seguito descritte, in coerenza con gli obiettivi previsti per il primo anno, sono ripartite nelle seguenti tematiche:

- Studio e sperimentazione della gassificazione operata con CO<sub>2</sub> come agente gasificante (obiettivi A e B)
- Studio e sperimentazione di diversi sorbenti per la desolforazione a caldo (obiettivi C e D)
- Studi per l'applicazione i tecnologie ECBM al bacino del Sulcis (obiettivi E e F).

#### Studio e sperimentazione della gassificazione operata con CO<sub>2</sub> come agente gasificante

Nell'ambito delle tecnologie innovative per la produzione di energia con separazione e confinamento della CO<sub>2</sub>, sono state recentemente proposte numerose configurazioni impiantistiche alternative alle tecnologie convenzionali. Tra queste appare molto interessante la possibilità di operare la gassificazione del carbone (o la co-gassificazione di carbone e biomasse) utilizzando la CO<sub>2</sub> come agente gasificante. Tale tecnologia, oltre a consentire, in generale, una maggiore efficienza di conversione del carbonio presente nel combustibile, consente infatti di avere, a valle del gassificatore, un syngas composto principalmente da CO, idrogeno, CO<sub>2</sub> e vapor d'acqua e, a valle del sistema di combustione, un gas combusto composto quasi esclusivamente da anidride carbonica e vapore, facilmente separabili mediante una semplice condensazione dell'acqua. La tecnologia di gassificazione con CO<sub>2</sub> non presenta, allo stato attuale, applicazioni commerciali, ma sono diversi, a livello mondiale, gli studi e le sperimentazioni a riguardo.

I processi di gassificazione con CO<sub>2</sub> attualmente in fase di sviluppo sono principalmente di due tipologie che essenzialmente si contraddistinguono per la presenza o meno di ossigeno nella miscela di gas alimentati al gassificatore. I processi di gassificazione con CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> sono adatti alla modifica dei processi di gassificazione convenzionali ad aria al fine di adattarli alle esigenze della separazione della CO<sub>2</sub>; mentre quelli che utilizzano solo CO<sub>2</sub> garantiscono migliori prestazioni rispetto ai primi ma, dal momento che richiedono condizioni operative del tutto particolari, possono essere adottati solamente in impianti nuovi. Per un'analisi delle due differenti tecnologie, è importante richiamare quelle che sono le principali reazioni che hanno luogo nei processi di gassificazione convenzionali :

|                                                         |   |                                    |                      |        |
|---------------------------------------------------------|---|------------------------------------|----------------------|--------|
| Composti organici                                       | ⇔ | tar + char + gas                   | pirolisi             | (1.1)  |
| Composti minerali                                       | ⇔ | ceneri                             | decomposizione       | (1.2)  |
| C + O <sub>2</sub>                                      | ⇔ | CO <sub>2</sub>                    | combustione totale   | (1.3)  |
| C + ½ O <sub>2</sub>                                    | ⇔ | CO                                 | combustione parziale | (1.4)  |
| C + H <sub>2</sub> O                                    | ⇔ | CO + H <sub>2</sub>                | gassificazione       | (1.5)  |
| C + 2 H <sub>2</sub> O                                  | ⇔ | CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> | gassificazione       | (1.6)  |
| C + CO <sub>2</sub>                                     | ⇔ | 2 CO                               | gassificazione       | (1.7)  |
| C + 2 H <sub>2</sub>                                    | ⇔ | CH <sub>4</sub>                    | idrogassificazione   | (1.8)  |
| CO + H <sub>2</sub> O                                   | ⇔ | CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>   | shift conversion     | (1.9)  |
| CO + 3 H <sub>2</sub>                                   | ⇔ | CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O | metanazione          | (1.10) |
| C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> + ½ (4n-m) H <sub>2</sub> | ⇔ | n CH <sub>4</sub>                  | hydrocracking        | (1.11) |
| C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> + n H <sub>2</sub> O      | ⇔ | n CO + ½ (2m+n) H <sub>2</sub>     | gassificazione       | (1.12) |

Gli equilibri di ciascuna delle suddette reazioni dipendono fortemente dalla tipologia del gassificatore, dalle caratteristiche del combustibile e dalle particolari condizioni operative.

Le reazioni di combustione 1.3 e 1.4, fortemente esotermiche, liberano il calore necessario per innalzare la temperatura del reattore a valori tali da rendere possibili le reazioni di gassificazione vere e proprie. In particolare, un primo innalzamento di temperatura (fino a circa 200÷300 °C) consente di liberare l'acqua e i composti gassosi

volatili contenuti nel combustibile; successivamente, all'aumentare della temperatura, avvengono le reazioni vere e proprie di gassificazione. Da un punto di vista energetico, la combustione parziale del carbonio produce solamente il 20÷30% del calore ottenibile mediante una combustione totale dello stesso. Il restante 70÷80% è così disponibile sotto forma di potere calorifico del syngas.

Le reazioni di gassificazione vere e proprie (1.5, 1.6 e 1.7), endotermiche, sono chiaramente quelle di maggior rilievo nell'intero processo. È importante notare, tra l'altro, che il vapore acqueo presente nel reattore, oltre a rendere possibile le reazioni suddette, è importantissimo come moderatore della temperatura.

La reazione 1.9 di shift conversion riveste notevole interesse per la determinazione dei rapporti fra idrogeno, monossido di carbonio e CO<sub>2</sub> contenuti nel syngas, rapporti che sono di fondamentale importanza per il funzionamento delle apparecchiature a valle.

Fra i vari parametri che caratterizzano il processo di gassificazione rivestono notevole importanza i rapporti tra ossigeno e carbone e tra vapore e carbone, oltre che la purezza dell'ossidante:

- $\alpha$  = massa di ossigeno / massa di combustibile
- $\mu$  = massa di vapore / massa di combustibile
- $\phi$  = massa di ossigeno / massa di ossidante (purezza dell'ossidante).

In particolare, all'aumentare del rapporto  $\alpha$  aumenta il contributo delle reazioni di combustione rispetto alla gassificazione, e quindi diminuiscono le frazioni molari di H<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> mentre aumentano quelle di CO<sub>2</sub> e di H<sub>2</sub>O; all'aumentare di  $\mu$ , invece, vengono favorite le reazioni di gassificazione e di shift conversion, per cui aumentano le percentuali di CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub> mentre diminuiscono quelle di CO e di CH<sub>4</sub>; il valore di  $\phi$ , infine, condiziona fortemente la dinamica del processo e la percentuale di azoto nel syngas prodotto.

Come accennato, i processi di gassificazione con CO<sub>2</sub> e ossigeno sono facilmente applicabili a impianti di gassificazione ad aria già esistenti. In pratica si può pensare di sostituire, parzialmente o completamente, l'azoto della miscela ossidante con l'anidride carbonica, al fine di migliorare le condizioni operative del processo e controllarne la temperatura operativa aumentando contemporaneamente la pressione parziale di CO<sub>2</sub> nel syngas e, conseguentemente, l'efficienza dei sistemi di separazione della stessa. A basse pressioni operative, la presenza della CO<sub>2</sub> nell'agente gassificante inibisce le reazioni di gassificazione (1.5 e soprattutto 1.6), ma favorisce la reazione endotermica 1.7, con l'ossigeno utilizzato per le reazioni di combustione 1.3 e 1.4 che forniscono l'energia termica necessaria alle reazioni di gassificazione. In tal modo, a parte una forte riduzione della concentrazione di azoto nel syngas (solo in parte sostituito dalla CO<sub>2</sub> immessa), si ha un sensibile aumento della concentrazione del CO e una non eccessiva riduzione della formazione di idrogeno. Le variazioni nella concentrazione di tali gas comportano un parziale bilanciamento allo spostamento degli equilibri del processo di CO-shift dovuti all'elevata concentrazione di CO<sub>2</sub> nel gas.

In ogni caso, a valle dei sistemi di depurazione del gas e del processo di CO-shift, il syngas è composto quasi esclusivamente da CO<sub>2</sub> e idrogeno. Esso può essere pertanto utilizzato secondo due differenti strategie:

- inviato a un sistema di separazione della CO<sub>2</sub> (ad esempio mediante assorbimento con solventi chimici o fisici, a seconda della pressione operativa), con produzione di idrogeno (eventualmente da inviare in appositi processi per la produzione di energia elettrica);
- inviato direttamente a processi di combustione con ossigeno (e non aria) come agente ossidante; i gas combusti, in tal modo, saranno composti principalmente dalla CO<sub>2</sub> presente nel syngas e dal vapor d'acqua derivante dalla combustione dell'idrogeno.

Quest'ultima soluzione è particolarmente interessante nel caso di processi di gassificazione ad alta pressione; infatti, in tal modo, è possibile recuperare l'energia potenziale correlata alla pressione della CO<sub>2</sub> presente nel syngas (nei processi di assorbimento con solventi liquidi, infatti, la CO<sub>2</sub> separata è disponibile solamente a bassa pressione).

Nel corso del progetto di ricerca sono stati sviluppati e validati due modelli per la simulazione di processi di gassificazione e combustione del polverino di carbone con ricircolo dei prodotti. L'attenzione si è soffermata maggiormente verso i processi di combustione, in quanto le loro potenzialità di utilizzo sono ritenute più interessanti dal punto della riduzione di inquinanti e gas serra. Tale tecnologia consiste nell'effettuare la combustione con una miscela di gas di scarico (principalmente CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O), arricchita con O<sub>2</sub> puro, in modo da poter separare a valle la CO<sub>2</sub> attraverso la condensazione dell'H<sub>2</sub>O. Nel corso del progetto sono stati sviluppati, come detto, due modelli CFD per la simulazione di questi processi. Nel primo modello semplificato, le reazioni chimiche omogenee in regime turbolento sono trattate attraverso il modello Eddy Dissipation (EDM), basato sull'assunzione di reazioni chimiche infinitamente veloci rispetto al miscelamento turbolento dei reagenti. La volatilizzazione del carbone è modellata attraverso un modello empirico pseudo-cinetico ad una velocità. Esso

necessità di essere tarato in base al carbone in esame attraverso dati sperimentali. Le reazioni eterogenee del char sono definite attraverso un modello cinetico-diffusivo, considerando la sola reazione di ossidazione del char. Nel secondo modello, avanzato, le reazioni chimiche sono definite attraverso il modello Eddy Dissipation Concept, che rappresenta un'estensione del modello EDM, per tenere conto della cinetica delle reazioni chimiche. Si è considerato un meccanismo cinetico costituito da 4 reazioni chimiche e 7 specie (Meccanismo di Jones e Lindstedt). Il modello Chemical Percolation Devolatilization (CPD) è utilizzato per tenere conto della volatilizzazione del carbone. Questo modello, basato sulla definizione delle strutture molecolari del carbone, permette di definire in maniera dettagliata la composizione dei volatili (TAR e gas leggeri) e la velocità in funzione delle condizioni operative, in base a dei dati relativi al carbone ricavabili attraverso l'analisi spettroscopica  $^{13}\text{NMR}$ . Fluent implementa il modello CPD per il calcolo della velocità di volatilizzazione, ma non permette di modellare la composizione dei volatili, in quanto tiene conto di una sola specie volatile. Questa limitazione è superata definendo una reazione fittizia, dove la specie pseudo-volatile è scomposta nelle specie volatili reali. Il bilanciamento di questa reazione è basata sui risultati del modello CPD (TAR e gas leggeri). Le reazioni eterogenee del char sono modellate con lo schema cinetico-diffusivo visto in precedenza, considerando le reazioni del char con  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ .

È stato sviluppato un modello di simulazione del processo di gassificazione in gassificatori a letto fisso in controcorrente (up-draft) di piccola taglia, nell'ipotesi di sostituzione dell'azoto presente nell'aria quale agente moderatore. Sono state analizzate tre differenti soluzioni: alimentazione con biossido di carbonio, introduzione di una ulteriore portata di vapore e ricircolo di una frazione di syngas all'uscita del gassificatore. Le prestazioni sono state valutate attraverso un modello di simulazione sviluppato nel DIMECA con il codice di calcolo commerciale ASPEN PLUS.

È stata effettuata un'analisi delle potenzialità di impiego di  $\text{CO}_2$  come agente gassificante in impianti IGCC. La disponibilità di  $\text{CO}_2$  per questo scopo è naturalmente legata alla presenza di sistemi di cattura della  $\text{CO}_2$ , in quanto sarebbe di scarso interesse pensare ad una produzione di questo fluido svincolata dalla cattura. Peraltro gli impianti IGCC risultano particolarmente promettenti, rispetto alle tecnologie concorrenti, proprio in presenza di sistemi di cattura di  $\text{CO}_2$ .

Il lavoro è dedicato in particolare alla modellizzazione degli impianti, finalizzata alla previsione delle prestazioni e del bilancio energetico. Dopo una descrizione del metodo di calcolo impiegato (un codice sviluppato internamente al Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano per l'analisi degli impianti di potenza), viene affrontata la tematica della gassificazione con  $\text{CO}_2$  in termini di principi generali: premesso che il vapore risulta più efficace in termini di cinetica chimica, l'impiego di  $\text{CO}_2$  rispetto al vapore comporta un'analogia influenza sulla cold gas efficiency, aumentando, come prevedibile, la concentrazione di CO nel syngas rispetto all'idrogeno.

Un maggior contenuto di CO non è invece penalizzante per un impianto di ossicombustione, in particolare se accoppiato a un gassificatore dry-feed (più efficiente!) in cui la pressurizzazione della carica è appunto effettuata

con  $\text{CO}_2$ . L'analisi svolta confronta un IGCC senza cattura, uno con cattura pre-combustione e uno con ossi-combustione, basandosi su un insieme di assunzioni comuni sia per la sezione di gassificazione che per il ciclo di potenza. Si evince come la perdita di rendimento causata dalla cattura si riduca da 9 a 7 punti percentuali passando da pre- a ossi-combustione.

È stato sviluppato presso ENEA un modello a parametri concentrati che si basa sull'utilizzo di software di tipo industriale (ChemCAD) per l'analisi ed il bilancio termodinamico dei processi in impianti chimici e/o di potenza.

In accordo con altri modelli di gassificatore a letto fisso reperibili in letteratura il modello è caratterizzato dalla presenza di quattro zone principali: essiccaimento, devolatilizzazione, gassificazione, combustione e raffreddamento delle ceneri con preriscaldamento degli agenti gassificanti.

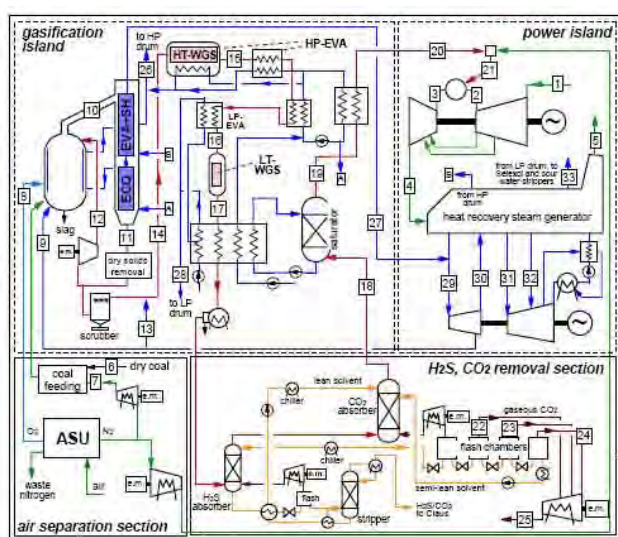
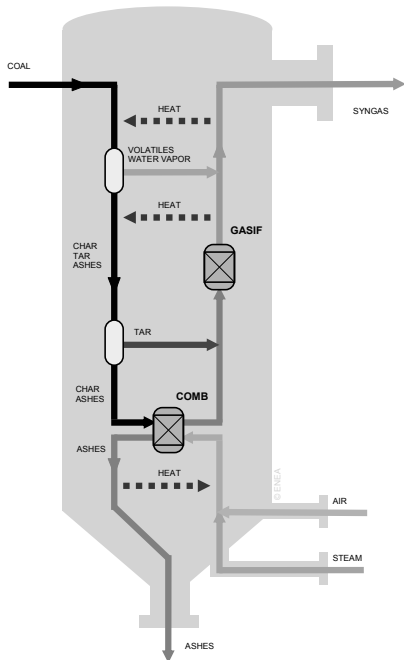


Figura 26. Schema dell'impianto IGCC con cattura precombustione della  $\text{CO}_2$

Per tener conto dei diversi meccanismi coinvolti nel processo l'intero gassificatore è stato modellato con diversi componenti disponibili all'interno del catalogo componenti del software.



Due reattori separati vengono utilizzati per simulare le zone di equilibrio chimico. Il carbone, alimentato a temperatura ambiente dalla sommità del gassificatore, viene riscaldato ed essiccato dai gas caldi risalenti dal letto. Più in basso il vapore e i gas volatili vengono rilasciati per unirsi al syngas in uscita mentre il char, le ceneri i tar più pesanti scendono verso il basso. Tutto questo materiale viene nel suo percorso discendente ulteriormente riscaldato fino a quando i tar evaporando producono ulteriore syngas insieme a parte dei prodotti solidi che reagiscono con gli agenti gasificanti provenienti dal sotto griglia fino alla zona di combustione. L'equilibrio chimico viene calcolato con reattori di Gibbs. Sulla base dei tre input principali (carbone, vapore e agente gassificante) è possibile calcolare le temperature operative delle diverse zone e la composizione e l'entità dei flussi nei diversi rami. Altri input del modello sono dati dalla temperatura di preriscaldamento del carbone, dalla differenza di temperatura media tra solidi e gas e dalla temperatura di scarico ceneri. Il modello può valutare sia i gassificatori refrattariati (pressoché adiabatici) che quelli dotati di water jacket. E' inoltre possibile far variare i parametri di alimentazione caratteristici per

fare il tuning con i dati sperimentali e per ottimizzare le performance in termini di rendimento di gassificazione, contenuto di idrogeno o quant'altro si reputi opportuno. E' stato poi sviluppato un modello matematico di un gassificatore a letto fisso a flussi controcorrente updraft alimentato con biomassa e/o carbone. Tale modello, a parametri distribuiti, matematico descrive il fenomeno complessivo della gassificazione dal punto di vista chimico-fisico prendendo in considerazione:

- i processi evolutivi di conversione del solido che portano alla formazione di gas e char;
- le reazioni chimiche omogenee in fase gas;
- le reazioni eterogenee gas-solido.

Buona parte dei modelli reperibili in letteratura sono in grado di predire il funzionamento di tale apparecchiatura studiando il fenomeno dal punto di vista dell'equilibrio. Il presente studio si è proposto, invece, di modellare l'apparecchiatura tenendo conto delle cinetiche di reazione.

Da un punto di vista fluidodinamico, il modello è in grado di calcolare i profili di velocità della fase solida e gassosa, i profili di temperatura della fase solida e della fase gassosa, oltre che i profili di concentrazione delle specie che partecipano alle reazioni.

Il processo di gassificazione permette la trasformazione di combustibili eterogenei e difficili da trattare come biomasse e carbone in un gas che può essere utilizzato, a seconda delle caratteristiche, in impianti per la produzione di energia, in turbine a gas o trasformato secondo opportuni trattamenti, al fine di ottenere combustibili liquidi come il metanolo. L'utilizzo del processo di gassificazione per la produzione di combustibili appare vantaggioso dal momento che i rendimenti globali di conversione energetica sono stimati intorno al 75-80%.

Il processo nel complesso è composto da tre fasi principali:

- una di pirolisi (endotermica);
- una di gassificazione propriamente detta, ossia la conversione in gas della parte solida precedentemente ottenuta dalla pirolisi (a cui partecipano reazioni endotermiche ed esotermiche);
- una di combustione (fortemente esotermica).

Nonostante l'aria sia l'agente gassificante più utilizzato sono noti anche processi di gassificazione che sono condotti mediante l'uso di ossigeno, vapore d'acqua, anidride carbonica o idrogeno. Le caratteristiche del gas prodotto dipendono comunque dal tipo di agente utilizzato.

La gassificazione con aria presenta il classico problema della diluizione del gas prodotto ad opera dell'azoto che quindi contribuisce all'abbassamento del potere calorifico. Questo aspetto può comunque non essere determinante nella scelta dell'ossidante. Nella pratica industriale il fattore economico diventa infatti il parametro prevalente e pertanto è frequente che gli impianti che utilizzano ossigeno, vapore o addirittura idrogeno non siano

utilizzati perché non risultano economicamente convenienti. A seconda delle condizioni di esercizio adottate è possibile spostare il risultato della reazione verso le frazioni più leggere o pesanti. In particolare risultano rilevanti le condizioni alla quale viene condotta la pirolisi. Con alte velocità di riscaldamento, basse temperature e bassi tempi di residenza si sposta la conversione verso i prodotti condensabili (TAR). Questo, poiché si vuole massimizzare la produzione di gas, rende necessaria la promozione di reazioni di cracking all'interno del reattore nel caso si volesse massimizzare la produzione di gas. Per questa ragione, la pirolisi veloce viene di solito promossa in processi dedicati alla produzione di Bio Oil e non finalizzati alla produzione di gas. Il processo di pirolisi lenta, caratterizzato da velocità di riscaldamento minori e tempi di permanenza nel reattore più elevati, sposta invece la conversione a favore di char e prodotti gassosi.

Pertanto i parametri più importanti da tenere sotto controllo nel caso della gassificazione sono:

- la temperatura
- il rapporto ossidante/carbone
- le condizioni alle quali avviene la pirolisi.

La distribuzione tra i diversi prodotti dipende fortemente dal tipo di reattore nel quale si fa avvenire la reazione. Il modello considera in alimentazione due tipologie di combustibile (carbone e biomassa) e un agente gassificante costituito da una miscela di aria, vapore oppure ossigeno e anidride carbonica. I combustibili sono caratterizzati in termini di analisi immediata (ceneri e umidità e nel caso del carbone carbonio fisso e volatili). Da un punto di vista granulometrico, il modello prevede la definizione di un diametro medio delle particelle di combustibile alimentate.

Per la descrizione dei fenomeni di conversione del combustibile, il modello prevede la definizione di due fasi in particolare:

- una fase solida costituita dalle seguenti specie: combustibile (carbone/biomassa), char, ceneri
- una fase gas in cui i componenti presi in considerazione sono: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, tar da biomassa o da carbone; H<sub>2</sub>S, COS, Tiofene, CS<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>

Le specie solide e gassose considerate nel modello sono quelle che percentualmente sono maggiormente presenti nel gas di sintesi.

Il processo evolutivo del combustibile avviene secondo il seguente meccanismo:

- essiccamento
- pirolisi (primaria e secondaria)
- gassificazione
- combustione.

Da un punto di vista termofluidodinamico il modello permette di calcolare i profili di concentrazione delle specie in fase solida e gassosa, i profili di velocità del solido e del gas e i profili di temperatura delle due fasi. Il reattore di tipo plug flow è discretizzato attraverso una serie di celle di volume costante di lunghezza pari a  $\Delta z$  e sezione pari quella del reattore. Ciascuna cella è di tipo CSTR e pertanto è caratterizzata in tutto il suo volume da un unico valore della concentrazione delle varie specie e della temperatura delle fasi. Il reattore si considera provvisto di una camicia di raffreddamento e il modello tiene conto del calore disperso tramite le pareti.

Il modello sviluppato nel corso di questo lavoro è basato su bilanci microscopici di materia ed energia in regime temporale. Per ciascuna cella sono state scritte le equazioni di bilancio materiale per ciascun componente in fase gas e solida e le equazioni di bilancio termico delle due fasi solida e gassosa. Nel seguito verranno elencate le assunzioni fatte durante la scrittura delle equazioni.

Il sistema presenta geometria cilindrica ed è caratterizzato in termini di lunghezza e diametro del reattore. Per quanto riguarda la fluidodinamica del sistema: nella direzione longitudinale al moto è stato considerato un flusso di tipo convettivo e uno di tipo diffusivo, mentre nella direzione radiale il flusso è completamente assente. Queste assunzioni equivalgono a considerare una fluidodinamica di tipo plug-flow con dispersione assiale, come già evidenziato; i profili di temperatura e concentrazione variano esclusivamente in funzione della coordinata assiale. In questa prima stesura la pressione nel letto è stata considerata costante. I gas sono stati assunti a comportamento ideale e per descriverne i parametri termodinamici caratteristici si è fatto ricorso all'equazione di stato dei gas perfetti.

Per il calcolo della velocità del gas è stata utilizzata l'equazione di continuità globale. Il bilancio di materia sulle ceneri è stato utilizzato per il calcolo della velocità. Sia la velocità del solido che quella del gas risultano costanti in ciascuna sezione. Per poter effettuare questi calcoli, il grado di vuoto è stato considerato costante lungo tutto il reattore. Per la stesura del bilancio termico il reattore è stato considerato adiabatico. Poiché alcune reazioni avvengono in fase gassosa e altre avvengono in fase solida e poiché le due fasi procedono in controcorrente, non è



possibile considerare uguali le temperature delle due fasi. Sono stati quindi effettuati due bilanci, uno per il solido e l'altro per il gas, all'interno dei quali è stato introdotto un termine di scambio termico tra le fasi per convezione ed irraggiamento.

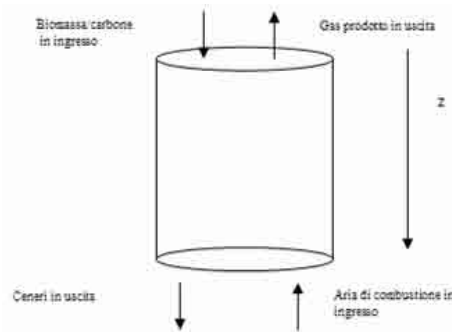


**Figura 27. Schematizzazione del reattore**

La cinetica utilizzata per le reazioni di pirolisi è di tipo pseudo-omogeneo. L'essiccamento è stato descritto attraverso una reazione aggiuntiva con velocità calcolata mediante una cinetica di primo ordine nei confronti dell'umidità del combustibile. La costante moltiplicativa è funzione della temperatura secondo l'equazione di Arrhenius. Le reazioni di gassificazione e quella di combustione del char sono state descritte attraverso una cinetica eterogenea. Per quanto riguarda l'aria in ingresso nella sezione inferiore del reattore si è assunto che essa sia costituita solo da azoto e ossigeno nella proporzione usualmente adottata per la combustione (21% in moli di ossigeno e 79% in moli di azoto). Oltre all'aria è considerata una portata di vapore. L'azoto presente nell'aria è stato considerato inerte.

Come conseguenza delle considerazioni descritte in precedenza le variabili del problema in esame sono:

- la concentrazione dei singoli componenti;
- la temperatura del solido e quella del gas;
- la velocità del solido e del gas.

I componenti del sistema in esame sono venti: biomassa, carbone, umidità biomassa, umidità carbone, ceneri, char, zolfo, tar da carbone, tar da biomassa,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CS}_2$ , tiofene. Per risolvere il sistema è necessario scrivere i bilanci di materia su ogni singolo componente, il bilancio di calore per ogni singola fase e le equazioni di continuità globale che permettono di ricavare le velocità.

Sono stati scritti bilanci di materia in stato non stazionario per biomassa, umidità, char, tar,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  e ad essi è stato aggiunto il bilancio di materia globale. La densità dell'azoto è stata calcolata come differenza tra la densità del gas e la somma delle densità del singolo componente. E' stato necessario rilevare dalla letteratura tutti i parametri chimici e fisici necessari per la definizione delle cinetiche delle reazioni e delle proprietà termofluidodinamiche dei fluidi. Nel seguito si riporta una breve descrizione delle relazioni utilizzate per la stima dei parametri. Per risolvere il sistema di equazioni differenziali che costituisce il modello è stato sviluppato in linguaggio Fortran. Il sistema di equazioni differenziali viene risolto attraverso il metodo delle differenze finite di tipo esplicito. I bilanci di materia e calore vengono risolti in maniera separata. Questo significa che partendo da un profilo iniziale vengono effettuate alcune iterazioni sulla composizione del gas e del solido. Raggiunta la convergenza per i bilanci di materia i profili di concentrazione vengono mantenuti costanti e si effettuano le iterazioni sui bilanci di temperatura sino al raggiungimento della convergenza. Il ciclo viene ripetuto sino al raggiungimento dello stato stazionario.

Sul modello sono stati condotti dei test con alimentazione a carbone e con un'alimentazione di agenti gassificanti costituita da una miscela di ossigeno e  $\text{CO}_2$ : per questo test, preliminarmente, si è considerata infatti una alimentazione nella quale la  $\text{CO}_2$  ha sostituito l'azoto presente nell'aria utilizzata in altri test. Ci si è riferiti ad un rapporto aria/combustibile pari a 1,3 ma più propriamente si dovrebbe parlare di rapporto tra la portata della miscela gassificante (costituita da  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ) e la portata del carbone. Vengono successivamente mostrati i grafici ottenuti con la simulazione condotta sul modello iniettando la  $\text{CO}_2$  in luogo dell'azoto.

La Figura 28, che illustra i profili di concentrazione rispettivamente di carbone, char e ceneri lungo il letto, mostra che l'andamento è simile a quello si ottiene per le prove condotte con aria: tale somiglianza sarà maggiormente chiara dal confronto delle curve che verrà presentato successivamente.

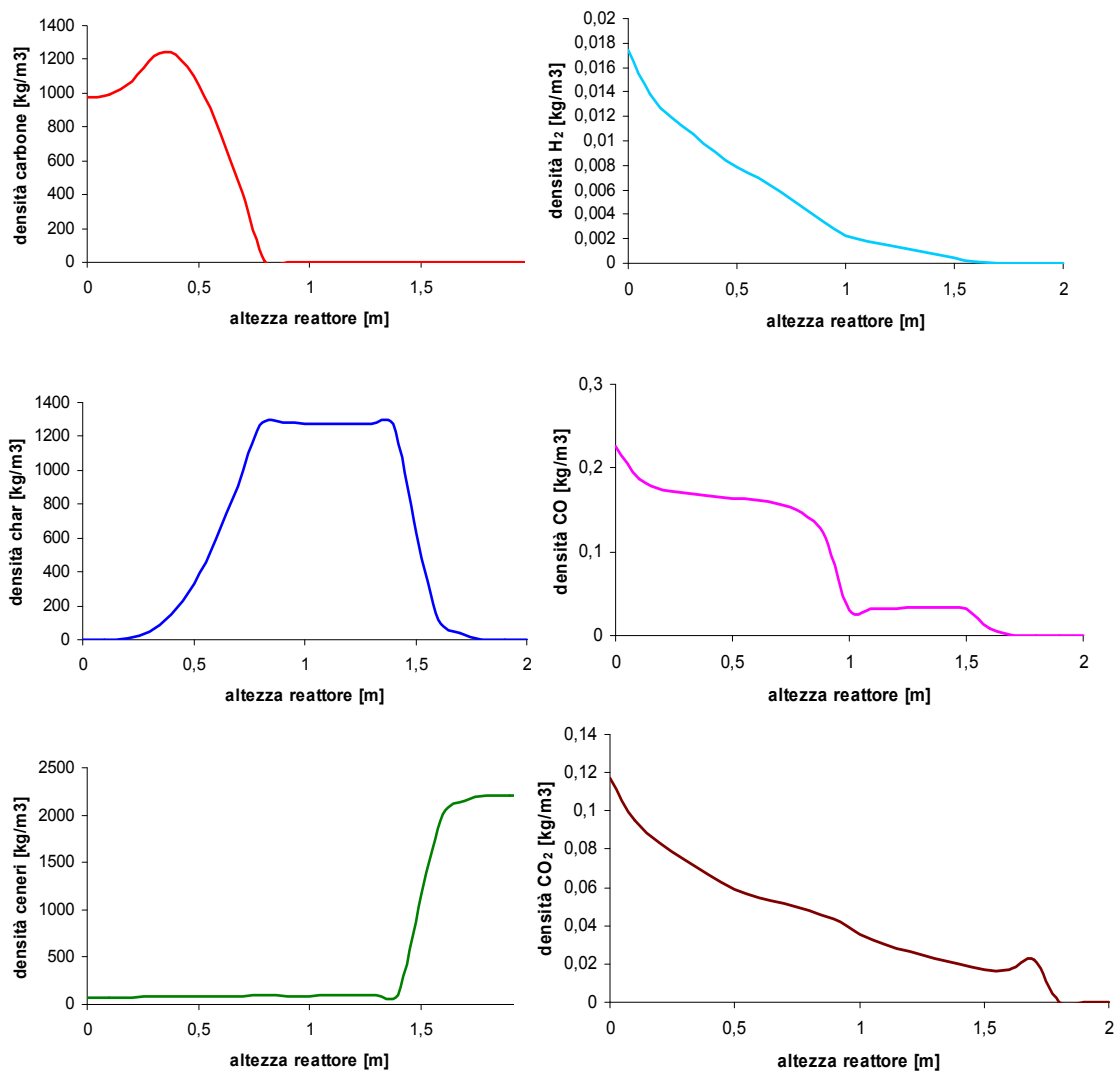


Figura 28. Profilo di concentrazione del char, del carbone, delle ceneri, di H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> lungo il reattore

I profili di concentrazione lungo il reattore di CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> risentono dell'influenza della presenza della CO<sub>2</sub> nell'alimentazione e dunque dei diversi rapporti che si creano tra le reazioni di gassificazione, combustione e di CO-shift che avvengono nella parte inferiore del reattore.

La Figura 29 mostra, infine, gli andamenti dei profili di temperatura del solido e del gas nel reattore. Si può osservare come per entrambi i casi il picco di temperatura sia poco superiore ai 1000 °C, temperatura inferiore a quella raggiunta nelle prove con aria.

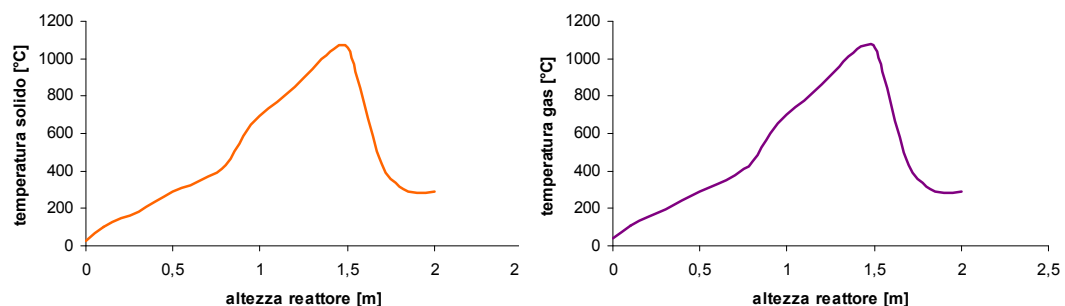


Figura 29. Confronto tra alimentazione con aria e CO<sub>2</sub>

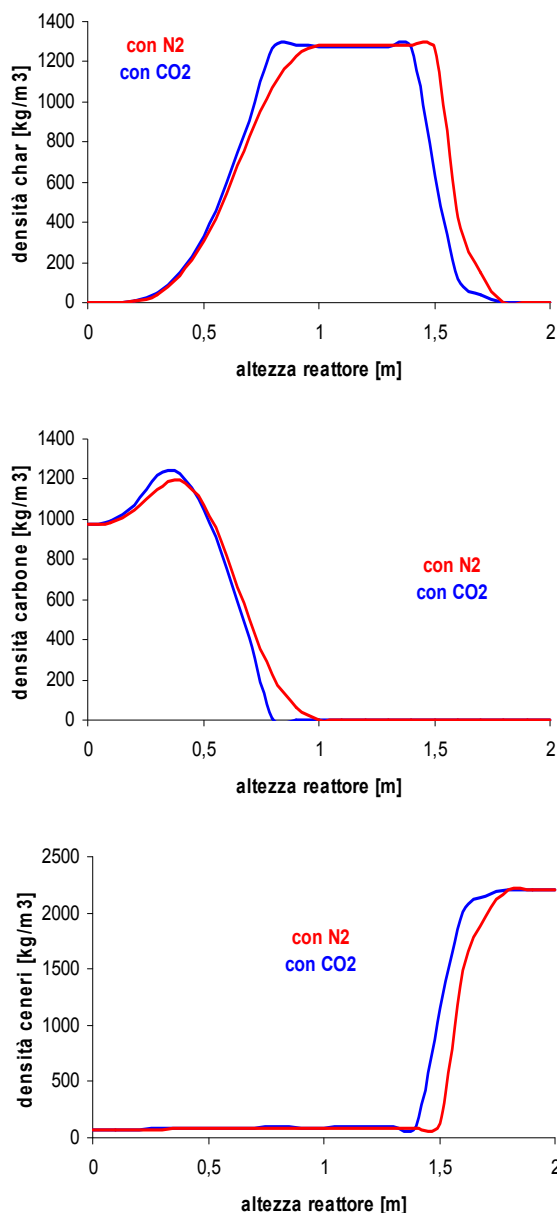


Figura 30. Confronto tra i profili di concentrazione del char, del carbone e delle ceneri con aria e CO<sub>2</sub>

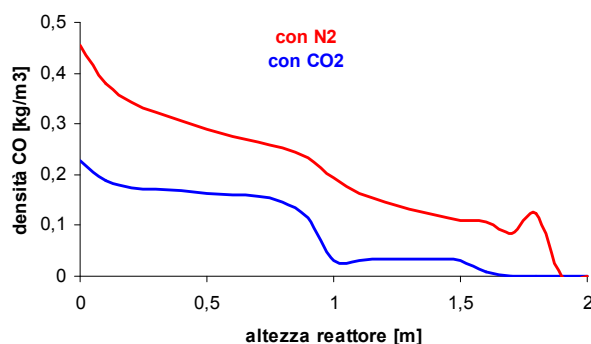


Figura 31. Confronto tra profili di concentrazione del CO per le simulazioni condotte con aria e CO<sub>2</sub>

Di seguito vengono presentati i grafici di confronto tra i test effettuati con alimentazione con aria e con CO<sub>2</sub>.

Le figure a lato mostrano il confronto tra i profili del char, del carbone e delle ceneri per le due simulazioni eseguite. Si può osservare che tali profili variano poco nei due casi: le differenze tra un profilo e l'altro, per ciascuno dei prodotti considerati, sono minime e i grafici sono pressoché sovrapponibili.

Seguono le figure che mostrano i profili di concentrazione del CO per le due simulazioni effettuate. Il profilo ottenuto in presenza di CO<sub>2</sub> è differente da quello che si ha effettuando la gassificazione con aria: come precedentemente detto ciò dipende da come la presenza della CO<sub>2</sub> influenza le reazioni di gassificazione e combustione: la temperatura all'interno del reattore è più bassa rispetto al caso in cui la gassificazione viene effettuata con aria: temperature più basse significano reazioni più lente e dunque minore formazione di prodotti. Inoltre avendo più CO<sub>2</sub>, la reazione di gassificazione è favorita ed è più veloce: essendo questa reazione endotermica, sfrutta il calore della reazione di combustione del char (picco di temperatura più basso) e in generale si può dire che nel processo in presenza di CO<sub>2</sub> l'endotermicità della reazione di gassificazione contrasta in qualche modo l'esotermicità della combustione e dunque, come detto, il processo avviene a temperature più basse. Tale aspetto è chiarito ulteriormente dal confronto dei profili di temperatura in cui si vede come il picco di temperatura nel caso di gassificazione con aria è molto più pronunciato rispetto al caso di gassificazione con CO<sub>2</sub>.

Più in generale si può affermare che la presenza della CO<sub>2</sub> nell'alimentazione modifica tutta una serie di equilibri sulle reazioni e influenza le condizioni operative (temperatura) a cui avvengono le reazioni, determinando una differente composizione del gas in uscita rispetto al caso in cui la gassificazione è compiuta con aria. La sperimentazione prevista sull'impianto per l'attività B2 del progetto permetterà di studiare meglio gli effetti della presenza della CO<sub>2</sub> nell'alimentazione del gassificatore.

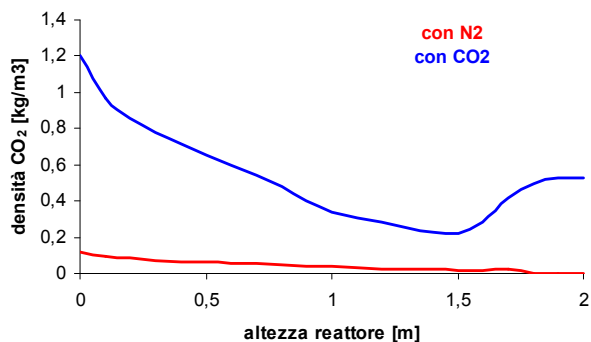


Figura 32. Confronto tra profili di concentrazione della  $\text{CO}_2$  per le simulazioni condotte con aria e  $\text{CO}_2$

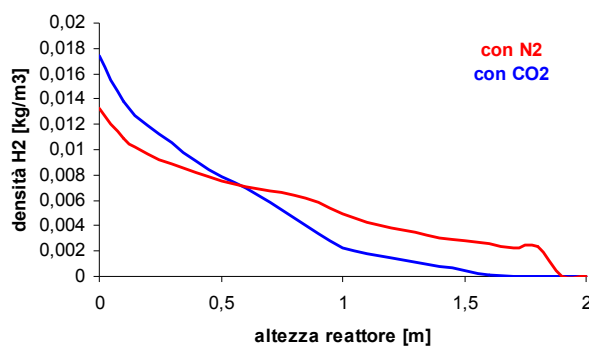


Figura 33. Confronto tra profili di concentrazione dell' $\text{H}_2$  per le simulazioni condotte con aria e  $\text{CO}_2$

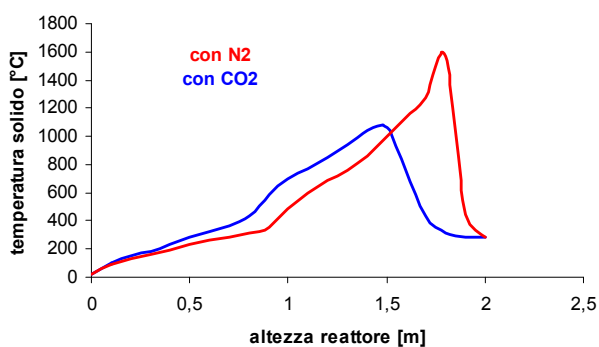


Figura 34. Confronto tra profili di temperatura del solido per le simulazioni condotte con aria e  $\text{CO}_2$

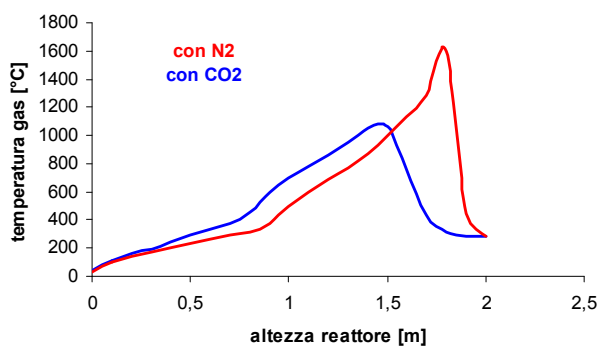


Figura 35. Confronto tra profili di temperatura del gas per le simulazioni condotte con aria e  $\text{CO}_2$

Le attività di laboratorio svolte si sono sviluppate nell'ambito dei progetti con il principale obiettivo di fornire dati utili all'esercizio degli impianti da avviare, nonché di evidenziare eventuale problematiche associate alla gestione degli stessi impianti. Le direttrici di ricerca seguite sono:

- attività di caratterizzazione del carbone sia mediante strumentazione analitica (TGA) che senza; si è individuata l'analisi immediata, la temperatura di fusione delle ceneri il potere calorifico inferiore e superiore, il contenuto di zolfo totale del carbone, e la densità effettiva. I carboni analizzati sono stati il carbone Sulcis, il carbone di legna, il carbone estero (sudafricano) e il coke;
- analisi della gassificazione del carbone con CO<sub>2</sub> mediante l'utilizzo della bilancia termogravimetrica TGA

Le attività sperimentali, inerenti il reattore su scala di laboratorio e la caratterizzazione del carbone, si sono svolte presso i laboratori ENEA; le analisi termogravimetriche sono state effettuate utilizzando una bilancia termogravimetrica, (modello Mettler-Toledo TGA-DSC1) di recente acquisizione della Sezione Impianti.

Il programma di lavoro impostato, concernente la bilancia termogravimetrica, si è posto come possibili principali obiettivi di studiare i processi legati alla gassificazione, sfruttando le peculiarità dello strumento di fornire informazioni relative alle cinetica.



**Figura 36. Set up laboratorio gassificazione**

Si sono quindi delineate e in parte attuate le seguenti possibili attività di ricerca:

1. Attività di caratterizzazione del carbone
2. Analisi del processo di gassificazione del carbone con CO<sub>2</sub>
3. Analisi delle cinetiche associate ai processi
4. Analisi dei processi di adsorbimento dell'H<sub>2</sub>S su sorbenti solidi

Si è fornito il supporto all'attività sperimentale inerente l'analisi del processo di gassificazione e del sistema di abbattimento degli effluenti mediante un reattore su scala di laboratorio. L'attività sperimentale inerente lo studio del processo e della cinetica della gassificazione del carbone mediante CO<sub>2</sub> si è svolta mediante l'utilizzo della bilancia termogravimetrica (TGA); sfruttando la peculiarità di questa strumentazione di analizzare le cinetiche delle reazioni gas-solido.

La gassificazione del carbone con CO<sub>2</sub> si sviluppa secondo la seguente reazione:



Reazione che risulta endotermica, favorita quindi a temperature superiori a 700°C, ed eterogenea.

Le equazioni delle velocità di reazioni da utilizzare in tale studio, sono quelle applicate alle reazioni eterogene gas-solido e deducibili dalla letteratura (ad esempio si potrebbe utilizzare il modello cinetico di Langmuir-Hinshelwood o quello legato all'ordine di reazione).

L'utilizzo della bilancia termogravimetrica potrebbe fornire i parametri cinetici del modello individuato; si potrà per di più, condurre un'analisi sensitiva su differenti parametri quali ad esempio: temperatura di reazione, granulometria, tipo di carbone e utilizzo di agenti catalizzanti la reazione (Sali o ossidi di metalli alcalini).

Il metodo definito per analizzare il processo di gassificazione del carbone con  $\text{CO}_2$  mediante l'utilizzo della bilancia termogravimetrica prevede:

- Pirolisi del campione 0-1000 °C in flusso di azoto
- Fase di reazione con un flusso  $\text{CO}_2$  mantenendolo ad una temperatura costante (condizioni di isothermicità) per il tempo necessario alla completa o parziale conversione del carbonio fisso, ossia fino al raggiungimento del plateau.
- Stima della conversione nel tempo  $X(t)$  a differenti temperature di reazione ( $T = 800-900-1000$  °C)
- Valutazione e confronto delle differenti conversioni in funzione delle differenti temperature di reazione e delle differenti granulometrie
- Individuazione dei parametri cinetici del modello individuato
- Individuazione delle costanti cinetiche a differenti temperature per calcolare i parametri dell'equazione di Arrhenius.

Per quanto riguarda lo specifico delle attività sperimentali svolte e l'applicazione della tecnologia di gassificazione con  $\text{CO}_2$  alla Piattaforma Pilota Sotacarbo, il campo è stato limitato al processo di gassificazione con immissione di ossigeno nel fluido gassificante. La sperimentazione in parte svolta nell'impianto da laboratorio (opportunamente modificato e integrato) sostituendo via via l'aria gassificante con la miscela di  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$ , cercando di raggiungere, di volta in volta, lo stato stazionario monitorato mediante l'analisi delle temperature e della composizione del syngas, misurata mediante un gascromatografo. Per lo studio sperimentale del processo si è resa necessaria una serie di adeguamenti della Piattaforma Pilota, di seguito descritti. Anzitutto è stato necessario realizzare un sistema di miscelazione che consenta l'immissione, all'interno del gassificatore da laboratorio, della miscela  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  necessaria alla sperimentazione.



Figura 37. Sistema di miscelazione di  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$

Tale sistema consente di introdurre, tramite la linea di adduzione dell'ossigeno (già presente), la miscela gassificante. Inoltre, la Piattaforma pilota è stata completata attraverso alcune integrazioni impiantistiche sia per renderla rispondente a maggiori esigenze di sicurezza e di flessibilità operativa, che per adeguarla alle necessità legate allo sviluppo delle sperimentazioni sulla gassificazione del carbone mediante  $\text{CO}_2$  come agente gassificante. Sono state pertanto effettuate la progettazione e la realizzazione delle integrazioni impiantistiche che hanno consentito di completare la Piattaforma Pilota e renderla maggiormente flessibile per l'esecuzione di nuove sperimentazioni. In particolare per interventi relativi all'integrazione del sistema di controllo, al sistema campionamento e analisi syngas, all'adeguamento della sala controllo, all'installazione di un comando di emergenza, alla valutazione del rischio esplosione, al completamento dell'impianto antincendio, dell'impianto di terra con misure di tensione di passo e di contatto. Si è poi provveduto alla realizzazione dell'impianto di stoccaggio temporaneo reflui, alla modifica e al completamento del sistema adduzione acque con opere civili quali basamenti vasca e tubazioni. Al fine di consentire la sperimentazione della gassificazione con miscele di ossigeno e  $\text{CO}_2$ , è stato realizzato un sistema di miscelazione che consente di ottenere la miscela gassificante nelle composizioni desiderate. Il sistema, in particolare, comprende un miscelatore, regolato mediante PLC, alimentato



da pacchi bombole di ossigeno e di CO<sub>2</sub>. I gas, dopo una prima riduzione di pressione (fino a 10 bar), vengono miscelati e inviati a un serbatoio polmone da 270 litri. A valle del serbatoio polmone, la miscela viene inviata alla linea di alimentazione gas al gassificatore. Il sistema è controllato manualmente e una serie di valvole manuali consente, una volta avviato il gassificatore con aria, di chiudere questa e inviare la miscela di ossigeno e CO<sub>2</sub>.



**Figura 38. Dettaglio del miscelatore di O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> e del gassificatore presso Sotacarbo**

L'agente ossidante (aria nella fase di avviamento e stabilizzazione e poi la miscela di ossigeno e CO<sub>2</sub> nelle fasi successive) può essere immesso nel gassificatore sia dal di sotto della griglia di sostegno del letto, sia dalle lampade di accensione (una piccola portata di aria o miscela deve essere sempre mantenuta attraverso le lampade per limitarne la temperatura). Nel corso delle sperimentazioni in oggetto, l'agente ossidante è sempre stato inviato solamente attraverso le lampade di accensione. Inoltre, una portata variabile di vapore è stata immessa nel reattore da sotto la griglia.

Il gassificatore sperimentale utilizzato è a letto fisso up-draft, della potenzialità nominale di 200 kW termici (circa 35 kg/h di carbone). Tale potenzialità risulta essere attualmente limitata a circa 6 kg/h per via della limitazione nello scarico delle ceneri operata dalla griglia. Nonostante questo problema, i numerosi test sperimentali precedentemente condotti nell'impianto hanno dimostrato che il reattore ha funzionato in regime di gassificazione.

All'uscita del gassificatore, il syngas viene inviato a uno scrubber nel quale si effettua il lavaggio e il raffreddamento e, a valle dello stesso scrubber, sono stati effettuati i campionamenti per l'analisi della composizione del syngas. Le analisi vengono effettuate in linea mediante un micro gascromatografo Agilent 3000 dotato di due moduli GC incorporati, ognuno composto da iniettore, colonna, valvole di controllo del flusso e rilevatore a conducibilità termica, e da una bombola di gas interna, contenente il gas di trasporto (elio ed argon). Il micro gascromatografo è controllato tramite un collegamento LAN standard direttamente da un computer. Il software Agilent 3000 gestisce tutte le impostazioni sperimentali, la raccolta e l'analisi dei dati. L'analizzatore utilizzato è dotato di due canali. Nel primo canale si trova una colonna capillare denominata MolSieve 5A, che ha la funzione di ottenere la determinazione di idrogeno, ossigeno, azoto, metano e ossido di carbonio. Il gas di trasporto in questo canale è l'argon. Il secondo canale prevede una colonna di tipo PoraplotQ, con il compito di rivelare aria, metano, biossido di carbonio, etilene, etano, acetilene, idrogeno solforato, solfuro di carbonile e propano; il gas di trasporto utilizzato è l'elio. A valle del campionamento, il syngas viene inviato a una torcia, per la combustione e l'immissione in atmosfera. La campagna sperimentale è stata realizzata per valutare la possibilità di utilizzare una miscela di CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> come agente gassificante nei processi di gassificazione: ciò permetterà di definire la composizione del syngas prodotto e di confrontarlo con quello derivante dalla gassificazione ad aria.

Le prove sono state utili in primo luogo per definire le procedure operative, partendo da condizioni iniziali semplificate, per poi successivamente inserire nel corso della sperimentazione nuovi parametri e variabili. Le prove sono essenzialmente articolate in fase di pre-avviamento; fase di accensione; fase di funzionamento; fase di spegnimento. I dati relativi alle prove di seguito riportati sono relativi agli andamenti di parametri caratteristici. L'elaborazione dei dati ed il confronto con prove sperimentali di gassificazione ad aria sarà oggetto della attività successive a completamento degli obiettivi realizzativi.



Le fasi di pre-avviamento e accensione del gassificatore, nonché la fase di spegnimento sono state effettuate secondo le procedure già impiegate per la gassificazione con aria. Durante la fase di funzionamento, a seguito della stabilizzazione dei parametri, si è proceduto sostituendo all'aria come agente gassificante la miscela di O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, con tenore di O<sub>2</sub> nella miscela pari al 21%. Le prime prove hanno consentito di verificare gli effetti della miscela ossidante sulle prestazioni del reattore (principalmente temperatura di processo e composizione del syngas).

Il caricamento effettuato con carbone sud-africano avente un PCI sul tal quale pari a 24,79 MJ/kg e la composizione riportata nella tabella a lato.

Diversi sono i parametri funzionali rilevati durante le prove, dalle temperature operative nelle principali linee di ingresso/uscita prodotti e nell'interno del reattore di gassificazione, a portate, pressioni e composizione del syngas.

Si riportano di seguito degli andamenti caratteristici osservati durante le sperimentazioni per i valori di temperatura all'interno del gassificatore e quelli di concentrazione di alcuni elementi nel gas di sintesi. Durante la fase di accensione del gassificatore le temperature hanno presentato un incremento più rapido nella parte più bassa del gassificatore stesso. Questo andamento può essere spiegato osservando che inizialmente la carica di accensione occupava esclusivamente la parte inferiore del gassificatore. Successivamente si è rilevato che la temperatura subisce un decremento in occasione dei successivi caricamenti del carbone. Le temperature vanno poi via via stabilizzandosi con la formazione della tipica curva a naso con temperature più elevate nella zona sopragriglia e via via decrescenti con l'altezza verso l'uscita del gassificatore.

In genere i valori delle temperature della zona bassa del letto del gassificatore si attestano tutti a valori più elevati rispetto al caso della gassificazione con aria; ciò è dovuto a un maggiore apporto di vapore, che ha permesso di mantenere i valori comunque sotto i 1000 °C. Ulteriori incrementi della concentrazione di O<sub>2</sub> (30% e 40%) nella miscela alimentata al gassificatore sono stati bilanciati da un aumento della portata di vapore al gassificatore tale da mantenere pressoché costante la temperatura massima al gassificatore. Nella fase di spegnimento del reattore, le temperature sono state ridotte con l'immissione di una corrente di azoto che ha anche il compito di inertizzare l'impianto.

| Analisi elementare | %     |
|--------------------|-------|
| umidità            | 8-10  |
| carbonio           | 65-68 |
| ceneri             | 14-15 |
| zolfo              | 0,75  |
| idrogeno           | 3,5   |
| azoto              | 1,3   |
| ossigeno           | 5,35  |
| cloro              | 0,05  |

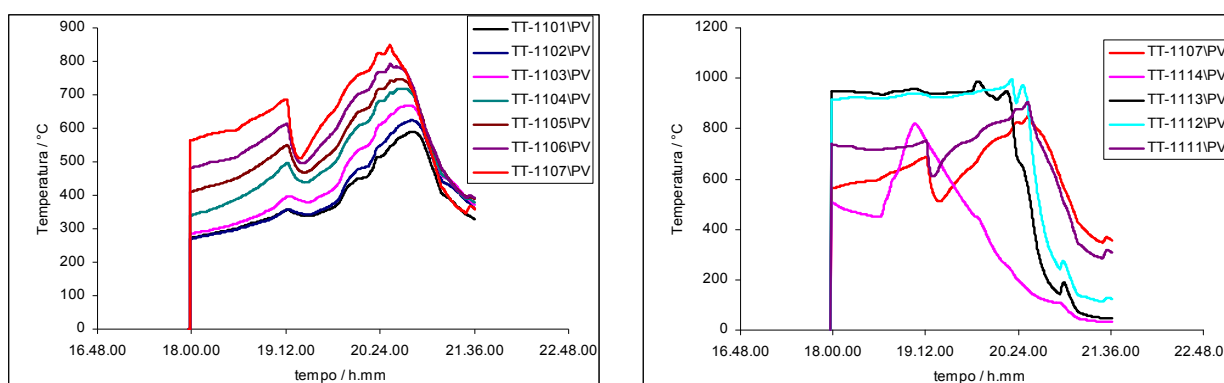


Figura 39. Andamento delle temperature nel gassificatore

In Figura 40 sono riportati i valori di concentrazione di CO<sub>2</sub> e CO. E' evidente una prima fase di gassificazione con aria in cui le concentrazioni di CO<sub>2</sub> e CO sono mediamente pari a 10-15%. Nella fase successiva, per quanto riguarda la CO<sub>2</sub>, si nota un andamento crescente fino ad un massimo in cui si è registrato un valore pari a circa il 70%. Infine si nota un costante decremento della CO<sub>2</sub> accompagnato da un costante aumento della CO. L'andamento della concentrazione dell'idrogeno (Figura 40), inizialmente crescente (con gassificazione ad aria e vapore in corso), successivamente decresce a causa dell'inserimento della miscela di CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> e della chiusura del vapore inviato al gassificatore. Si nota infine un crescita dovuta all'aumento del tenore di ossigeno nella miscela.

L'elaborazione dei dati sperimentali e il tuning dei modelli di simulazione prosegue nel secondo anno.

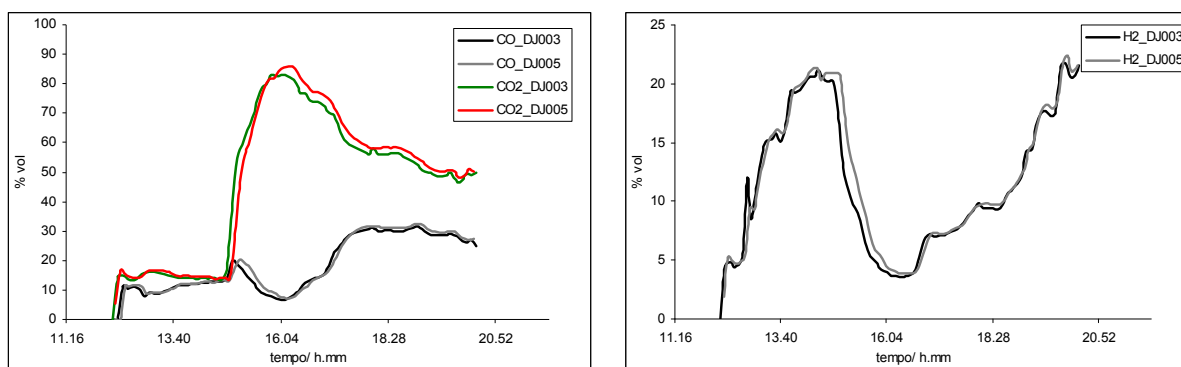


Figura 40. Esempio di andamento della concentrazione di CO/CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> in funzione del tempo

### Studio e sperimentazione di diversi sorbenti per la desolforazione a caldo

Dopo il grande utilizzo a partire dalla rivoluzione industriale e il grande boom dell'era del petrolio, che ha portato il carbone ad un ruolo di secondo piano nel panorama delle fonti energetiche, negli ultimi anni l'interesse che il carbone sta suscitando è fortemente aumentato nuovamente, soprattutto a causa della scarsità di petrolio, come fonte energetica primaria di transizione durante lo sviluppo di tecnologie che permettano l'utilizzo di energie rinnovabili, e dunque si ritiene che il carbone possa avere nel presente un ruolo importante nel soddisfare il fabbisogno energetico di un mondo in continua espansione. Per queste ragioni si sono sviluppati e si stanno perfezionando numerosi processi di conversione del carbone in energia, fra i quali ricoprono un ruolo di primo piano i sistemi di gassificazione. In questi processi la materia prima viene gassificata ed il gas ottenuto viene depurato ed utilizzato per la produzione di energia diretta o utilizzato per la produzione di vettori energetici ad alto valore, come ad esempio l'idrogeno. Uno degli ostacoli maggiori allo sviluppo su scala commerciale di questa tecnologia è rappresentato dalle elevate esigenze di rimozione dal gas di sintesi dei contaminanti presenti. Si tratta di tutti quei composti che possono creare gravi danni ai processi a valle della gassificazione o che possono essere considerati dannosi per l'ambiente e la cui emissione è limitata per legge. Oggi è disponibile un gran numero di processi di depurazione: quelli tradizionali richiedono un raffreddamento del gas, seguito poi da un successivo riscaldamento che finiscono però per ridurre in modo significativo l'efficienza complessiva del processo. Lo sviluppo di processi di depurazione ad alta temperatura è un passo chiave per incrementare l'efficienza energetica del processo di gassificazione e contenere i costi dei prodotti finali. Il lavoro svolto si è focalizzato sulla rimozione dei composti dello zolfo, soprattutto del solfuro di idrogeno, che deve essere ridotto a concentrazioni di poche ppm, sia per non danneggiare alcune parti dell'impianto che per ridurre l'impatto ambientale una volta che il solfuro di idrogeno si trasforma in SO<sub>2</sub>. È più economico, infatti, eliminare H<sub>2</sub>S dal gas di sintesi che SO<sub>2</sub> dai prodotti della combustione.

La tecnologia della desolforazione ad alta temperatura è ancora recente ed i risultati ottenuti dipendono in larga misura dagli adsorbenti utilizzati. Attualmente la ricerca si indirizza verso lo studio di materiali capaci di resistere a cicli di desolforazione e rigenerazione e contemporaneamente di ridurre la concentrazione di H<sub>2</sub>S a livelli molto bassi.

Il processo di gassificazione del carbone realizza la conversione dei composti organici in gas di sintesi, attraverso lo sviluppo di reazioni chimiche con ossigeno e vapore d'acqua. Il gas di sintesi così prodotto è costituito da una miscela contenente principalmente CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e, nel caso di gassificazione con aria, N<sub>2</sub>, nonché piccole quantità di altri elementi perlopiù indesiderati come H<sub>2</sub>S, COS, NH<sub>3</sub>, HCl, TAR, polveri, ecc.

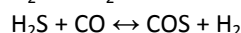
Uno schema cinetico lumped della gassificazione è il seguente:

|                                    |                                          |
|------------------------------------|------------------------------------------|
| $C + O_2 \rightarrow CO_2$         | Combustione (reazione esotermica)        |
| $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$        | Combustione (reazione esotermica)        |
| $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$    | Gassificazione (reazione endotermica)    |
| $C + CO_2 \rightarrow 2CO$         | Gassificazione (reazione endotermica)    |
| $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$        | Idrogassificazione (reazione esotermica) |
| $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ | Shift Conversion (reazione esotermica)   |

Il carbone dunque, alimentato al gassificatore insieme ad ossigeno (eventualmente contenuto in una corrente di aria) e vapore d'acqua, subisce inizialmente una fase di riscaldamento, durante la quale libera dapprima l'acqua ed i composti gassosi volatili; successivamente, all'aumentare della temperatura, le strutture molecolari del carbone

vengono spezzate dando origine alla formazione di idrocarburi pesanti (TAR) e di un residuo costituito in pratica da carbonio puro (char), il quale partecipa al processo di gassificazione propriamente detto secondo lo schema cinetico sopra riportato.

I processi nei quali vengono impiegati combustibili ad elevato contenuto di zolfo conducono necessariamente alla produzione di un gas di sintesi grezzo ricco di composti solforati. Fra questi, il solfuro di idrogeno ( $H_2S$ ) ed il solfuro di carbonile (COS) sono tra i più importanti prodotti indesiderati. Infatti le reazioni di gassificazione si sviluppano in atmosfera riducente, cosicché, contrariamente a quanto accade in un processo di combustione, lo zolfo presente nel combustibile si converte nei suoi composti ridotti. In particolare, l' $H_2S$  si forma attraverso reazioni eterogenee gas/solido a partire dallo zolfo metallico contenuto nel carbone, e, in seguito, le reazioni si sviluppano anche in fase gassosa portando alla formazione di COS secondo lo schema cinetico:



A parità di tecnologie di gassificazione e di condizioni operative, la concentrazione di tali prodotti indesiderati risulta direttamente proporzionale al tenore di zolfo nel combustibile primario.

Come sopra accennato, il gas di sintesi così prodotto, è costituito da una miscela contenente principalmente  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$  e diverse specie chimiche indesiderate. Tali impurità devono essere rimosse nella sezione di trattamento al fine di evitare l'immissione di inquinanti in atmosfera ed il danneggiamento delle apparecchiature attraversate dal gas di sintesi.

La depurazione ad alta temperatura si propone come valida ed attraente alternativa al tradizionale processo di depurazione per via umida. Il procedimento consiste nella rimozione del particolato e nella desolforazione a condizioni di temperatura e pressione che corrispondono all'uscita del gassificatore e/o all'entrata del successivo processo di utilizzazione del syngas.

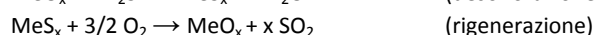
L'interesse che suscita si giustifica con l'aumento dell'efficienza globale del processo, dal momento che riduce o elimina la necessità di raffreddamento del gas proveniente dalla gassificazione. Oltre ad i vantaggi energetici, si semplifica l'impianto, eliminando la necessità degli scambiatori di calore e del trattamento dei condensati. La desolforazione ad alta temperatura è basata sull'adsorbimento su composti solidi, prevalentemente ossidi metallici, data la loro affinità con  $H_2S$  e la capacità di formare solfuri stabili. Tali ossidi costituiscono l'elemento attivo degli adsorbenti solidi: durante il processo di desolforazione, in condizioni riducenti, questi solidi adsorbono il solfuro di idrogeno e gli ossidi si convertono in solfuri metallici. Gli adsorbenti utilizzati possono essere classificati differenziandoli in rigenerabili e non rigenerabili:

- adsorbenti non rigenerabili: contengono metalli alcalini (Ca, Ba, Sr) e vengono introdotti direttamente nel gassificatore a temperature di 1073-1273 K per realizzare la cosiddetta "desolforazione in situ". Tipici adsorbenti non rigenerabili sono il calcare e la dolomite;
- adsorbenti rigenerabili: contengono metalli di transizione (Fe, Zn, Mn, Cu, Ni, ecc.) e vengono in contatto con il gas in un letto esterno al gassificatore. Adsorbenti di questo tipo possono essere basati su ossidi singoli, combinazione di ossidi differenti, combinazioni di ossido e inerte.

Oggi si preferiscono gli adsorbenti del secondo gruppo per la possibilità che offrono di essere rigenerati e ridurre in questo modo i rifiuti solidi prodotti, che altrimenti andrebbero trattati e poi smaltiti. Lo studio e l'applicazione sulla desolforazione proposto in questo lavoro ha riguardato ossidi metallici rigenerabili. Il ciclo di desolforazione di un adsorbente metallico rigenerabile è composto da due fasi cicliche: la desolforazione propriamente detta e la successiva rigenerazione, con aria, ossigeno o vapore, per recuperare la capacità di adsorbimento e riportare il metallo allo stato di ossidazione originale.

Entrambe le reazioni, di desolforazione e rigenerazione del solido risultante, sono non catalitiche, dal momento che il solido prende parte alla reazione e le sue caratteristiche vengono modificate, in modo variabile secondo la composizione del gas.

Queste reazioni si possono rappresentare in forma generale con le seguenti equazioni, dove con Me si intende il generico elemento metallico:



La prima reazione può essere vista come una reazione di riduzione del metallo con trasformazione in solfato. L'elemento metallico dovrebbe essere stabile in ambiente riducente, ovvero la riduzione di  $MeO$  a  $MeS_x$  dovrebbe essere lenta e termodinamicamente sfavorevole, dal momento che ne provoca la volatilizzazione con conseguente perdita di materiale adsorbente e collasso della struttura del solido. Una reazione indesiderata che spesso accompagna la reazione di rigenerazione è quella di formazione del solfato metallico:



Il solfato di metallo è inerte rispetto all' $\text{H}_2\text{S}$  e la sua formazione costituisce una perdita di materiale attivo.

### Screening dei sorbenti

Lo studio degli adsorbenti per la desolforazione a caldo dei gas è stato portato avanti da oltre venti anni da numerosissimi gruppi di ricerca, perciò le conclusioni raggiunte sono molto diverse ed a volte in contrasto fra loro. Per selezionare un gruppo di adsorbenti idonei ad essere applicati nel processo in oggetto, è necessario vagliare le informazioni disponibili in letteratura tenendo conto dei seguenti discriminanti:

- origine del gas da sottoporre a trattamento;
- Intervallo di temperatura di reazione;
- Intervallo di pressione.

Per quanto riguarda le condizioni di temperatura alle quali si svolge la reazione, esistono almeno due differenti opinioni: secondo una scuola di pensiero, si ritiene che la desolforazione a temperature elevate (fra 500 e 700 °C) sia più efficiente, mentre l'altra considera temperature di processo più moderate (350 - 550 °C). Negli anni passati, infatti, diversi studi sono stati svolti con particolare attenzione sull'uso, nella desolforazione a caldo di correnti gassose, di ossidi metallici a temperature al di sopra di 600 °C, in relazione al fatto che il trattamento ad alte temperature apporta un beneficio in termini di efficienza termica del ciclo globale. Tuttavia pochi ossidi metallici sono capaci di ridurre al di sotto dei limiti richiesti il contenuto di  $\text{H}_2\text{S}$  nel fuel gas, quando si operi in condizioni di alta temperatura per lunghi periodi di tempo. Come risultato, la scelta era basata su un numero limitato di ossidi metallici, e dettata, come prima ribadito, principalmente da considerazioni di equilibrio termodinamico.

Recentemente si è volta l'attenzione anche verso temperature inferiori, poiché si è dimostrato che le perdite in efficienza termica incontrate riducendo la temperatura operativa nel range 350-550 °C, sono relativamente piccole. Aumentando il possibile intervallo termico di lavoro, si può, di conseguenza, effettuare una scelta più ampia tra un maggiore numero di sorbenti. Le caratteristiche di alcuni ossidi metallici usati per la desolforazione di gas caldi sono riportate in Tabella 2.

**Tabella 2. Caratteristiche di materiali adsorbenti (ossidi metallici)**

| Materiale sorbente | T solforazione [°C] | T rigenerazione [°C] | Sorbente utilizzato [%] | $\text{H}_2\text{S}$ in uscita [ppmv] |
|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| ossido di ferro    | 360-500             | 500-650              | 25-45                   | <100                                  |
| ossido di zinco    | 480-540             | 500-700              | 50-70                   | <1                                    |
| ossido di stagno   | 380-500             | 450-500              | 85                      | <100                                  |
| zinco ferrite      | 450-600             | 600                  | 20-80                   | <20                                   |
| zinco titanato     | 450-750             | 600-750              | 40-60                   | <10                                   |
| ossido di cerio    | 750-1000            | 600                  | 90                      | <100                                  |

Le principali caratteristiche richieste ad un sorbente metallico preposto alla desolforazione a caldo, è che esso dovrebbe selettivamente reagire con  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{COS}$ , in ambiente riducente e sotto determinate condizioni, quali:

- equilibrio termodinamico favorevole, tale da garantire una efficienza di rimozione  $\eta=0,99$  nel range di temperatura  $T=350-650$  °C;
- minimizzazione delle reazioni indesiderate, come ad esempio interazioni con  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ;
- possibile e facile conversione del solfuro metallico (prodotto durante la desolforazione della corrente gas) ad ossido piuttosto che a solfato, durante la rigenerazione;
- stabilità meccanica e chimica del sorbente, tale da garantire una perdita minima durante i ripetuti cicli di solforazione-rigenerazione.

Le proprietà fisiche e meccaniche del sorbente, come dimensioni, superficie di interfaccia gas/solido, resistenza a rottura, sono dettate dalla tipologia di reattore usato per la fase di solforazione e quella di rigenerazione. Anche la stabilità chimica dell'ossido metallico, la sua reattività rispetto ad  $\text{H}_2\text{S}$  ed il suo andamento con la temperatura, sono da considerarsi parametri di notevole importanza. L'innalzamento della reattività del sorbente può essere ottenuto mediante uso di particelle caratterizzate da dimensioni minori, con alta porosità e grandi superfici interfacciali.

Tuttavia, la resistenza al deterioramento e la resistenza alla rottura sono, per loro definizione, parametri il cui valore varia in maniera inversamente proporzionale alla porosità ed all'area interfacciale. È perciò necessario determinare dei parametri per una scelta di compromesso.

Le proprietà caratterizzanti del sorbente sono: dimensione e forma; capacità di adsorbimento per  $H_2S$  e  $COS$ ; massimo numero di cicli di solforazione/rigenerazione sostenibili; massima temperatura a cui è possibile effettuare la rigenerazione; costo.

A seguito delle considerazioni fatte finora, gli adsorbenti ritenuti presi in considerazione in questo lavoro sono:

- ossido di ferro;
- ossido di zinco;
- ossido di stagno;
- zinco-ferrite;
- titanato di zinco;
- ossido di cerio.

In generale, per la realizzazione di una sezione di trattamento a caldo riguardo la desolforazione di correnti gassose, sono necessari due reattori, che possono operare con configurazione in parallelo o in serie. Le tipologie di reattore possibili in cui possono essere effettuati i cicli di solforazione e rigenerazione di un sorbente, possono essere catalogate in tipologie distinte :

- Reattori a letto fisso (fixed bed reactors FBR);
- Reattori a letto mobile (moving bed reactors MBR);
- Reattori a letto fluido bollente (bubbling fluidised bed reactors BFBR);
- Reattori a letto trascinato o circolante (circulating fluidised bed reactors CFBR).

La scelta sulla tipologia di reattore, dipende principalmente dalla composizione del gas di sintesi e dalle condizioni operative richieste dal processo globale in cui la sezione di desolforazione è inserita. Inoltre, la progettazione del reattore influenza esso stesso le proprietà meccaniche e fisiche richieste per il sorbente, e quindi il tipo di sorbente. Le principali caratteristiche che contraddistinguono le diverse tecnologie sopra citate ed le caratteristiche del sorbente richieste da ciascuna di esse per una buona operatività, sono riportati di seguito.

| Reattore                                | FBR           | MBR           | BFBR            | CFBR            |
|-----------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| <i>Progetto dell'apparecchiatura</i>    |               |               |                 |                 |
| Dimensioni                              | grandi        | medie         | medie           | piccole         |
| Funzionamento                           | intermittente | continuo      | continuo        | continuo        |
| Affidabilità                            | media         | media         | alta            | alta            |
| Perdite di carico                       | alte          | alte/medie    | medie           | basse           |
| Velocità di trasporto massico e termico | media         | media         | alta            | molto alta      |
| Sistema di trasporto solidi             | nessuno       | convogliatore | pneumatico      | pneumatico      |
| Potenza ausiliaria richiesta            | media         | bassa         | alta            | alta            |
| <i>Proprietà del materiale sorbente</i> |               |               |                 |                 |
| Dimensioni delle particelle             | 3-6 mm        | 3-6 mm        | 100-300 $\mu m$ | 100-300 $\mu m$ |
| Tempo di ritenzione                     | ore           | ore           | minuti          | secondi         |
| Velocità di deterioramento fisico       | bassa         | media         | alta            | alta            |
| Costo del materiale sorbente            | alto          | alto          | basso           | Basso           |
|                                         |               |               |                 |                 |
| <i>Studi</i>                            | MHI           | GE            | IHI             | MW Kellogg      |

Nell'arrangiamento impiantistico che riguarda i reattori usati per la desolforazione e la rigenerazione del sorbente, sono tipicamente adottate tecnologie dello stesso tipo, dimensione e materiale di costruzione, mentre può esistere differenza tra le condizioni operative scelte per ognuno dei due processi. Tuttavia, poiché i reattori a letto fluido bollente ed a letto fluido circolante richiedono particelle di simili dimensioni, c'è una tendenza allo sviluppo di sistemi ibridi che permettano di ottenere i vantaggi di un adsorbitore a letto bollente insieme a quelli di un rigeneratore a letto fluido circolante.

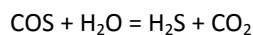
### Modellistica di assorbimento

A valle di un primo screening dei materiali e delle tecnologie utilizzate le attività si sono concentrate nell'elaborazione di un modello matematico capace di descrivere la fase della desolforazione impiegando un reattore di tipologia a letto fisso e a letto mobile, utilizzando diversi tipi di sorbenti.

In prima istanza si è dunque proceduto allo studio teorico e particolareggiato degli aspetti termodinamici inerenti la desolforazione per l'ottenimento di uno strumento matematico accurato, che è stato utilizzato nel prosieguo dell'attività per la stesura di un modello di struttura più semplice, adatto all'implementazione su software. I risultati numerici derivanti dall'implementazione hanno consentito di effettuare interessanti considerazioni circa i parametri di progettazione di un reattore in "bench scale" e di effettuare delle previsioni sulle performances di un reattore di desolforazione a caldo realizzato nella Piattaforma Pilota del centro Ricerche Sotacarbo, a Carbonia.

### Reazioni chimiche della desolforazione

Il gas in arrivo alla sezione di desolforazione, proveniente da un gassificatore alimentato a carbone, è essenzialmente composto da CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, COS, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O presenti in diverse proporzioni secondo il tipo di carbone impiegato ed il tipo di processo di gassificazione utilizzato. La presenza di H<sub>2</sub>S è accompagnata da altri composti solforati, come COS, che si presentano in quantità molto minore rispetto all'H<sub>2</sub>S. In presenza di H<sub>2</sub>O essi vengono idrolizzati, in quanto il sorbente presente nel desolforatore (perlopiù ossido metallico) ha un effetto catalitico, per cui



La reazione di desolforazione avviene in un'atmosfera riducente, in cui il sorbente reagisce con H<sub>2</sub>S ed il prodotto di reazione è un solido di zolfo. In generale può essere schematizzata come:



Il processo può esser considerato, in prima approssimazione, complessivamente isoterma, indipendentemente dalla tonalità termica della reazione, in quanto la concentrazione di H<sub>2</sub>S è da considerarsi estremamente bassa. In genere questa tipologia di reazione, nella reattoristica chimica, viene considerata come irreversibile. Poiché nel caso specifico si ha a che fare con concentrazioni molto basse di H<sub>2</sub>S nella corrente del syngas, non si può prescindere dall'eventuale reversibilità della reazione.

### Modelli cinetici

La desolforazione ad alta temperatura, utilizzando un sorbente solido, avviene tramite una reazione tra gas e solido, in cui il gas viene in contatto con il sorbente, reagisce con esso e lo trasforma nei prodotti di reazione. Nella reattoristica chimica che riguarda le reazioni eterogenee non catalitiche vengono in genere prese in esame reazioni di tipo irreversibile. Poiché in questo caso si ha a che fare con concentrazioni molto basse dell'H<sub>2</sub>S (pochi ppm) del gas purificato non si può prescindere dalla eventuale reversibilità della reazione. In generale l'espressione cinetica per una reazione eterogenea ingloba più di uno stadio: si deve tener conto infatti sia dei processi di trasporto fisico da una fase all'altra (trasferimento di materia tra le fasi), sia della reazione chimica. Nel processo di desolforazione, il solido (sorbente) normalmente non subisce modifiche di forma. Il comportamento di una particella solida viene riportato nella Figura a lato.



Il modello con cui si descrive il processo deve predire soddisfacentemente il comportamento reale e nello stesso tempo deve dar luogo ad una espressione matematica della cinetica il più possibile semplice, in modo da essere facilmente elaborabile numericamente ed implementabile su software.

In seguito vengono presi in esame due modelli ideali per descrivere la cinetica della desolforazione. I modelli sono:

- modello a cuore non convertito;
- modello a zona intermedia.

La cinetica di tali modelli è stata sviluppata sulle seguenti premesse:

- reazioni reversibili;

- particelle solide sferiche e cilindriche indefinite;
- condizioni stazionarie all'interno della particella rispetto al reagente gassoso;
- cinetica indipendente dalla concentrazione del solido e di primo ordine rispetto alla concentrazione del reagente gassoso;
- processo isoterma.

I modelli dinamici per la simulazione del processo di desolfurazione sono applicati a due tipi di configurazione di processo:

- reattore a letto fisso;
- reattore a letto mobile.

La base per la descrizione matematica della cinetica viene individuata nel modello a cuore non convertito e nel modello a zona intermedia. Le espressioni matematiche per ogni configurazione consistono di set di equazioni differenziali che richiedono una risoluzione numerica. Sono stati sviluppati quattro modelli matematici per ogni configurazione riferendo ai seguenti modelli:

- Modello a cuore non convertito:
  - per particelle sferiche;
  - per particelle cilindriche.
- Modello a zona intermedia:
  - per particelle sferiche;
  - per particelle cilindriche.

Questa sezione focalizza la sua attenzione su alcuni aspetti progettuali e operativi relativi al processo di desolfurazione a caldo, fornendo indicazioni particolarmente interessanti per la scelta e il dimensionamento di tali sezioni in piccoli impianti commerciali. In questo ambito è stata perciò affrontata la problematica generale della variazione di scala (scale-up) nella progettazione delle apparecchiature, ed alcune problematiche riguardanti la messa in opera di apparecchiature chimiche nella piccola scala di laboratorio.

Sulla base delle considerazioni di cui sopra, è stata affrontata la stesura di un semplice modello matematico relativo ad un reattore a letto fisso per la rimozione a caldo dell' $\text{H}_2\text{S}$  ed è stata curata la generazione di un programma di calcolo e la sua implementazione su software, con l'elaborazione dei risultati numerici ottenuti. Nel modello si è fatto riferimento in modo specifico, come sorbente, al ferrito di zinco. Nel modello si è supposto che la fluidodinamica del reattore fosse di tipo flusso a pistone. Il reattore è assunto non adiabatico e non isoterma. È stato inoltre adottato il modello cinetico del nucleo non reagente, relativo a particelle di forma cilindrica. Dei tre stadi principali che costituiscono il modello cinetico, si è trascurato quello riguardante la reazione chimica, mantenendo quindi soltanto la diffusione esterna e la diffusione interna. Questa scelta non è derivata da considerazioni teoriche, ma è stata dettata esclusivamente dall'indisponibilità di dati sperimentali e teorici. Si è infine tenuto conto della variazione della porosità della particella per effetto della reazione chimica.

Con piccole modifiche nel programma sorgente e qualche variazione sui dati, il programma di calcolo è stato utilizzato per ottenere dei dati di previsione sulle prestazioni del reattore a letto fisso di desolfurazione a caldo dell'impianto in scala da laboratorio Sotacarbo. Il modello realizzato andrà valutato con la raccolta dei dati sperimentali durante la fase di sperimentazione condotta sull'Impianto Laboratorio del centro Ricerche Sotacarbo.

Nel corso della stesura del modello di calcolo per la definizione dei parametri di progetto di un reattore di desolfurazione "bench-scale", sono state evidenziate una serie di problematiche riguardanti lo scale-up dell'impianto, emerse dall'osservazione che un reattore di piccola taglia ha dimensioni molto ridotte rispetto a quelle usualmente caratteristiche della maggior parte degli schemi di progettazione.

È, infatti, lecito domandarsi se i consueti schemi di progettazione possono essere considerati validi anche per apparecchiature di piccole dimensioni, oppure se l'effetto di scala su alcuni parametri può rendere inutilizzabile il procedimento di calcolo.

Pare importante premettere che, almeno dal punto di vista teorico è sempre possibile eseguire la trasposizione dei dati (anche quelli di progettazione) ad una scala diversa da quella utilizzata per determinarli (o calcolarli). È ormai acquisito che qualunque fenomeno può essere studiato in scala opportuna senza che per questo i risultati ottenuti possano perdere validità. In conformità a questa convinzione sono state proposte e messe a punto diverse metodologie che permettono di utilizzare i dati ottenuti in una opportuna scala per prevedere il comportamento delle apparecchiature (e quindi anche per progettarle) in una scala differente.



Un sistema molto ben conosciuto consiste nel conglobare i parametri che caratterizzano il fenomeno in gruppi adimensionali e di scrivere quindi le relazioni trovate sperimentalmente facendo uso di questi termini. Le potenzialità di questa tecnica sono notevoli e largamente sperimentate.

Talvolta si ricorre invece a tecniche più semplici, che consistono nell'utilizzare per la progettazione, insieme alle equazioni di bilancio di materia e di energia, delle equazioni di progetto che hanno validità in un ampio intervallo di variazione delle variabili indipendenti. Questi parametri possono quindi essere utilizzati sia per la piccola, sia per la più grande scala.

Malgrado queste tecniche siano di ampio uso e forniscano di solito risultati molto corretti, possono tuttavia verificarsi dei problemi quando esse sono applicate ad una scala molto ridotta. Nella maggior parte dei casi si tratta di problemi dovuti al fatto che le equazioni utilizzate per descrivere il fenomeno hanno un campo di validità limitato e si pretende di utilizzarle al di fuori di questo intervallo. A questi problemi, una volta individuati, si può porre rimedio, spesso anche con facilità. Altre volte invece i problemi nascono dalla difficoltà che si incontra nel riprodurre il fenomeno in studio quando le dimensioni delle apparecchiature sono ridotte, come ad esempio l'influenza del contorno (effetto di bordo), il cui effetto è maggiore quando le dimensioni sono piccole. Un altro caso tipico è quello in cui nell'apparecchiatura sono presenti alcune parti le cui dimensioni non possono scendere al di sotto di certi valori.

Nei reattori a letto fisso, le particelle sono ammassate in modo da costituire un letto che, nelle intenzioni del progettista, dovrebbe avere caratteristiche fisiche omogenee in tutto il suo volume. Questa omogeneità viene meno in corrispondenza delle pareti del reattore (effetto di bordo) ed è tanto rilevante quanto più aumenta il rapporto fra la dimensione della particella e il diametro del reattore. Se la disomogeneità è elevata, la parte del letto che è più vicina alla parete del reattore presenta un grado di vuoto più elevato che nella parte restante e può quindi essere sede di cammini preferenziali. La presenza di questi cammini può rendere il comportamento del reattore non più paragonabile a quello che era stato ipotizzato in sede progettuale. L'esistenza di questi cammini preferenziali può essere visualizzata mediante uno studio della fluidodinamica dell'apparecchiatura. La presenza di questi cammini preferenziali è naturalmente più ampia ed ha effetti più importanti quando il rapporto fra la dimensione caratteristica delle particelle di catalizzatore e il diametro del reattore è più basso. Nel caso specifico dei reattori da laboratorio possono sussistere delle condizioni che impediscono di modificare la dimensione dei pellets in modo da rispettare i rapporti minimi usualmente adottati. Le particelle che costituiscono il letto sono, infatti, commercializzate con dimensioni standardizzate e appare quindi difficile, quando non impossibile, scendere al di sotto di esse.

Un altro aspetto importante relativo alla fluidodinamica del letto riguarda l'assunzione, adottata molto di frequente per la progettazione tramite l'uso di modelli di calcolo, di comportamento plug-flow. Questa assunzione può essere considerata accettabile con molta difficoltà, quando il diametro del letto è grande oppure, in generale, quando il rapporto fra l'altezza e il diametro del letto è molto basso. In un reattore di alta potenzialità, e quindi di diametro elevato, si può ovviare a questo problema suddividendo la sezione in diverse sezioni più piccole. Il modo più semplice per realizzare questo obiettivo consiste nell'utilizzare, al posto di un unico cilindro di più grande diametro, diversi cilindri di più piccolo diametro, disposti in parallelo.

Questa soluzione risulta ovviamente impraticabile quando, in reattori da laboratorio di piccola potenzialità, la sezione è tanto piccola da non poter essere suddivisa in tante sezioni da utilizzare in parallelo. Il limite inferiore al diametro di ciascun cilindro componente deve essere determinato tenendo conto delle considerazioni relative alla dimensione delle particelle costituenti il letto. Un altro problema di rilievo è costituito dallo scambio termico. Gran parte del calore di reazione viene scambiato attraverso la parete laterale del reattore. La superficie di questa parete, riferita all'unità di volume del reattore, aumenta con proporzionalità inversa al diametro. Ad esempio, facendo riferimento alla sola superficie laterale si può scrivere:

$$\frac{S}{V} = \frac{\pi DL}{\pi D^2 L / 4} = \frac{4}{D}$$

dove: S = superficie esterna di scambio termico [m<sup>2</sup>]  
V = volume del reattore, [m<sup>3</sup>]  
D = diametro del reattore, [m]  
L = altezza del letto, [m].

L'ovvia conseguenza di quanto detto è che la velocità di scambio del calore di reazione prodotto risulta più alta in reattori di piccole dimensioni. Nel caso dei reattori tubolari il problema può essere molto più critico per diverse ragioni. Innanzitutto è necessario tener presente che la temperatura all'interno dei reattori è generalmente alta e

sono quindi molto elevati anche i flussi termici scambiati. Inoltre nei reattori si verifica spesso il fatto che la conservazione del calore all'interno del reattore stesso è in molti casi condizione necessaria per la conduzione corretta del processo.

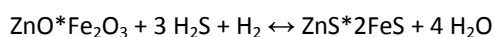
Negli impianti di taglia normale, una soluzione per ridurre la portata termica scambiata è fornita dalla coibentazione dell'apparecchiatura. Anche questo aspetto può però presentare delle criticità nei reattori di piccole dimensioni quando il diametro del reattore è molto piccolo. Può infatti capitare che il necessario spessore del coibente sia dello stesso ordine di grandezza del diametro del reattore. In casi estremi può anche capitare che la massima quantità di calore che si vorrebbe scambiare sia inferiore a quella minima ottenibile con quel diametro del reattore e con quel coibente. In questo caso, un aumento dello spessore della coibentazione avrebbe il solo effetto di innalzare la portata termica scambiata.

Sviluppo e implementazione del modello per la progettazione di un reattore "bench scale"

In prima istanza è stata necessaria la formulazione di alcune ipotesi circa il modello fisico di riferimento. Tali ipotesi hanno riguardato la scelta di un sorbente, la cinetica del processo, la tipologia assunta per il reattore di desolforazione, le condizioni operative.

Per ciò che riguarda il materiale sorbente, l'ipotesi formulata a tal proposito è che venga utilizzato un sorbente a base di ferrite di zinco, sia perché in letteratura è riportato come uno dei più efficienti, sia perché su di esso sono disponibili più informazioni.

Si suppone che fra il reagente gassoso e il reagente solido abbia luogo soltanto la seguente reazione:



Si è supposto inoltre che il reattore sia di forma cilindrica, e che la sezione in cui avviene la reazione sia costituita da un letto fisso di particelle, anch'esse cilindriche, la cui dimensione caratteristica è assunta pari a circa 3 mm.

Per il reattore si assume valido il modello fluidodinamico di flusso a pistone, senza considerare quindi il contributo della dispersione radiale e longitudinale. Ciascun parametro fisico e di trasporto è stato perciò assunto costante in ciascuna sezione.

Le perdite di carico nel letto sono state considerate trascurabili e quindi la pressione totale è stata considerata costante lungo tutto il reattore.

Inoltre, supponendo che il reagente gassoso entri nel reattore ad una temperatura elevata compresa fra 500 e 650 °C, costante nel tempo, e che il letto di solido si trovi inizialmente a temperatura ambiente, è stato ritenuto necessario descrivere il transitorio di temperatura. Si è considerato inoltre che il reattore scambi calore con l'ambiente esterno attraverso le pareti laterali, e che le temperature del solido e del gas circostante siano identiche.

Si è poi supposto di alimentare il reattore con syngas prodotto da gassificazione di carbone ad alto tenore di zolfo (carbone Sulcis, in particolare), avente composizione, temperatura e portata come da dati riportati nella tabella precedente:

Sotto le ipotesi precedenti, il modello matematico ha richiesto la scrittura di equazioni per esprimere il bilancio di entalpia ed i bilanci di materia per tutti i componenti reagenti presenti nella fase gassosa (H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O). Un ulteriore bilancio di materia è stato considerato per i restanti componenti presenti nel gas di sintesi, raggruppati in un'unica fase non reagente, che è stata perciò chiamata "inerte". Si è ottenuto in questo modo un set di cinque equazioni differenziali ordinarie, delle quali si riportano di seguito quelle inerenti al bilancio di materia dell'H<sub>2</sub>S e al bilancio entalpico.

| <b>Composizione del syngas da desolforare (frazione molare)</b> |        |
|-----------------------------------------------------------------|--------|
| CO                                                              | 0,2653 |
| CO <sub>2</sub>                                                 | 0,0528 |
| H <sub>2</sub>                                                  | 0,1138 |
| N <sub>2</sub>                                                  | 0,4560 |
| CH <sub>4</sub>                                                 | 0,0589 |
| H <sub>2</sub> S                                                | 0,0163 |
| COS                                                             | 0,0009 |
| H <sub>2</sub> O                                                | 0,0303 |
| Altri composti                                                  | 0,0057 |
| <b>Ingresso al reattore di desolforazione</b>                   |        |
| Portata massica di syngas [kg/h]                                | 20     |
| Portata molare di syngas [kmol/h]                               | 0818   |
| Temperatura di ingresso del syngas [°C]                         | 550    |

$$\frac{dN_{H_2S}}{dz} = -S\rho_s(1-\theta)R_{H_2S}$$

$$\frac{dH}{dz} = R_{H_2S}S\rho_s(1-\theta)(-\Delta H_r) - 2\pi R_s U(T - T_a) - S\rho_s(1-\theta)C_{sa} \frac{dT}{dt}$$

Il sistema di equazioni differenziali di cui si compone il modello è stato risolto utilizzando l'integrazione con il semplice metodo numerico di "Eulero Migliorato", reso iterativo. Il procedimento di calcolo viene per semplicità schematizzato per punti di seguito:

- si assume il profilo di  $X$ ,  $T$  e  $C$  al tempo zero per tutto il reattore;
- si assumono le condizioni all'ingresso del reattore;
- stima di  $X_{i,j+1}$  col metodo di Eulero;
- calcolo di  $X_{i,j+1}$  col metodo di Eulero Migliorato;
- calcolo di  $T_{i+1,j+1}$  col metodo di Eulero Migliorato;
- calcolo della concentrazione  $CH_2S_{i+1,j+1}$  e delle altre concentrazioni con Eulero;
- si itera il calcolo lungo tutto il reattore a partire dal punto 3;
- si itera il calcolo per l'intervallo temporale successivo a partire dal punto 2.

I dati risultanti dal programma di calcolo sono stati rielaborati e graficati al fine di dare delle informazioni sul processo e una indicazione di massima per la progettazione del reattore bench scale. Una breve discussione sui risultati ottenuti è esposta di seguito.

In Figura 41 si riporta il profilo di concentrazione dell' $H_2S$  (in termini di conversione) lungo l'asse del reattore, relativo a diversi tempi di esposizione (curve di breakthrough). I profili sono stati ottenuti ipotizzando che la temperatura in ingresso sia pari a  $550^\circ C$ . Nelle condizioni di progetto (diametro e altezza del letto) e operative (condizioni dell'alimentazione) ipotizzate in tal sede, il sistema può funzionare per non più di 6 ore prima che esso raggiunga la saturazione. È importante evidenziare la forte pendenza delle curve calcolate. Ciò potrebbe porre qualche problema per la gestione del reattore.

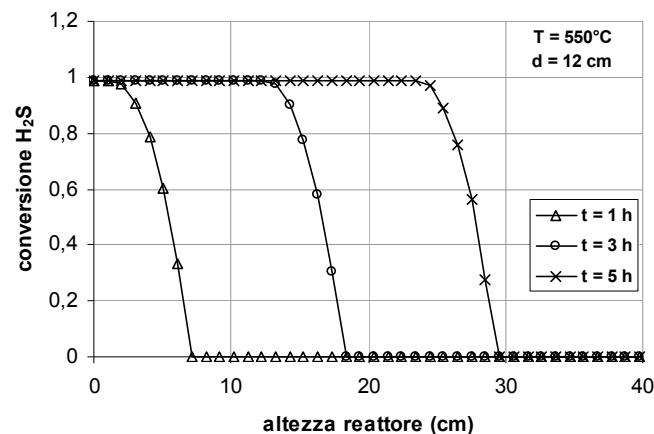


**Figura 41. Profilo di concentrazione dell' $H_2S$  lungo il reattore**

Appare evidente che, al diminuire del diametro, a causa della maggiore velocità del gas, si ottengono curve meno pendenti e da attribuirsi al fenomeno della dispersione dell' $H_2S$  lungo l'asse. Questo comporta che, in tal caso, la saturazione del sorbente sia raggiunta più velocemente (al di sotto delle 3 ore per un diametro di 7 cm) e quindi sia più elevato il numero di cicli di rigenerazione a cui dovrà essere sottoposto il sorbente. La minore pendenza delle curve ha inoltre la conseguenza di diminuire il grado di resa desolforante delle particelle del solido sorbente.

#### *Attività sperimentali sulla desolforazione a caldo*

Al fine di rispettare i tempi ed i costi previsti nell'accordo di collaborazione, oggetto delle attività di sperimentazione di seguito descritte, si è proceduto alla realizzazione di una sezione di desolforazione in laboratorio, modificando il programma iniziale che prevedeva l'impiego delle apparecchiature della piattaforma pilota del Centro Ricerche Sotacarbo mostrate in Figura 42.

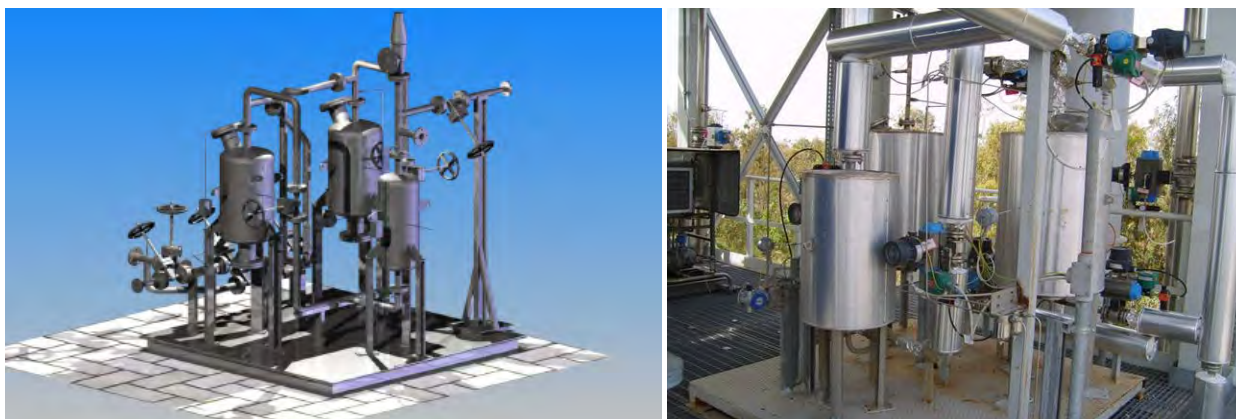


Figura 42. Skid di desolforazione a caldo sull'impianto piattaforma pilota presso Sotacarbo

La scelta è stata dettata principalmente dalla impossibilità di:

- utilizzare l'impianto sperimentale per via delle operazioni di collaudo attualmente in corso, che si sono protratte oltre i tempi previsti e che hanno comportato peraltro la necessità di interventi impiantistici per ottimizzarne la configurazione;
- effettuare, in questa fase, modifiche al desolforatore in impianto, per ridurre i tempi ed i costi di sperimentazione, che sarebbero andati ben oltre quelli previsti.

Ai fini dell'allestimento della sezione sperimentale, è stato equipaggiato il laboratorio di "Analisi gas" facente parte del Centro Ricerche Sotacarbo. La scelta è motivata dalla presenza in tale laboratorio di un mobile dotato di cappa chiusa per aspirazione, di dimensione adatta a contenere l'attrezzatura necessaria allo svolgimento dell'attività sperimentale, che consente quindi l'esecuzione delle prove assicurando un elevato mantenimento delle condizioni di sicurezza.

Sulla base dello studio inerente gli aspetti teorici del processo di desolforazione a caldo, e dopo aver affrontato gli aspetti progettuali e realizzativi della corrispondente sezione nell'impianto Sotacarbo, in questa prima parte verranno riassunte le ipotesi e i criteri di scelta che sono state adottati durante la fase di dimensionamento delle apparecchiature necessarie alla esecuzione delle campagne sperimentali in laboratorio, e verrà presentato il lavoro di installazione di queste.

Dapprima verrà illustrato lo schema generale del circuito realizzato, quindi sarà analizzato singolarmente ogni singolo componente e verranno riportate, per ognuno, oltre alle caratteristiche tecniche, la procedura seguita per la realizzazione, gli eventuali problemi sorti e le soluzioni adottate.

Nel corso del lavoro è stato necessario modificare l'idea progettuale originaria ogni qual volta si è presentata una situazione in cui le previsioni teoriche non trovavano possibile riscontro nella realtà. La risoluzione dei problemi è scaturita spesso in un processo di progressivo adattamento, durante il quale il progetto originale si è trasformato poco a poco.

Nelle pagine seguenti verranno ripercorse le tappe evolutive principali e verrà presentata la configurazione definitiva, che dovrebbe rappresentare la migliore soluzione, o più propriamente, il miglior compromesso fra la necessità di risolvere il problema in maniera soddisfacente e le esigenze reali di realizzazione.

Il risultato di questo processo di progettazione è un piccolo impianto che, grazie all'esperienza accumulata in queste fasi del lavoro, potrà essere modificato ed adattato alle esigenze che potranno presentarsi anche in futuro.

L'obiettivo della realizzazione della sezione di desolforazione da laboratorio è quello di effettuare prove sperimentali di reazione gas-solido, in condizioni di temperatura e pressione appropriate, che permettano di ottenere risultati estrapolabili su scale maggiori, in particolare di poter caratterizzare dal punto prestazionale i sorbenti di desolforazione in previsione del loro utilizzo nei reattori dell'impianto della piattaforma pilota Sotacarbo.

Con questa finalità si è scelto di procedere al dimensionamento e all'allestimento di una sezione di desolforazione ad alta temperatura, in cui il fulcro del sistema è rappresentato da un reattore a letto fisso.

Si è optato per la realizzazione di un reattore che lavori in desolforazione ad alta temperatura e pressione atmosferica, in vetro pyrex.

L'unità di desolfurazione da laboratorio è costituita da un circuito aperto a pressione atmosferica alimentato da gas in bombole attraverso un sistema di adduzione provvisto di controllore di flusso. La depurazione della corrente gassosa avviene in un reattore a letto fisso, il cui riempimento è costituito da materiale solido sorbente. Per garantire le previste condizioni termiche, il reattore è collocato all'interno di un forno da laboratorio. A valle del reattore il gas è inviato ad una washing bottle in cui viene fatto gorgogliare in una soluzione acquosa di soda, che permette la segregazione chimica in fase liquida della residua parte dell'inquinante presente.

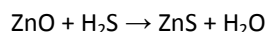
L'intero circuito è stato pensato e dimensionato per lavorare a temperature fino a 500 °C e pressione atmosferica.

La miscela alimentata al sistema è stata preparata con metodo gravimetrico da SIAD Società Italiana Acetilene e Derivati, è stata fornita in bombole di capacità unitaria pari a 7,5 m<sup>3</sup>, volume 50 l e pressione 150 bar (abs). Ogni bombola è corredata del proprio certificato di analisi. Per consentire inoltre lo svolgimento delle fasi di purge (inertizzazione del sistema), previste prima e dopo ogni prova da effettuarsi sul reattore e sulle linee, si è provveduto all'acquisto di azoto puro, anche esso in bombole, fornito sempre da SIAD. Ogni bombola ha un volume di 50 litri, è caricata a 200 bar (abs), e contiene 10 m<sup>3</sup> di gas.

Il criterio per la scelta della tipologia di adsorbenti da utilizzare nell'impianto della piattaforma pilota è stato fondato su considerazioni termodinamiche, che hanno consentito di limitare la scelta a quei composti capaci di ridurre la concentrazione di H<sub>2</sub>S nella corrente depurata al livello desiderato, alle condizioni di temperatura e pressione scelte per il processo. Lo studio termodinamico, infatti, ha permesso di calcolare la costante di equilibrio della reazione nelle condizioni operative ipotizzate, e, tramite questo valore, di determinare il campo di esistenza dei prodotti della reazione.

L'ossido di zinco ZnO è il sorbente che esibisce le migliori performances per temperature moderate, comprese nel range T = 300-540°C. I principali vantaggi offerti dal suo utilizzo nelle reazioni di desolfurazione sono una termodinamica fortemente favorevole ed un'elevata velocità di reazione alle temperature di interesse industriale. Il suo uso è quasi esclusivamente in miscela, con addizione di composti adsorbenti od inerti.

La reazione di desolfurazione può essere espressa come segue:



A conclusione degli studi effettuati nella sezione di desolfurazione dell'impianto Sotacarbo si è dunque deciso di utilizzare sorbenti a base di ossidi di zinco.

|                                                 | ACTISORB S3                                                | KATALCO 32-4              | KATALCO 32-5                                       |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| Produttore                                      | SÜD-CHEMIE                                                 | JOHNSON MATTHEY CATALYSTS | JOHNSON MATTHEY CATALYSTS                          |
| <b>Proprietà fisiche</b>                        |                                                            |                           |                                                    |
| <b>Forma</b>                                    | Rigato estruso                                             | Granulare                 | Granulare                                          |
| <b>Dimensione [mm]</b>                          | 4-4.5                                                      | -                         | 2.8-4.75                                           |
| <b>Densità [g/ml]</b>                           | 1.09                                                       | 1.1                       | 1.4                                                |
| <b>Area superficiale [m<sup>2</sup>/g]</b>      | -                                                          | -                         | 35                                                 |
| <b>Volume pori [ml/g]</b>                       | -                                                          | -                         | 0.26                                               |
| <b>Composizione chimica (tipica)</b>            |                                                            |                           |                                                    |
| <b>Ossido attivo [%pp]</b>                      | ZnO >25                                                    | ZnO >25                   | ZnO 92                                             |
| <b>Materiale di supporto</b>                    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <10<br>Na <sub>2</sub> O <1 | -                         | CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(a bilancio) |
| <b>S pick up dichiarato [kgS/m<sup>3</sup>]</b> | -                                                          | 400                       | 340                                                |

Essendo stato valutato il forte aspetto economico derivante dall'alto costo di mercato dei sorbenti necessari per il funzionamento della sezione di impianto, si è deciso di procedere alla caratterizzazione prestazionale dei sorbenti nell'unità allestita in laboratorio. La sperimentazione si è svolta dunque utilizzando diversi prodotti commerciali appartenenti a questa tipologia.

Sono stati individuati tre diversi sorbenti per desolfurazione a base di ossido di zinco disponibili sul mercato:

- ActisorbS S3 (Süd-Chemie)
- Katalco 32-4 (Johnson Matthey Catalysts)
- Katalco 32-5 (Johnson Matthey Catalysts).

Alla conclusione di questa fase di sperimentazione l'obiettivo di caratterizzare il comportamento dei vari sorbenti disponibili commercialmente è stato raggiunto.

Il lavoro nella sua globalità ha incluso parti esclusivamente pratiche, come l'installazione del sistema e il collegamento delle sue parti, ed altre più teoriche, come il dimensionamento delle apparecchiature e l'analisi dei dati ottenuti.

Non poche difficoltà sono sorte durante tutto il percorso. Prima di tutto quelle legate ai tempi di approvvigionamento dei materiali e delle apparecchiature, e la loro compatibilità con quanto richiesto per lo svolgimento delle varie prove. Altri problemi sono sorti al momento dell'assemblamento dell'unità di desolfurazione e della sua messa in funzione:

- assetto definitivo del reattore e suo posizionamento all'interno del forno da laboratorio;
- elaborazione delle procedure per l'esecuzione delle prove;
- integrazione delle parti realizzate.

Il progetto originale dell'unità, soprattutto per quanto riguarda la modalità di erogazione del gas ed il layout realizzativo del reattore, è stato modificato ogni qualvolta le previsioni teoriche non si sono realizzate ed alla fine la configurazione definitiva ha differito dalle ipotesi fatte a monte del lavoro in modo sostanziale. Le fasi di modifica hanno supposto un lavoro teorico di ricerca della letteratura scientifica sull'argomento specifico e di approfondimento con personale esperto. Tutto questo ha di fatto prodotto dei ritardi nel lavoro.

Sull'unità di laboratorio sono stati quindi svolti i test preliminari: prova del sistema di riscaldamento, prova di tenuta del gas, interferenza del materiale del reattore con la reazione di adsorbimento.

I risultati ottenuti in seguito alla prova in bianco sono stati sorprendenti: da una analisi su quanto riscontrato si è dedotto che una parte del reattore ha preso parte alla reazione di desolfurazione stessa in maniera significativa. La parte del reattore realizzata con polvere di vetro pyrex, che quindi di fatto risultava porosa, ha adsorbito H<sub>2</sub>S in quantità considerevole, fino a ridurre la quantità nel gas in uscita del 33%. Poiché la prova ha completamente distrutto la parte interessata, si è provveduto alla sostituzione del pezzo, e non si è potuto verificare con ulteriori prove se questa caratteristica potesse essere in relazione a parametri operativi come temperatura e flusso del gas nel circuito.

La campagna sperimentale sul confronto prestazionale tra alcuni sorbenti commerciali a base di ossido di zinco ha fornito buoni risultati. Come anche mostrato dai grafici sopra riportati, nelle condizioni operative utilizzate durante lo svolgersi dell'attività, il sorbente ActiSorb S3 ha evidenziato la capacità di mantenere costantemente ai livelli richiesti la concentrazione di H<sub>2</sub>S nella corrente di gas in uscita, mostrando un'ottima azione desolforante.

E' stata rimandata alla seconda fase di attuazione dell'AdP la trattazione di dettaglio del desorbimento a caldo dei prodotti derivati dallo zolfo su sorbenti a base di ossidi metallici utilizzato per la rigenerazione dei sorbenti solidi. Oltre a quanto sopra, in vista della validazione del modello matematico già realizzato per la sezione di desolfurazione dell'impianto della piattaforma pilota Sotacarbo, la prova sul sorbente Katalco 32-5 (utilizzato al momento nei reattori in impianto) è stata effettuata in più tappe. I risultati di questa parte di attività sono riportati di seguito.

A valle di quanto asserito, l'unità installata fatta funzionare in modalità opportuna, potrà essere usata per proseguire lo studio fin qui condotto.

A conclusione del lavoro si vuole mettere l'accento sull'importanza dell'esperienza accumulata nell'installazione delle apparecchiature, nella calibrazione e uso degli strumenti di misura e sulla gestione delle problematiche legate alla operatività della sezione. Questo bagaglio tecnico, unito alla flessibilità dell'impianto che è stata fin dall'inizio uno degli obiettivi del progetto iniziale, è proprio ciò che permetterà di sfruttare il lavoro fatto in modo proficuo.

La rielaborazione del modello matematico ha previsto l'effettuazione di alcune modifiche, in particolare si è dovuto tener conto della geometria del reattore (dimensioni), della composizione della corrente gassosa da depurare, delle condizioni operative che hanno caratterizzato la campagna sperimentale (grado di riempimento del letto, temperatura di lavoro, et cetera), dei dati sul sorbente (densità, grado di vuoto, composizione). Tale



Figura 43. Katalco 32-5 - JM

attività ha richiesto non solo la variazione di alcuni parametri in ingresso al programma di calcolo, ma anche modifiche sulle equazioni introdotte nel listato del programma di calcolo.

L'inserimento dei nuovi dati di input ha generato, durante l'esecuzione del programma, forti instabilità di calcolo conseguenti al presentarsi di casi di indeterminazione di carattere matematico. L'analisi di sensitività sui parametri inseriti ha permesso di identificare la fonte del problema, imputandone la causa al valore del raggio del reattore.

Per ovviare a ciò, è stata formulata l'ipotesi di considerare una differente geometria, che assicurasse la corretta esecuzione del programma, intervenendo nello stesso tempo sul valore della portata di gas in entrata all'apparecchiatura, calcolato considerando il dato reale di velocità superficiale ( $v_s = 0,0238 \text{ ms}^{-1}$ ).

L'esecuzione del programma di calcolo ha fornito i dati di output che vengono mostrati sotto forma di grafico nelle Figure 44-46. Nelle Figure 44 e 45 sono riportati il profilo di concentrazione dell' $\text{H}_2\text{S}$  residuo ed il profilo del grado di conversione del sorbente solido lungo l'asse del reattore a diversi tempi di esposizione. In ognuno dei diagrammi illustrati è osservabile l'avanzamento del fronte di reazione. Il tipo di profilo ottenuto è il medesimo per tutte le curve nei differenti istanti di desolforazione, e la pendenza delle curve è indice dell'ipotesi fatta di fluidodinamica di tipo PFR, validata per altro da quanto potuto osservare sperimentalmente.

L'avanzamento del fronte reattivo nel letto è osservabile anche nei profili termici illustrati nel diagramma di Figura 46, dove possono essere individuati i picchi di temperatura (hot spot) dovuti alla reazione.

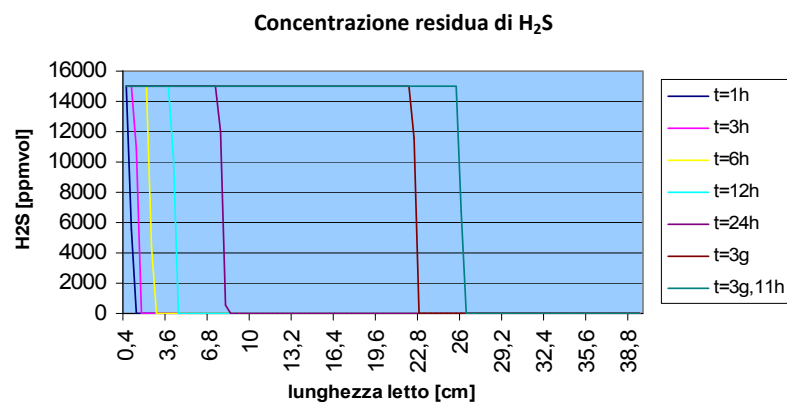


**Figura 44. Grafico risultante dall'elaborazione dei dati di concentrazione di  $\text{H}_2\text{S}$  residua calcolati attraverso il modello matematico**

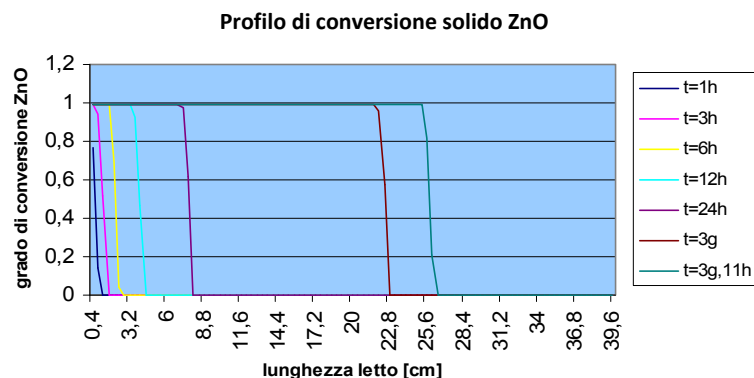


**Figura 45. Elaborazione dei dati di conversione del sorbente (Katalco 32-5) calcolati attraverso il modello matematico**



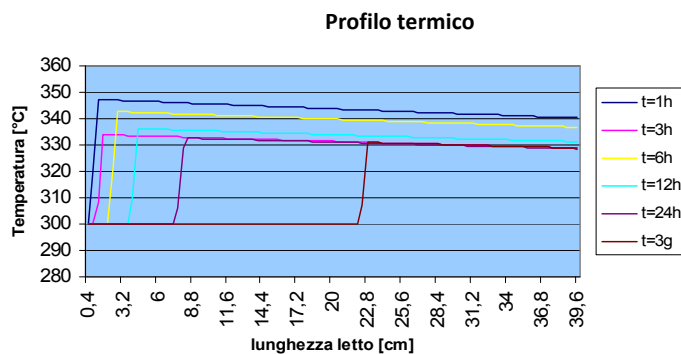


Figura 46. Grafico risultante dall'elaborazione dei dati di temperatura calcolati attraverso il modello matematico

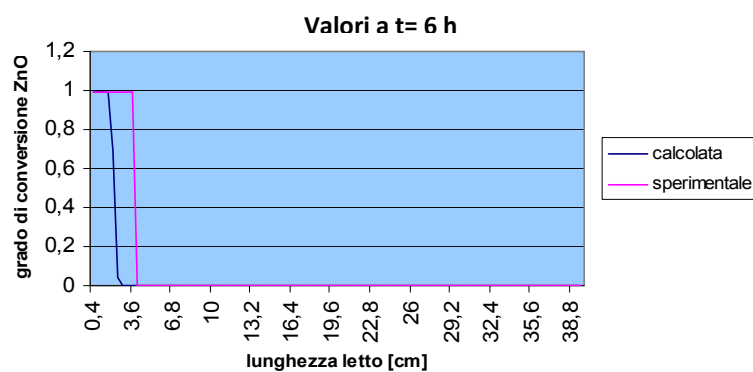


Figura 47. Confronto tra valori calcolati e sperimentali dedotti per una fase di desolforazione della durata complessiva di 6 ore

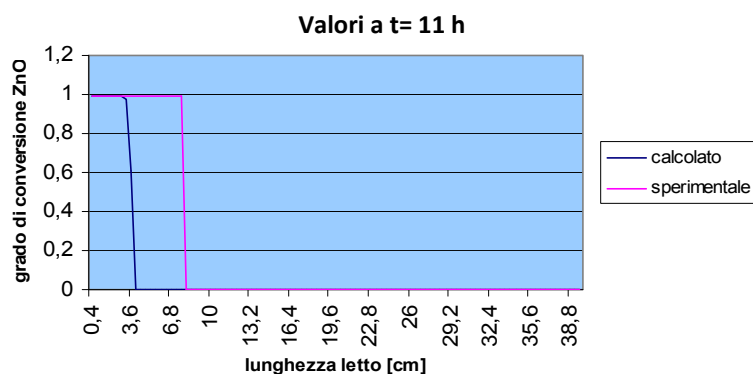


Figura 48. Confronto tra valori calcolati e sperimentali dedotti per una fase di desolforazione della durata complessiva di 11 ore

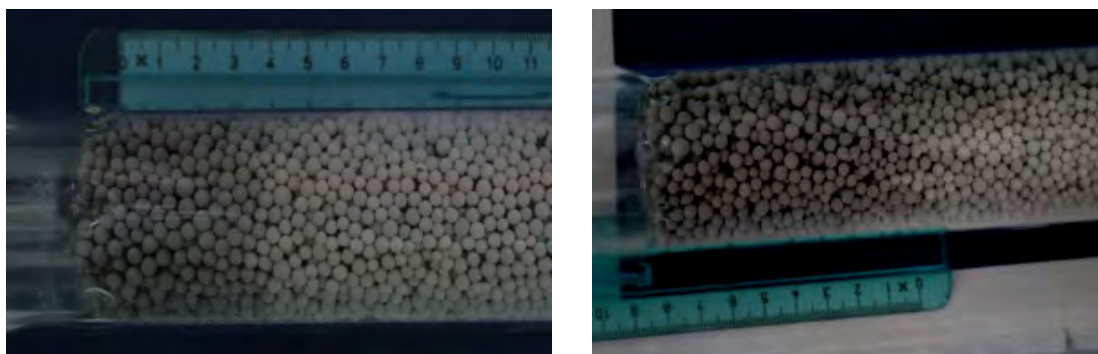


Figura 49. Avanzamento del fronte di reazione dopo 6 e 11h con Katalco 32-5 (J&M Catalysts)

Il modello matematico è stato validato confrontando le performances calcolate nelle specifiche condizioni operative con quelle ottenute in laboratorio.

Nelle figure precedenti è mostrato un test comparativo tra gli output generati dal programma di calcolo e i dati sperimentali acquisiti durante le attività sperimentali per un tempo di desolforazione rispettivamente di 6 ore e di 11 ore, dal quale è ben evidente il soddisfacente accordo mostrato tra i due trends.

Il gap rilevabile tra i dati calcolati e quelli sperimentali è abbastanza ridotto, ed imputabile ai dati inseriti riguardanti il sorbente ed i parametri calcolati a partire da essi. A questo si aggiunge la semplificazione adottata, nella stesura del modello, di considerare che le particelle di sorbente siano costituite esclusivamente da ZnO puro. Queste ipotesi sono avvalorate dal fatto che la differenza tra valori calcolati e sperimentali non rimane costante, ma aumenta in ragione del tempo, quindi in maniera dipendente presumibilmente dalla cinetica di reazione.

Ulteriori miglioramenti potranno essere apportati quando si potrà disporre di dati sul sorbente e sulla cinetica più accurati e mirati al processo in svolgimento.

### **Studi per l'applicazione delle tecnologie di stoccaggio ECBM al bacino del Sulcis**

Il lavoro è consistito nella predisposizione di uno studio sull'applicazione di tecnologie di stoccaggio geologico dell'anidride carbonica negli strati più profondi e non sfruttabili del bacino carbonifero del Sulcis. Il lavoro è corredato dall'analisi tecnica ed economica necessaria alla valutazione della fattibilità di applicazione industriale delle tecniche ECBM, nel Sulcis e/o in ambito nazionale. Un tale studio preliminare va inquadrato nell'ambito dello sviluppo delle tecnologie CCS (Carbon Capture and Storage) il cui obiettivo, nelle forme più avanzate, è la realizzazione di sistemi energetici a emissioni nulle.

L'obiettivo principale dello sviluppo di sistemi industriali di confinamento della CO<sub>2</sub> è la realizzazione di sistemi di produzione di energia elettrica ad emissioni quasi zero, che consentano il rispetto degli impegni ambientale internazionali e siano economicamente sostenibili; l'obiettivo può essere perseguito attraverso l'integrazione nelle centrali di potenza di sistemi di cattura della CO<sub>2</sub> con impianti di trasporto e stoccaggio geologico della stessa.

Lo studio in oggetto è stato quindi sviluppato affrontando dapprima gli aspetti specifici geologici: la caratterizzazione idrogeologica del bacino carbonifero del Sulcis; la geochimica del carbone e la valutazione delle potenzialità di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>. Successivamente, sono stati approfonditi altri aspetti importanti: le opportunità offerte dai meccanismi introdotti dal Protocollo di Kyoto, le tecnologie di produzione di energia elettrica e le connesse opzioni tecnologiche di cattura della CO<sub>2</sub>, le diverse tecnologie di stoccaggio geologico, la valutazione di possibili applicazioni delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub> alle centrali di potenza presenti nel Sulcis. Infine è stata effettuata l'analisi tecnico economica di un impianto integrato centrale di potenza-miniera, con separazione e confinamento geologico della CO<sub>2</sub> in condizioni di zero-emission.

Due sono gli studi di fattibilità economica dell'applicazione delle tecniche ECBM al bacino carbonifero del Sulcis:

- un primo basato sul solo confinamento della produzione attuale di CO<sub>2</sub> dovuta alle centrali di potenza che circondano il bacino carbonifero, ipotizzando di equipaggiare i sistemi di produzione di energia elettrica con sezioni di cattura della CO<sub>2</sub>;
- un secondo riguardante l'applicazione delle tecniche ECBM ad un impianto di potenza termica quasi zero emission da 1500 MW. Il sistema così integrato è basato sulla cattura della CO<sub>2</sub> prodotta nell'impianto ed il suo confinamento mediante tecniche ECBM con conseguente sfruttamento del gas a base di metano che viene rilasciato.

Nell'insieme il lavoro consente di effettuare valutazioni preliminari tecniche ed economiche delle potenzialità del bacino carbonifero del Sulcis in termini di confinamento della CO<sub>2</sub> e di produzione del CH<sub>4</sub> (applicazione delle tecniche ECBM); e di valutare l'effettiva possibilità di utilizzare il bacino carbonifero come serbatoio di stoccaggio della CO<sub>2</sub> a servizio degli impianti di produzione di energia elettrica già operanti sul territorio o di futuro inserimento.

L'Enhanced Coal Bed Methane (ECBM) riguarda lo stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub> in letti di carbone non coltivabili, con conseguente rilascio, per sostituzione, del metano presente nella struttura stessa del minerale. E' noto che durante il processo di carbonizzazione si produce naturalmente metano ed altri idrocarburi (Law and Rice, 1993; White et al. 2005).

Il carbone contiene un sistema naturale di fratture chiamate "cleats" che ne aumentano la superficie specifica e conseguentemente la possibilità di contenere il CH<sub>4</sub> e che determinano inoltre una certa permeabilità del sistema. I gas, non necessariamente solo il CH<sub>4</sub>, possono essere infatti adsorbiti: sulle vaste superfici interne del carbone; nella struttura molecolare del carbone; all'interno dei pori. Il carbone può di conseguenza fisicamente adsorbire

molto gas e può contenere fino a  $25 \text{ Nm}^3$  di  $\text{CH}_4$  per tonnellata di carbone, alle condizioni di pressione esistente nel letto. Esso inoltre ha un'affinità maggiore ad adsorbire  $\text{CO}_2$  rispetto a quanta non ne abbia verso il metano. In particolare, il rapporto in moli della  $\text{CO}_2$  adsorbibile rispetto al  $\text{CH}_4$ , varia da 1:1 per i carboni maturi, come l'antracite, a 10:1 per carboni giovani, soprattutto se non alterati. La  $\text{CO}_2$  in condizioni supercritiche iniettata nel sottosuolo fluisce attraverso il sistema di fratture degli strati di carbone e si diffonde nella matrice del combustibile per essere adsorbita sulle superfici dei micropori del carbone stesso, liberando al contempo il  $\text{CH}_4$  che, come accennato, presenta una minore affinità verso il carbone. Parte del  $\text{CH}_4$  è liberato naturalmente e la sua captazione è possibile con la realizzazione di pozzi di estrazione, senza ulteriori iniezioni di gas. Il metano formatosi durante il processo di carbonizzazione si libera naturalmente per semplice depressurizzazione della vena carbonifera attraverso l'estrazione dell'acqua in essa presente. Con apposite tecniche dette CBM (Coal Bed Methane) si riesce a recuperare una percentuale del metano, presente nella vena, che va dal 20% ad un massimo del 60%. Le CBM sono spesso applicate nei bacini carboniferi prima delle ECBM.

Il metano è usualmente presente in 3 fasi nei letti di carbone:

- adsorbito nei micropori (~95%);
- disciolto in acqua nelle fratture;
- libero nelle fratture, anche se quest'ultima è una situazione molto rara.

Il suo quantitativo è principalmente correlato con la profondità e naturalmente dipende dal materiale presente al momento in cui si forma il carbone e dalle condizioni geologiche.

La Tabella 3 mostra il contenuto medio di metano alle diverse profondità dei banchi di carbone, come indicato da Irons (2004).

**Tabella 3. Metano contenuto nel carbone a livelli di profondità crescenti (Irons and Others, 2004)**

| Depth interval, m | Mean methane content, mM | Range      | Number of assays |
|-------------------|--------------------------|------------|------------------|
| 100               | 0,02                     | 0,00-0,17  | 36               |
| 200               | 0,29                     | 0,00-3,80  | 184              |
| 300               | 0,67                     | 0,00-7,81  | 396              |
| 400               | 1,07                     | 0,00-18,67 | 467              |
| 500               | 0,99                     | 0,00-18,19 | 582              |
| 600               | 1,35                     | 0,00-21,24 | 677              |
| 700               | 1,99                     | 0,00-15,59 | 680              |
| 800               | 2,45                     | 0,00-16,65 | 726              |
| 900               | 3,16                     | 0,00-19,31 | 783              |
| 1000              | 3,73                     | 0,00-18,13 | 894              |
| 1100              | 4,68                     | 0,00-17,79 | 718              |
| 1200              | 5,19                     | 0,00-17,82 | 664              |
| 1300              | 5,46                     | 0,01-17,37 | 504              |
| 1400              | 6,17                     | 0,01-13,67 | 413              |
| 1500              | 4,89                     | 0,00-12,95 | 335              |
| 1600              | 5,57                     | 0,30-15,33 | 162              |
| 1700              | 5,78                     | 0,02-12,39 | 97               |
| 1800              | 6,60                     | 0,07-16,05 | 85               |
| 1900              | 6,52                     | 1,80-13,56 | 34               |
| 2000              | 7,09                     | 2,68-13,34 | 24               |
| 2100              | 4,57                     | 0,60-9,42  | 10               |
| 2200              | 3,97                     | 3,04-5,36  | 6                |
| 2300              | 2,81                     | 2,32-3,31  | 2                |

Mentre le tecniche CBM si applicano in giacimenti dove le potenzialità di produzione di metano non sono completamente sfruttate, le tecniche ECBM consentono un maggiore sfruttamento del giacimento con incremento di produzione di metano e sono caratterizzate, soprattutto, da un maggiore interesse per lo stoccaggio della  $\text{CO}_2$ . Le tecniche ECBM si basano sulla sostituzione del metano contenuto nella matrice porosa del carbone con la  $\text{CO}_2$  iniettata nello strato carbonifero profondo e consentono di estrarre una maggior quantità di metano (talvolta anche ben oltre il 90%) con il vantaggio di realizzare lo stoccaggio geologico di  $\text{CO}_2$  in strati di carboniferi difficilmente soggetti a sfruttamento minerario.

Questa tecnica di confinamento dell'anidride carbonica presenta l'evidente vantaggio rispetto a quelle attuate in altri ambienti di stoccaggio come giacimenti di petrolio e di gas naturale, in quanto i giacimenti di carbone sono

presenti in ogni continente e interessano circa i 2/3 dei paesi del pianeta. Il recupero primario di CH<sub>4</sub> dai carboni dipende da diversi fattori geologici che sono stati approfonditi da diversi ricercatori.

Ad esempio i carboni di medio grado (medium-rank) possono adsorbire approssimativamente un volume di CO<sub>2</sub> pari a più del doppio del CH<sub>4</sub>, mentre alcuni carboni di basso rango (low-rank) possono adsorbire fino a dieci moli di CO<sub>2</sub> per ciascuna mole di CH<sub>4</sub>. Analisi di laboratorio e conferme sul campo, hanno mostrato che questo rapporto può essere ancora maggiore per i carboni giacenti a profondità superiori a circa 800 m, dove la CO<sub>2</sub> iniettata si trova in condizioni supercritiche. L’intervallo di profondità in cui applicare le tecniche di produzione CBM va dai 300 m ai 1550 m ed oltre, mentre le tecniche CO<sub>2</sub>-ECMB possono essere applicate partendo comunque da una profondità di circa 800 m (profondità minima affinché la CO<sub>2</sub> si trovi in condizioni supercritiche), sino ad una profondità massima di circa 1500 m (per profondità maggiori, i costi di perforazione potrebbero rendere tali tecniche non economicamente vantaggiose).

Anche in Europa sono stati realizzati studi con conseguenti attività sperimentali: di particolare rilievo il Progetto EC RECO<sub>2</sub>POL realizzato per lo sfruttamento del “Upper Silesian Basin” in Polonia (Fig. 2.6, Kross et al., 2002; Pagnier et al., 2004). L’attività sperimentale, di iniezione della anidride carbonica nel bacino carbonifero, è iniziata nel luglio 2004 ed è proseguita sino al giugno 2005, confinando, globalmente, circa 760 t di gas ([www.recopol.nitg.tno.nl](http://www.recopol.nitg.tno.nl)).

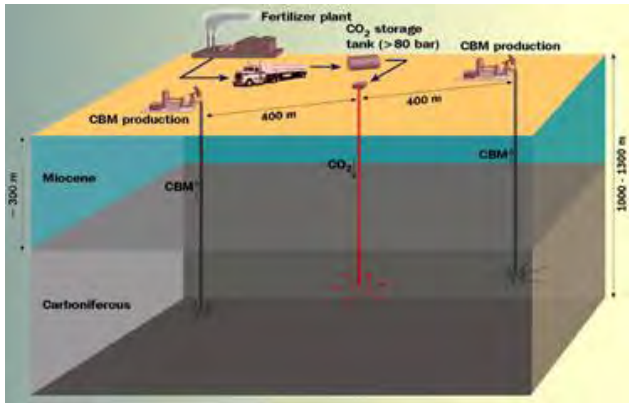


**Figura 50. Schema del sistema di iniezione CO<sub>2</sub> nei letti profondi a carbone ed estrazione del CH<sub>4</sub> (Progetto RECO<sub>2</sub>POL)**

In Tabella 4 (D. Gielen, 2003) si riportano in sintesi alcuni dati di confronto sulle opzioni di confinamento geologico della CO<sub>2</sub> sopra illustrate.

Nella tecnica CO<sub>2</sub>-ECBM in genere si parte dall’applicazione della tecnica di produzione CBM, riducendo la pressione parziale di CH<sub>4</sub> nel carbone. Successivamente viene iniettata la CO<sub>2</sub> che aumenta la rimozione del CH<sub>4</sub> per via dell’adsorbimento preferenziale dell’anidride carbonica nel carbone rispetto al metano. Il CH<sub>4</sub> viene quindi desorbito e la sua produzione aumenta di dieci volte circa rispetto a quella ottenibile con la tecnica classica CBM, adottata negli USA fin dagli anni ’90 e che produce, a tutt’oggi, il 9% del metano USA.

**Tabella 4. Confronto tra le tecniche di confinamento geologico della CO<sub>2</sub>**

|                                | Meccanismo                        | Benefici                                                                                                           | Vincoli                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ECBM</b>                    | Legami fisico chimici             | Confinamento geologico CO <sub>2</sub> con estrazione di metano (0,08-0,20 t CH <sub>4</sub> /t CO <sub>2</sub> )  | Strati non coltivabili<br>Impermeabilità del cap rock (roccia di copertura)<br>Sufficiente permeabilità del carbone<br>Necessaria profondità 800-1500 m<br>Disponibilità di CO <sub>2</sub>                     |
| <b>EOR</b>                     | Intrappolamento fisico e minerale | Confinamento geologico CO <sub>2</sub> con estrazione di olio (0,33-0,42 t Oil/t CO <sub>2</sub> )                 | Densità del petrolio almeno 25°API<br>Impermeabilità del cap rock<br>Cappello del gas limitato<br>Profondità minima delle riserve 600 m<br>Disponibilità di CO <sub>2</sub>                                     |
| <b>EGR</b>                     | Intrappolamento fisico e minerale | Confinamento geologico CO <sub>2</sub> con estrazione di metano (0,03-0,05 t CH <sub>4</sub> / t CO <sub>2</sub> ) | Giacimenti gas già sfruttati<br>Impermeabilità del cap rock<br>Disponibilità di CO <sub>2</sub>                                                                                                                 |
| <b>Stoccaggio in acquiferi</b> | Intrappolamento fisico e minerale | Confinamento geologico CO <sub>2</sub>                                                                             | Disponibilità di CO <sub>2</sub><br>Impermeabilità del cap rock<br>Mineralizzazione in tempi lunghissimi (centinaia di migliaia di anni) con possibile trascinato della CO <sub>2</sub> nelle acque sotterranee |

Ai fini dell’applicazione delle tecnologie ECBM, è necessario effettuare una analisi dei seguenti fattori:

- criteri di valutazione per la selezione del sito;
- ruolo del rank del carbone;

- caratteristiche del carbone con valutazioni su: mineral matter, umidità, materie volatili, macerali;
- requisiti di permeabilità del carbone;
- stima della produzione di CH<sub>4</sub> e della capacità di confinamento della CO<sub>2</sub> e valutazioni economiche preliminari.

I risultati dell'analisi sono riportati in dettaglio nei rapporti tecnici disponibili sul sito web ENEA.

#### *La provincia carbonifera del Sulcis*

In Italia non sono presenti significative riserve di carbone, ad eccezione della "Provincia Carbonifera del Sulcis" (PCS) che è ancora attiva ed è caratterizzata da una considerevole presenza sia di carbone coltivabile, sia di strati carboniferi profondi adatti allo sfruttamento di tecniche di produzione CBM-ECBM.

La PCS occupa la porzione SW della Sardegna, dalla valle del fiume Cixerri al Golfo di Palmas, su cui si affacciano le isole di San Pietro e S. Antioco, ed è adiacente all'area del nucleo industriale del Sulcis Iglesiente. Risultando orientata lungo la direttrice N-S e limitata ad Ovest dal mare, caratterizzato da bassi fondali, la PCS sembrerebbe idonea all'applicazione di tecniche di perforazione sia "in-shore" sia "off-shore".

#### *Inquadramento Geologico*

Una precisa ricostruzione della geologia, delle caratteristiche strutturali e idrogeologiche del bacino carbonifero, appaiono di fondamentale importanza per valutare il potenziale CBM di un carbone.

La migrazione del gas all'interno del bacino, infatti, si manifesta attraverso fenomeni di desorbimento e diffusione, che trovano origine da un aumento della temperatura o una diminuzione della pressione al suo interno. Per questo motivo quindi, è importante avere una conoscenza approfondita dei movimenti tettonici di sollevamento a livello regionale che hanno interessato il bacino carbonifero nel suo passato geologico. Dal punto di vista idrogeologico il ritrovamento di acquiferi coevi con i sedimenti che ospitano i livelli di carbone, può dimostrare che il bacino è rimasto isolato per un lungo periodo di tempo.

Dovranno essere considerati:

- lo stadio geologico in cui i letti di carbone hanno intrappolato i fluidi ed i gas nella loro posizione attuale;
- l'estensione areale dei fluidi intrappolati e la susseguente infiltrazione di acque sotterranee;
- la ricerca dell'elemento che influisce sulla pressione idrostatica nonché la quantità e la velocità dell'adsorbimento/desorbimento del CH<sub>4</sub>.

Il corpo minerario carbonifero ("Produttivo") risulta inserito in una sequenza sedimentaria considerata di ambiente paralico (ambiente di transizione tra lacustre e marino), riconducibile all'Eocene inferiore. Il "Produttivo" è costituito da diversi livelli di carbone intercalati a sedimenti calcarei, marnosi e arenacei, ed è delimitato al letto, da un calcare a "Miliolidae" (microfossili) e al tetto, dalla porzione inferiore della formazione del Cixerri di origine continentale.

Gli spessori dei letti di carbone, comprese le lenti di argilla carboniosa, sono pari a circa 150 m. Lo spessore del carbone è circa il 20-40 % del totale e, nell'area di estrazione, possono essere stimate circa 250 Mt di carbone.

Nel resto del settore, in particolare nella zona costiera, potrebbero essere stimate circa 1 miliardo di tonnellate di carbone. In questa parte del bacino potrebbero localizzarsi le aree maggiormente promettenti all'applicazione delle tecniche CBM e ECBM.

Dal punto di vista minerario il taglio ha uno spessore normalmente pari a 1,40 m e lo spessore tra due letti è maggiore di 3,00 m.

La geologia e l'assetto stratigrafico del bacino appare idonea all'applicazione della tecnica ECBM. La copertura del bacino carbonifero, infatti, è costituita dalle formazioni appartenenti al ciclo vulcanico alcalino terziario (ignimbriti e andesiti) e dalla formazione sedimentaria eocenica - oligocenica del Cixerri (di notevole importanza idrogeologica per le sue caratteristiche impermeabili, i cui litotipi sono costituiti da: arenarie quarzose, conglomerati e marne argillose e siltose) di potenza complessiva pari a circa 500-600 m. Questo spessore è considerato sufficiente per evitare il degasamento del flusso di CO<sub>2</sub> in superficie dopo l'iniezione.

Inoltre la buona capacità tampone e il pH delle numerose rocce a Miliolidae (calcari organogeni con intercalazioni marnose e calcareo marnose, ad elevata permeabilità per fessurazione e carsismo), è in grado di assicurare trappole solubili nel primo periodo di attività e trappole minerali nel lungo periodo.

La stratigrafia dal fondo alla sommità è:

- Piattaforma Cambro-Siluriano Paleozoico (filladi, filladi carboniose, quarziti, metacalcari, metaconglomerati);
- Formazione Calcare Miliolitico dell'Eocene, Paleogene Carbonifero (Cuisiano-Luteziano) strato produttivo di carbone";
- Formazione del Cixerri (Pecorini, Pomesano & Cerchi, 1969, clays, sands, 300 m);
- Andesiti, Andesiti basaltiche e Basalti Oligo-Miocenici;
- Ignimbriti dell'Unità di Corona Maria;
- Ignimbriti -daciti dell'Unità Lenzu;
  - Ignimbriti dell'Unità Acqua sa Canna;
- Ignimbriti dell'Unità di Seruci;
- Ignimbriti dell'Unità Conca Is Angius;
- Ignimbriti dell'Unità di Nuraxi;
- Ignimbriti della formazione Comenditi;
- Ignimbriti dell'Unità di Monte Ulmus;
- Ignimbriti dell'Unità Paringianu;
- Ignimbriti dell'Unità Serra Paringianu.

Dal punto di vista strutturale il complesso delle deformazioni subite nel passato geologico hanno creato nel bacino carbonifero del Sulcis un sistema costituito da *horst* (alto strutturale) e *graben* (basso strutturale). Gli alti strutturali sono rappresentati dalle isole di S. Pietro e S. Antioco, l'area tra Porto Paglia e M.te Sirai, mentre l'area che va da Portovesme fino all'istmo di S. Antioco costituisce uno stretto graben con direttrici NW-SE.

Questo schema relativamente semplice nasconde in realtà problematiche strutturali relative a più eventi tettonici susseguiti in un arco di tempo piuttosto ampio (Cherchi et al., 1990), E' stato infatti possibile riconoscere quattro fasi tettoniche susseguite in epoche recenti dal Miocene (Messiniano) al Quaternario (Tirreniano) e che avrebbero interessato le aree della Sardegna meridionale.

Le principali caratteristiche tettoniche sono evidenziate dalle seguenti linee di faglia (area interessata dalle coltivazioni):

- *Faglia di Serbariu-Sirai* (Est del bacino, 50 m dislocazione, immersione W).
- *Faglia di Sinni* (direzione circa NNE-SSW; immersione N30).
- *Faglia di Cortoghiana* (direzione NNW-SSE, immersione N170).
- *Faglia di Maiorchina* (direzione NW-SE, dislocazione di circa 7-20 m).
- *Faglia di Ponente* (direzione N-S, limitata alla zona ad W di Seruci, dislocazione di 40-100 m).
- *Faglia di Acqua Sa Canna* (direzione N80, immersione N, dislocazione 50 m).
- *Faglia di Paringianu* (direzione E-W, immersione N, dislocazione 20-50 m).
- *Faglia di M. Ulmus* (direzione N80E, dislocazione 100 m, limitata al Permiano).

L'area interessata (pari almeno a circa 400 km<sup>2</sup>), individuata più in dettaglio sulla base dei profili sismici a riflessione (Figura 51), potrebbe risultare interessante per lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>.



**Figura 51. Possibile area d'indagine per l'applicazione delle tecniche CBM e ECBM considerate nel presente studio)**

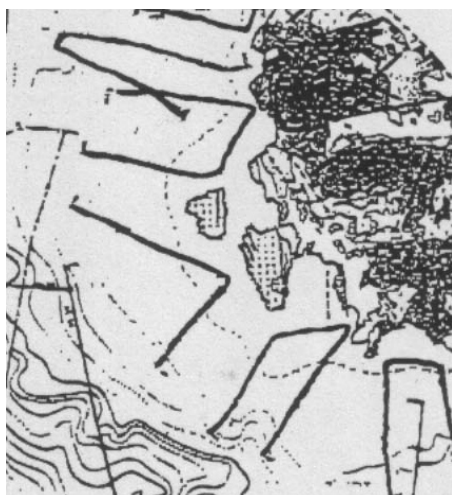


**Figura 52. Profili sismici disponibili (Francois private enterprises data) inseriti nella predisposizione della mappatura GIS**

Gli strati carboniferi, di età terziaria, mostrano un'inclinazione verso ovest e tendono ad affiorare nella parte est del bacino del Sulcis, diventando progressivamente regolari ed orizzontali lontano dal limite Terziario-Paleozoico localizzato ad est. Gli strati di carbone si presentano con uno spessore maggiore verso est (circa 150 m, in aumento nella parte occidentale, con un potenziale aumento dei banchi di carbone compreso tra il 20 ed il 40 %), con un incremento dell'immersione verso ovest del 8-10%.

Queste variazioni probabilmente rispecchiano le diverse condizioni d'assetto che ha subito il bacino sedimentario e mettono in evidenza una morfologia irregolare, individuando probabili aree soggette a subsidenza differenziata.

I movimenti tettonici hanno sbloccato a gradinata il "Produttivo" che affiora nel settore orientale dove si appoggia sul basamento paleozoico, in prossimità di Bacu Abis. A Seruci si ritrova a circa -200 m, mentre a Portovesme si rileva dai sondaggi una profondità di oltre -700 m sotto il livello del mare. Sembra probabile quindi una continuità del "Produttivo" anche sotto il braccio di mare compreso tra la coste e le isole di S. Pietro e S. Antioco.

In direzione Sud Sud-Ovest, oltre all'approfondimento del bacino, si verifica anche un progressivo incremento della potenza del "Produttivo", la cui geometria è strettamente controllata dal sistema di fratture. Quest'ultimo genera, infatti, un complesso strutturale costituito da blocchi dislocati, contraddistinti da fratture secondarie e fenomeni di stress rimarcati da piegamenti anche di notevole entità.

Il bacino carbonifero è limitato strutturalmente a Sud da un'importante linea tettonica a livello regionale denominata "Faglia di S. Antioco" (direzione Est-Ovest), che ha avuto un ruolo fortemente dislocante della serie carbonatica mesozoica e riduce, in definitiva, drasticamente la possibilità di ritrovamento di livelli CBM nel settore situato a Sud della stessa.

Infine è da sottolineare che il sondaggio esplorativo n. 37/87 eseguito da Carbosulcis nell'entroterra (in-shore) in località Monte Ulmus, ha evidenziato la presenza dei letti di carbone alla quota di -800m (considerata la profondità minima per l'iniezione della CO<sub>2</sub>). Tuttavia si rileva che nelle aree a mare (off-shore) dove lo spessore degli strati dei letti a carbone tende ad approfondirsi, e a divenire progressivamente più rilevante e continuo, si hanno le potenzialità di sviluppo maggiori.

Un eventuale progetto comporterebbe, con ogni probabilità, l'esecuzione di pozzi orizzontali perforati da terra verso il mare sino a raggiungere gli strati di carbone profondi, che appaiono più idonei per le tecniche CBM ed ECBM. Questa scelta minimizzerebbe inoltre l'impatto ambientale del progetto.

### *Caratterizzazione del carbone Sulcis*

Sulla base dei dati di letteratura e delle più recenti analisi effettuate (Sotacarbo, 2006) Il carbone Sulcis è classificato come "High volatile C bituminous" ed è caratterizzato da un contenuto di macerali (costituenti organici del carbone riconoscibili per la loro morfologia e per il loro diverso indice di riflettanza) pari a 89,3 % (suddivisi in Vitrinite: 73,3 %, Exinite: 11 %, Inertite: 5%) e 10,7% di altri minerali. Il coefficiente di riflettanza della vitrinite per il carbone Sulcis è compreso fra 0,5 e 0,7% (R<sub>0</sub>).

La massima potenzialità CBM per un carbone si ha per R<sub>0</sub>=0,7% (raggiunto dal carbone Sulcis nelle analisi effettuate su campioni prelevati a -400 m) in presenza di fasi di bitumizzazione. Valori più elevati del coefficiente di riflettanza, per esempio R<sub>0</sub> = 1,2 % come ci si aspetterebbe in alcune zone degli strati produttivi più profondi del bacino carbonifero del Sulcis, indicherebbero l'assenza di idrocarburi liberi e la prevalenza dell'acqua nella struttura del carbone. Le migliori condizioni sono presumibili per la PCS a circa 800-1000 metri di profondità rispetto agli attuali 400 m, campionati nel presente studio.

Una stima del GIP è basata sull' "Analisi di Pirolisi" (degradazione termica in assenza di ossigeno) o "Pirolisis Analysis" usata per determinare il potenziale di gas e la composizione del pirolizzato (Higgs, 1986).

La proiezione sui diagrammi classificativi esistenti permette di stimare, per carboni come il Sulcis, un generazione potenziale di gas (Potential Gas Generation) intorno a 100-120 ml CH<sub>4</sub>/g<sub>coal</sub>.



Durante la carbonizzazione fino al grado di antracite, un carbone di tipo “Carboniferous sub-hydrous” genererà un massimo di 150 ml(CH<sub>4</sub>)/g<sub>coal</sub>, mentre un carbone “Tertiary per-hydrous” (come previsto per il Sulcis) potrà generare al massimo 200 mlCH<sub>4</sub>/g<sub>coal</sub>. (alla pressione di 1 bar).

Il Potential Gas Generation atteso dai dati di letteratura è stimato in 150-200 mlCH<sub>4</sub>/g di carbone alle condizioni standard di pressione e temperatura (STP). Questo valore potrebbe variare in funzione delle reali caratteristiche intrinseche del carbone quali:

- capacità di adsorbimento
- porosità (da cui dipende lo spazio disponibile per il gas libero o “free gas”)
- caratteristiche di permeabilità
- geologia strutturale e la storia dell’approfondimento del bacino
- generazione del gas CBM e la sua migrazione
- geometria delle faglie e del sistema di fratturazione.

Visto il grado di maturità del carbone Sulcis, si prevede un adsorbimento del gas CO<sub>2</sub> di circa 10 m<sup>3</sup> di CO<sub>2</sub> per tonnellata di carbone, ulteriori calcoli potranno essere effettuati sulla base dei risultati sperimentali di future indagini.

Per il carbone Sulcis, confronto con il carbone simile dell’Illinois Basin, suggerisce una capacità di adsorbimento del carbone, di circa 6 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/grammo di carbone alle condizioni STP considerando 6-7% di umidità; contro i 16 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/grammo di carbone per lo stesso carbone, secco.

Il carbone Sulcis è caratterizzato da un’umidità che va dal 3.8 al 7 % alla profondità di campionamento (- 400 m).

Per la caratterizzazione del carbone Sulcis, sono di seguito riportati i risultati di analisi condotte sul carbone Sulcis, tratte da indagini condotte da Carbosulcis e Sotacarbo (Tabella 5).

**Tabella 5. Proximal Analysis del carbone Sulcis effettuate prelevato a -400 m**

|                            | Media %      | Met. ASTM |
|----------------------------|--------------|-----------|
| Umid.                      | 6,91         | 3302-02   |
| M.V.                       | 44,09        | 5142-02   |
| Ash = A%                   | 31,26        | 5142-02   |
| C fix                      | 19,40        | 5142-02   |
| C tot                      | 45,96        | 5373-02   |
| H                          | 4,04         | 5373-02   |
| N                          | 1,21         | 5373-02   |
| O                          | 11,93        | 3176-02   |
| S                          | 5,60         | 4239-02   |
| U <sub>i</sub>             | 5,25         |           |
| R <sub>o</sub> (old datum) | 0,48         |           |
| PCS                        | 4415 Kcal/kg |           |
| PCI                        | 4177 Kcal/kg |           |

**Tabella 6. Analisi dei macerali ed in particolare % di Vitrinite in alcuni carboni del Sulcis (campionamento del marzo 2005, carbone prelevato a – 400 m s.l.m.) e confronto con un campione di provenienza cinese**

| Campione | Vitrinite,, % |
|----------|---------------|
| Seam-1   | 93            |
| Seam-2   | 89            |
| Seam-3   | 85            |
| Seam-4   | 82            |
| Seam-5   | 100           |
| Seam-10  | 89            |
| Cina     | 76            |

**Tabella 7. Determinazione del coefficiente di riflettanza della vetrinite del carbone e composizione del gruppo macerale**

| Campione | Riflettanza Vitrinite |                 | Caratteristiche del riflettogramma |                    |        |  | Composiz. gruppo macerale (mmf) inertinite liptinite |      |      |      |
|----------|-----------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------|--------|--|------------------------------------------------------|------|------|------|
|          | Code                  | $\bar{R}_0$ , % | code                               | standard deviation | tipo   |  | Code                                                 | vol% | code | vol% |
| Seam-1   | 06                    | 0,67            | 0                                  | 0,03               | no gap |  | 0                                                    | 7    | 1    | 0    |
| Seam-2   | 06                    | 0,67            | 0                                  | 0,03               | no gap |  | 0                                                    | 0    | 3    | 11   |
| Seam-3   | 06                    | 0,68            | 0                                  | 0,05               | no gap |  | 0                                                    | 3    | 3    | 12   |
| Seam-4   | 06                    | 0,67            | 0                                  | 0,03               | no gap |  | 0                                                    | 0    | 4    | 18   |
| Seam-5   | 06                    | 0,67            | 0                                  | 0,03               | no gap |  | 0                                                    | 0    | 1    | 0    |
| Seam-10  | 07                    | 0,70            | 0                                  | 0,05               | no gap |  | 0                                                    | 0    | 3    | 11   |
| China    | 09                    | 0,90            | 0                                  | 0,03               | no gap |  | 2                                                    | 20   | G1   | 4    |

**Tabella 8. Determinazione della percentuale di componenti volatili, ceneri e zolfo totale (sul secco)**

| Campione | Crucible swelling number |        | Volatile Matter <i>daf</i> |      | Ash, dry (*) |       | S tot (dry seam) |       |
|----------|--------------------------|--------|----------------------------|------|--------------|-------|------------------|-------|
|          | code                     | Number | code                       | wt%  | code         | wt%   | code             | wt%   |
| Seam-1   | 0                        | 0      | 46                         | 47,8 | 12           | 12,2  | 76               | 7,63  |
| Seam-2   | 0                        | 0      | 48                         | 50,0 | 10           | 10,9  | 115              | 11,55 |
| Seam-3   | 0                        | 0      | 48                         | 49,7 | 23           | 23,13 | 103              | 10,37 |
| Seam-4   | 0                        | 0      | 44                         | 45,6 | 10           | 10,62 | 58               | 5,89  |
| Seam-5   | 0                        | 0      | 48                         | 55,6 | 16           | 16,8  | 48               | 4,87  |
| Seam-10  | 0                        | 0      | 48                         | 48,3 | 7            | 7,0   | 22               | 2,29  |
| Cina     | 0                        | 0      | 36                         | 37,8 | 11           | 11,72 | 02               | 0,24  |

(\*) Le ceneri sono state determinate con l'utilizzo della procedura standard ISO 1171:1997 (riscaldamento del carbone, dopo rimozione dell'umidità). Il riscaldamento avviene a  $815 \pm 10$  °C, dopo il quale viene determinata la perdita in peso.

**Tabella 9. Determinazione dell'umidità del carbone (superficiale, igroscopica e totale)**

| Campione | 30 °C<br>(umidità superficiale) | 106 °C<br>(umidità igroscopica) | Umidità totale |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|
| Seam-1   | 0,27                            | 4,35                            | 4,61           |
| Seam-2   | 0,51                            | 3,34                            | 3,83           |
| Seam-3   | 0,17                            | 3,66                            | 3,82           |
| Seam-4   | 0,44                            | 5,07                            | 5,48           |
| Seam-5   | 0,57                            | 5,43                            | 5,96           |
| Seam-10  | 0,4                             | 6,78                            | 7,15           |
| Cina     | 0,02                            | 1,75                            | 1,77           |

(\*) Il contenuto di umidità è stato determinato con la procedura DIN 51718

### Potenzialità CBM ed ECBM della Provincia Carbonifera del Sulcis

Le indagini sviluppata sui campioni di carbone Sulcis ha confermato quanto già riscontrato dai dati di letteratura. In particolare che la cinetica di adsorbimento è favorevole alla CO<sub>2</sub> piuttosto che al CH<sub>4</sub>. La velocità di adsorbimento diminuisce con l'aumento della taglia granulometrica, per entrambi i gas. L'equilibrio viene raggiunto ben prima per i carboni secchi rispetto ai carboni umidi. Il periodo di raggiungimento dell'equilibrio sarà minore se la temperatura diminuisce per ciascun gas. La velocità di adsorbimento sarà minore se la pressione diminuisce.

Una conseguenza importante che emerge da tali informazioni è che la maggiore velocità di adsorbimento della CO<sub>2</sub> rispetto al CH<sub>4</sub> sembra rendere concreta l'ipotesi di poter effettuare lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> negli strati profondi del bacino del carbone Sulcis mediante l'applicazione delle tecnologie ECBM.

È da rilevare tuttavia che, prove di adsorbimento sul carbone Sulcis effettuate con miscele di gas hanno messo in evidenza che l'adsorbimento selettivo non è sempre favorevole per la fase CO<sub>2</sub>. In particolare se si decidesse di iniettare direttamente il gas di scarico industriale (Flue Gas) tal quale (senza cattura della CO<sub>2</sub>) negli strati profondi del giacimento, risulterebbe necessario definire la composizione della miscela, in particolare il quantitativo di N<sub>2</sub> presente. Esso infatti influenza fortemente l'adsorbimento della CO<sub>2</sub>, dovuta alla competizione che si genera tra differenti gas nell'occupare i siti di adsorbimento.

Come mostrato dalle analisi e dai dati di letteratura, l'anidride carbonica è adsorbita maggiormente rispetto al metano nella matrice del carbone. Normalmente la superficie di un letto di carbone può immagazzinare, come minimo, approssimativamente due molecole di CO<sub>2</sub> per una di CH<sub>4</sub>. La misura esatta del rapporto di scambio (exchange ratio) viene determinata tramite test di laboratorio e simulazioni numeriche.

#### *Valutazioni sulle riserve CBM ed ECBM e sulle delle capacità di confinamento geologico della CO<sub>2</sub> nel Bacino carbonifero del Sulcis*

Per la valutazione delle riserve di CBM (Gas Producibile), due formule sono comunemente utilizzate:

$$GIP = A \times h \times \rho \times GC$$

dove: GIP = Gas in Place, milioni di metri cubi [Mm<sup>3</sup>]

A = Area [m<sup>2</sup>]

h = spessore netto [m]

$\rho$  = densità del carbone [t/m<sup>3</sup>]

GC = Contenuto in gas, è la quantità reale di gas adsorbito dal carbone per unità di massa [m<sup>3</sup>/t]

$$PG = GIP \times C \times R$$

dove: PG = Gas Producibile, milioni di metri cubi [Mm<sup>3</sup>]

C = Fattore di Completamento, è una stima della parte dello spessore cumulativo del carbone all'interno dello strato perforato che contribuirà alla produzione di CBM dipendente dallo spessore e dalla distanza tra letti di carbone separati

R = Fattore di Recupero della quantità di gas producibile (PG) da un letto a carbone. Tramite metodi industriali convenzionali di tipo CBM è previsto il recupero dal 20 al 60% del GIP, in funzione della caduta di pressione (depressurizzazione che libera il CBM verso la superficie). Mentre tramite l'applicazione di metodi CO<sub>2</sub>-ECBM il recupero è teoricamente del 100%.

I parametri utilizzati per il calcolo del GIP e del PG, sulla base dei dati preliminari al momento in possesso e dei risultati della ricerca bibliografica condotta, sono riportati in Tabella 10.

**Tabella 10. Elenco dei parametri e delle variabili utilizzate nella stima, di prima approssimazione, delle riserve CBM ed ECBM (PG) nonché delle capacità di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> nel Bacino carbonifero del Sulcis**

| Parametro                         | Unità             | Valore |
|-----------------------------------|-------------------|--------|
| Area Onshore                      | km <sup>2</sup>   | 228,7  |
| Area Offshore                     | km <sup>2</sup>   | 173,5  |
| Densità del carbone               | L/m <sup>3</sup>  | 1,55   |
| Spessore netto                    | m                 | 10,78  |
| Contenuto in Gas (GC)             | m <sup>3</sup> /t | 7-13*  |
| Fattore di completamento onshore  |                   | 0,50   |
| Fattore di completamento offshore |                   | 0,45   |
| Fattore di recupero per CBM       |                   | 0,5    |
| Fattore di recupero per ECBM      |                   | 0,9    |

\* dai valori dell'“eccesso di adsorbimento” (Excess Sorption) di CH<sub>4</sub> (e quindi dai relativi valori di adsorbimento assoluto) ottenuti da ETH di Zurigo, è stato calcolato un valore massimo di GC alle condizioni di serbatoio pari a 28 m<sup>3</sup>/ton. Precedenti studi, indicano che i letti di carbone aventi le stesse caratteristiche di quelle riscontrate per il carbone Sulcis, sono normalmente sotto saturi in metano oltre a trattenere una significativa imbibizione (per il carbone Sulcis si ha un'umidità del 5-7%) che generalmente inibisce la capacità di adsorbimento nel carbone stesso. Per quanto sopra, nella formula si utilizzerà un Contenuto in Gas (Gas Content =GC) pari a 7-13 m<sup>3</sup>/ton, valore medio di letteratura per questo tipo di carboni.

In Tabella 11 sono riportate le stime del PG del bacino carbonifero del Sulcis, calcolato considerando i valori di GC pari a 7 e 13 m<sup>3</sup>/t, previsti per il carbone Sulcis. L'area di interesse per l'applicazione delle tecniche ECBM è stata suddivisa “onshore” ed “offshore”, allo scopo di avere due differenti scenari da includere nello studio di economicità del progetto operativo.

**Tabella 11. Riserve CBM ed ECBM stimate nell'area di interesse per l'applicazione delle tecniche ECBM**

|                                         | Onshore |        | Offshore |       | Totale |        |
|-----------------------------------------|---------|--------|----------|-------|--------|--------|
| GC (m <sup>3</sup> /t)                  | 7       | 13     | 7        | 13    | 7      | 13     |
| PG stimate come CBM (Mm <sup>3</sup> )  | 6.687   | 12.419 | 4.566    | 8.480 | 11.253 | 20.899 |
| PG stimate come ECBM (Mm <sup>3</sup> ) | 12.037  | 22.355 | 8.219    | 15263 | 20.256 | 37.618 |

La seguente formula è utilizzata per calcolare la quantità di CO<sub>2</sub> che può essere immagazzinata in una strategia ECBM:

$$CO_2S = PG \times \rho_{CO_2} \times ER \times 10^{-9}$$

dove: CO<sub>2</sub>S = anidride carbonica che può essere immagazzinata nel sottosuolo [Mt];  
 PG = Gas Producibile in loco in metri cubi [m<sup>3</sup>];  
 $\rho_{CO_2}$  = densità standard della CO<sub>2</sub> (1,75 [kg/m<sup>3</sup>]);  
 ER = rapporto di scambio di CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>

Assumendo un rapporto di scambio di 2:1 ed un PG di circa 20.256 Mm<sup>3</sup> (Fattore di Recupero del 90% dal momento in cui la strategia ECBM è stata utilizzata) la quantità di CO<sub>2</sub> che può essere immagazzinata da uno schema ECBM risulta pari a 71 Mt.

$$CO_2S = 20.250 \times 10^6 \times 1.75 \times 2 \times 10^{-9} = 71 \text{ Mt}$$

Una volta che circa il 90% del CBM è stato recuperato, ulteriore CO<sub>2</sub> può essere iniettata per lo stoccaggio, grazie al fatto che il carbone ha un'elevata capacità di adsorbirla. Gli studi sperimentali dell'ETH hanno mostrato per il carbone Sulcis una capacità di adsorbimento di circa 45 m<sup>3</sup>/t. Con questo valore e la seguente formula si può stimare la CO<sub>2</sub> immagazzinata alla conclusione del processo ECBM.

$$CO_2S_{extra} = (A \times h \times \rho \times S \times \rho_{CO_2} \times C \times 10^{-3}) - CO_2S = 194 \text{ Mt}$$

dove: A = Area (402,2 x 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>)  
 h = spessore netto (10,78 m)  
 $\rho$  = densità del carbone (1,55 t/m<sup>3</sup>)  
 S = capacità di adsorbimento (45 m<sup>3</sup>/t)  
 $\rho_{CO_2}$  = densità standard della CO<sub>2</sub> (1,75 kg/m<sup>3</sup>)  
 C = Fattore di completamento, pari al 50%.

**Tabella 12. Capacità di stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub> nell'area di interesse per le applicazioni ECBM nel bacino del Sulcis**

|                                                                                                            | Onshore |        | Offshore |       | Totale |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|----------|-------|--------|--------|
| GC [m <sup>3</sup> /t]                                                                                     | 7       | 13     | 7        | 13    | 7      | 13     |
| PG [Mt]                                                                                                    | 20.250  | 37.618 | 20.250   | 37618 | 20.250 | 37.618 |
| CO <sub>2</sub> S<br>Capacità di stoccaggio di CO <sub>2</sub> in regime ECBM [Mt]                         | 42      | 78     | 29       | 53    | 71     | 132    |
| CO <sub>2</sub> S <sub>extra</sub><br>Capacità di stoccaggio oltre l'applicazione delle tecniche ECBM [Mt] | 108     | 72     | 85       | 61    | 194    | 133    |
| CO <sub>2</sub> S + CO <sub>2</sub> S <sub>extra</sub> [Mt]                                                |         |        |          |       | 265    |        |

Poiché il parametro CO<sub>2</sub>S indica la CO<sub>2</sub> che può essere immagazzinata nel carbone Attraverso operazioni ECBM, CO<sub>2</sub>S<sub>extra</sub> indica l'ulteriore quantitativo immagazzinabile oltre le tecniche ECBM. Pertanto la capacità di stoccaggio totale è di circa 265 Mt.

Il GIP e la trasportabilità del gas del reservoir (dipendente essenzialmente dalla sua permeabilità) risultano essere i due parametri che rivestono il più importante ruolo nel valutare una campagna di prospezione CBM:

Nella Tabella 12 (p. 57) sono riportate le quantità stimate della capacità di stoccaggio della CO<sub>2</sub> sia nel caso in cui GC è pari a 7 m<sup>3</sup>/t sia nel caso in cui GC è pari a 13 m<sup>3</sup>/t. Come per la valutazione del PG, l'area in studio è divisa in capacità di stoccaggio "onshore" ed "offshore", allo scopo di avere due differenti scenari da includere nello studio di economicità del progetto operativo.

Nella valutazione sopra riportata, la quantità totale di CO<sub>2</sub> immagazzinata non include i possibili stoccaggi dell'anidride carbonica in acquiferi salini probabilmente presenti al disotto del Produttivo come sembrerebbe indicare l'analisi del campione di acque rappresentativo denominato SUL 4.

#### *Applicazione delle tecnologie CCS agli impianti di generazione elettrica del Sulcis*

Attualmente, gli impianti di generazione elettrica situati nel Sulcis non rispettano i limiti di emissione di CO<sub>2</sub> stabiliti dal Piano Nazionale di Assegnazione ed è quindi necessario comprare altre quote o pagare la penale sulla CO<sub>2</sub> emessa oltre i limiti. E' pertanto importante valutare se l'applicazione della tecnologia ECBM agli impianti termoelettrici del Sulcis costituisca una valida alternativa all'acquisto di quote di emissione, nell'ipotesi che indagini più approfondite confermino i dati sulle potenzialità di produzione di gas metano e sulle capacità di stoccaggio di CO<sub>2</sub> nel bacino carbonifero. Sempre in tale ipotesi vengono inoltre esaminati gli eventuali vantaggi economici legati all'integrazione degli impianti di generazione elettrica con un'unità di separazione della CO<sub>2</sub> e la possibilità di iniettare quest'ultima nel giacimento di carbone tramite la tecnologia ECBM.

#### *Il territorio del Sulcis*

Le emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> nell'area del Sulcis sono riconducibili al polo industriale di Portovesme. In questa zona oltre ad alcune industrie per la produzione di allumina e prodotti semilavorati di alluminio con bassa emissione di CO<sub>2</sub>, che da sole non giustificano l'introduzione delle tecnologie CCS, sono presenti due impianti di generazione elettrica alimentati a carbone, che sono stati considerati in questa analisi. Oltre a questi due impianti, è stato considerato l'impianto Sarlux IGCC, situato vicino al bacino carbonifero Sulcis, e un nuovo impianto di generazione elettrica che probabilmente entrerà in funzione intorno al 2012.

I quattro impianti di generazione elettrica considerati in questo studio (la cui localizzazione è mostrata in Figura 53) sono:

- Sulcis SU3, gruppo da 240 MWe di proprietà dell'ENEL situato nell'area industriale di Portovesme; è stato progettato per poter funzionare a carbone o a olio combustibile; è in funzione dal 1986 ed è basato su un ciclo convenzionale a vapore; è dotato di un precipitatore elettrostatico, un sistema di desolfurazione dei gas combusti mediante assorbimento a umido con calcare e un sistema di denitrificazione di tipo SCR (Riduzione Selettiva Catalitica).
- Sulcis CFBC (Circulating Fluidised Bed Combustion), un impianto a combustione a letto fluido circolante da 360 MWe, di proprietà dell'ENEL, anch'esso situato nella zona industriale di Portovesme; la sua entrata in esercizio è avvenuta nel 2006.
- "Nuova Sulcis", impianto ultrasupercritico da 700 MWe che dovrebbe entrare in esercizio intorno al 2012 e che sarà alimentato da una miscela di carbone Sulcis con carbone d'importazione.

A questi si aggiunge un quarto impianto, più distante dal bacino carbonifero, il Sarlux IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), in opera dal 2000 ed è il più grande impianto IGCC al mondo (555 MWe); situato nella zona industriale di Sarroch (nella costa meridionale della Sardegna) è alimentato con il TAR prodotto nella raffineria Saras S.p.A.; l'impianto si divide in tre differenti sezioni: una sezione di gassificazione (basata sul processo Texaco), una sezione di trattamento del syngas (con produzione di idrogeno) e una sezione avanzata di generazione elettrica.

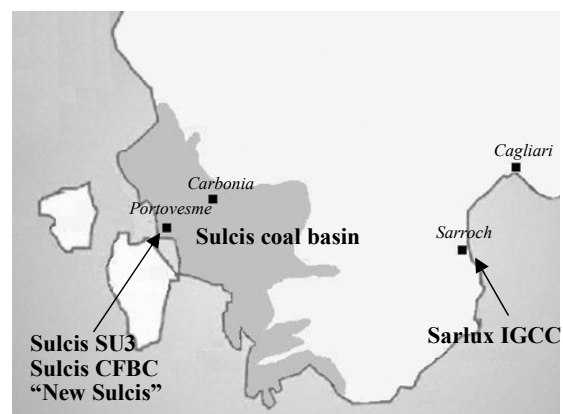


Figura 53. Il territorio del Sulcis e il bacino carbonifero

Come è stato più volte sottolineato, gli impianti presi in considerazione (compresa la “Nuova Sulcis”, della quale è stata recentemente effettuata un’analisi tecnologica ed economia preliminare) al momento non includono alcun sistema CCS.

La Tabella 13 mostra i principali parametri che caratterizzano gli impianti considerati.

**Tabella 13. Attuale configurazione degli impianti considerati**

|                                 | Sulcis SU3 | Sulcis CFBC | Sarlux IGCC | “Nuova Sulcis” |
|---------------------------------|------------|-------------|-------------|----------------|
| Potenza netta [MW]              | 240        | 360         | 555         | 700            |
| Rendimento [%] <sup>(a)</sup>   | 38%        | 38%         | 38%         | 44%            |
| Disponibilità [h/anno.]         | 6.500      | 7.700       | 8.000       | 8.000          |
| Produzione elettrica [GWh/anno] | 1.560      | 2.772       | 4.440       | 5.600          |

Nota: <sup>(a)</sup> Basato sul potere calorifico inferiore

#### Assunzioni e analisi

In accordo con il Piano Nazionale di Assegnazione delle quote, gli impianti considerati sono soggetti ai limiti di emissione mostrati in Tabella 14. In tabella è inoltre presentata la produzione annua di CO<sub>2</sub> di tali impianti. Per l’impianto Sarlux IGCC il limite di emissione ufficiale (3,66 Mt/anno) riguarda tutta la raffineria Saras; ma per questa analisi si considera un limite di 1,10 Mt/anno per il solo impianto IGCC. Per la “Nuova Sulcis” è stato considerato un limite di emissione di 1,30 Mt/anno. La produzione annuale di CO<sub>2</sub> mostrata in tabella può essere valutata considerando il sistema Sardegna-Italia perfettamente interconnesso e si riferisce alla situazione nel 2007, eccetto che per la “Nuova Sulcis”, le cui valutazioni si riferiscono al 2012 (anno di presunta entrata in esercizio).

L’analisi qui presentata si basa su una valutazione dei costi d’investimento per la separazione, compressione, trasporto e confinamento della CO<sub>2</sub> utilizzando la tecnologia ECBM (Enhanced Coal-Bed Methane) e di tutti i costi operativi che ne conseguono (come i costi derivanti dalla riduzione di potenza dovuta all’introduzione del sistema di separazione e il profitto derivante dalla produzione di metano); questi costi sono stati comparati con il costo delle quote di emissione di CO<sub>2</sub> che, nella situazione attuale, dovrebbero essere comprate.

**Tabella 14. Produzione stimata di CO<sub>2</sub> e limiti di emissione**

|                | Produzione CO <sub>2</sub> [Mt/yr.] | limiti emissione CO <sub>2</sub> [Mt/yr.] |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Sulcis SU3     | 1,74                                | 0,17                                      |
| Sulcis CFBC    | 2,35                                | 1,27                                      |
| Sarlux IGCC    | 3,51                                | 1,10                                      |
| “Nuova Sulcis” | 4,00                                | 1,30                                      |

#### Impianto di separazione della CO<sub>2</sub>

Come sistema di cattura della CO<sub>2</sub>, per tutti e quattro gli impianti (incluso l’IGCC Sarlux, nel quale la CO<sub>2</sub> deve essere separata dopo la combustione per poter mantenere l’attuale configurazione della sezione di potenza dell’impianto) si è considerato un processo di assorbimento con ammine, per la sua alta affidabilità e soprattutto perché è possibile introdurre il sistema in un impianto esistente senza dover fare grosse modifiche strutturali. Questo tipo di sistema comporta una riduzione della potenza erogata dall’impianto a causa dell’elevato consumo energetico del processo, in particolare della sezione di rigenerazione del solvente. La Tabella 15 mostra le principali assunzioni sul processo di separazione della CO<sub>2</sub>. In particolare sono riportati la riduzione di potenza (Kjaer, 2003) e i costi capitali per l’impianto di separazione (Metz et al., 2005).

**Tabella 15. Principali assunzioni sul processo di separazione della CO<sub>2</sub>**

|                                 | Sulcis SU3 | Sulcis CFBC | Sarlux IGCC | “Nuova Sulcis” |
|---------------------------------|------------|-------------|-------------|----------------|
| Solvente                        | MEA        | MEA         | MEA         | MEA            |
| Riduz. di potenza               | 20%        | 20%         | 20%         | 12%            |
| Effic. separaz. CO <sub>2</sub> | 85%        | 85%         | 85%         | 90%            |
| Costi capitali [€/kW]           | 720        | 720         | 380         | 540            |
| Costi capitali globali [M€]     | 172,8      | 259,2       | 210,9       | 378,0          |

È importante notare che per gli impianti esistenti è stata considerata un’efficienza di separazione della CO<sub>2</sub> relativamente bassa, pari all’85% (un piccolo aumento dell’efficienza di separazione comporta un elevato aumento dei costi capitali), mentre si può considerare un valore di efficienza del 90% (in accordo con l’attuale stato dell’arte di tale tecnologia) per la “Nuova Sulcis”. In ogni caso, come conseguenza dell’introduzione dei sistemi CCS, l’emissione di CO<sub>2</sub> è minore rispetto alla quantità concessa dalle quote. Inoltre, il costo capitale dell’impianto della “Nuova Sulcis” (540 €/kW) è più basso se paragonato con gli stessi parametri di un impianto esistente alimentato a carbone (720 €/kW per la Sulcis SU3 e la Sulcis CFBC). Anche per l’impianto Sarlux IGCC lo stesso parametro risulta essere più basso che per gli altri impianti considerati.

L’installazione del processo di assorbimento della CO<sub>2</sub> influenza in maniera significativa i costi di separazione e confinamento dell’anidride carbonica. Per questa ragione, in accordo con le attuali normative finanziarie, è stato considerato un piano di ammortamento a quota capitale costante (Pareschi, 1994), assumendo i parametri finanziari ed economici mostrati in Tabella 16.

**Tabella 16. Assunzioni economiche e finanziarie**

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| Vita utile del progetto [yr.] <sup>(a)</sup>               | 20  |
| Tasso di interesse                                         | 10% |
| Tasso di inflazione                                        | 2%  |
| Periodo di costruzione dell’impianto [mesi]                | 12  |
| Start-up, scorte e ricambi, royalties, ecc. <sup>(b)</sup> | 5%  |
| Costi di ingegneria <sup>(c)</sup>                         | 10% |
| Contingenze <sup>(c)</sup>                                 | 15% |
| Costi annuali operative e di manutenzione <sup>(b)</sup>   | 4%  |

Note:

<sup>(a)</sup> per l’impianto Sulcis SU3, operativa dal 1986, è stata considerata una vita utile del progetto pari a 8 anni;

<sup>(b)</sup> percentuale del costo dell’impianto;

<sup>(c)</sup> percentuale del costo dei componenti.

Per ciascun anno della vita utile del progetto, sono stati valutati i costi capitali (che sono dati dalla somma della quota capitale e degli interessi annui) e operativi, insieme ai costi dovuti alla mancata produzione elettrica per la riduzione di potenza, assunta pari a 3,9 c€/kWh (Metz et al., 2005), con un incremento annuale dell’1% (ENEA, 2004), e ai profitti dati dalla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> (risparmi economici dati dal mancato acquisto delle quote in difetto e i profitti risultanti dalla vendita delle quote in eccesso), considerando un prezzo base di circa 27 €/t per ogni quota di emissione di CO<sub>2</sub>.

### *Compressione e trasporto della CO<sub>2</sub>*

Si ipotizza che la CO<sub>2</sub> assorbita dall’impianto di separazione venga compressa a circa 12-14 MPa e trasportata, tramite CO<sub>2</sub>-dotto, dall’impianto fino al pozzo di iniezione. La tecnologia di compressione, basata su un compressore inter-refrigerato multistadio di tipo convenzionale, è abbastanza ben sviluppata e non necessita di ulteriori sviluppi per l’utilizzo con la CO<sub>2</sub>. Il trasporto della CO<sub>2</sub> mediante gasdotti è una tecnologia molto affermata, che utilizza i metodi costruttivi per un normale gas (gli unici potenziali problemi sono dati dalla corrosione della condotta e dalla presenza nel fluido di due fasi, liquida e gassosa) (Wong e Bioletti, 2002).



**Tabella 17. Costi annuali di compressione e trasporto della CO<sub>2</sub>**

|                                     | Sulcis SU3 | Sulcis CFBC | Sarlux IGCC | "Nuova Sulcis" |
|-------------------------------------|------------|-------------|-------------|----------------|
| Quantità CO <sub>2</sub> [Mt/anno.] | 1,48       | 1,99        | 2,98        | 3,60           |
| Lunghezza pipeline [km]             | 40         | 40          | 100         | 40             |
| Costi annui                         |            |             |             |                |
| Compressione [M€/anno]              | 4,44       | 5,98        | 8,95        | 10,81          |
| Trasporto [M€/anno]                 | 26,98      | 36,37       | 54,40       | 65,73          |

I costi di compressione e trasporto (inclusi i costi capitali delle infrastrutture e i costi operativi) sono stati assunti costanti per tutti gli anni di vita del progetto. Nello specifico, è stato considerato un costo di compressione di 0,75 c€/kg (Hendriks et al., 2004) (riferito a una concentrazione di CO<sub>2</sub> tra l'83 e il 97%). È stato anche assunto (Metz et al., 2005) un costo di trasporto di 1,4 c€/(t km), riferito a condotte di terra. I costi annui di compressione e trasporto della CO<sub>2</sub> sono mostrati nella Tabella 17, insieme alla lunghezza stimata per la condotta.

#### Stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>

In questa valutazione è considerato un costo di stoccaggio della CO<sub>2</sub> di 0,3 c€/kg (che non include il guadagno dato dalla produzione di metano) (Metz et al., 2005; Gunter, 2002). Inoltre, per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> stoccata, si è ipotizzato di poter estrarre circa 285 m<sup>3</sup> di metano (Amorino et al., 2005; Van Bergen et al., 2004). Infine, il valore del metano estratto può essere assunto pari a circa 6,4 c€/m<sup>3</sup>, con un incremento annuo medio del 3,2% (Chiesa, 2006).

Sulla base delle assunzioni summenzionate, è possibile valutare, per ogni anno di vita del progetto, il costo del confinamento geologico della CO<sub>2</sub> e il guadagno risultante dalla vendita del metano, così come mostrato nella Tabella 18.

**Tabella 18. Costi annui di stoccaggio della CO<sub>2</sub> e vendita del metano**

|                                                     | Sulcis SU3 | Sulcis CFBC | Sarlux IGCC | "Nuova Sulcis" |
|-----------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|----------------|
| Quantità di CO <sub>2</sub> confinata [Mt/anno]     | 1,48       | 1,99        | 2,98        | 3,60           |
| Quantità di metano estratto [Mm <sup>3</sup> /anno] | 421,5      | 568,3       | 850,0       | 1027,0         |
| Costi e ricavi annui                                |            |             |             |                |
| Confinam. CO <sub>2</sub> [M€/anno]                 | 4,44       | 5,98        | 8,95        | 10,81          |
| Vendita metano [M€/anno.] <sup>(a)</sup>            | 26,98      | 36,37       | 54,40       | 65,73          |

Nota: <sup>(a)</sup> I valori sono riferiti al primo anno di funzionamento dell'impianto di confinamento (2008).

Il bilancio globale economico e finanziario di ciascun investimento è dato dalla somma dei valori netti attualizzati (riferiti al primo anno di vita del progetto) dei seguenti termini:

- rata annuale dei costi capitali e operativi;
- costi annui di mancata produzione elettrica conseguente alla diminuzione della potenza erogata;
- ricavo annuo per la mancata emissione di CO<sub>2</sub>;
- ricavo annuo dato dalla vendita delle quote di emissione di CO<sub>2</sub>;
- costi annui di compressione della CO<sub>2</sub>;
- costi annui di trasporto della CO<sub>2</sub>;
- costi annui di stoccaggio della CO<sub>2</sub>;
- ricavi annui per la vendita del metano estratto.

Il valore attuale del profitto globale che sembrerebbe si possa ottenere con l'introduzione di un sistema di separazione e confinamento della CO<sub>2</sub> per i quattro impianti presi in considerazione è mostrato in Tabella 19, insieme al tempo di ritorno (pay-back time) del capitale investito e insieme al costo della mancata emissione di CO<sub>2</sub> (che non include il profitto dato dalla vendita del metano).

**Tabella 19. Bilancio finanziario globale**

|                                                  | Sulcis SU3 | Sulcis CFBC | Sarlux IGCC | "New Sulcis" |
|--------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| Vita utile progetto [anno]                       | 8          | 20          | 20          | 20           |
| Profitto globale [M€]                            | 44,7       | 200,3       | 434,3       | 569,5        |
| Pay-back time [anno]                             | 7          | 11          | 7           | 8            |
| Costi di mancata emissione CO <sub>2</sub> [€/t] | 40,76      | 36,32       | 31,93       | 29,82        |

Il valore attuale del profitto globale risulta positivo per tutti gli impianti, in particolare per l'impianto Sarlux IGCC e la "Nuova Sulcis", per via del più basso costo capitale legato all'introduzione dell'impianto di separazione della CO<sub>2</sub>. Tuttavia, il profitto che si ottiene dall'impianto Sulcis SU3 è molto basso e non appare quindi opportuno l'investimento, anche dal momento che il pay-back time è molto vicino alla vita utile del progetto.

Un altro risultato interessante di quest'analisi è la valutazione del costo della mancata emissione di CO<sub>2</sub>, che è il costo per la separazione, il trasporto e il confinamento dell'anidride carbonica (esclusi i profitti dati dalla vendita del metano e delle quote di emissione). Il costo della mancata emissione di CO<sub>2</sub> per l'impianto Sulcis SU3 non appare competitivo con il prezzo delle quote di emissione (27 €/t), sempre escludendo dalla valutazione la vendita del metano; questo conferma che tale soluzione non appare opportuna per questo tipo di impianto; d'altra parte, il costo della CO<sub>2</sub> separata dagli altri impianti è competitivo con quello delle quote di emissione (Metz et al., 2005; Wong e Bioletti, 2002; McKee, 2002).

Come già detto, il costo delle licenze è molto variabile; per questa ragione, è stata fatta un'analisi di sensitività per valutare gli effetti di questo parametro sul bilancio finanziario globale (Figura 54) e sul tempo di ritorno del capitale (Figura 55). A tale scopo, si è preso in considerazione un intervallo di variazione molto ampio (tra 10 e 35 €/t) per il costo delle quote di emissione.

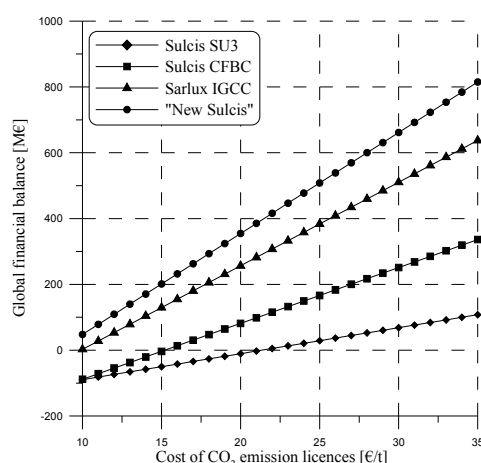


**Figura 54. Variazione del bilancio globale con il costo delle quote di emissione di CO<sub>2</sub>**

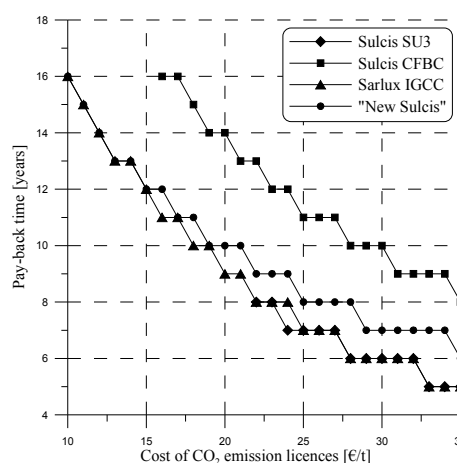


**Figura 55. Variazione del pay-back time con il costo delle quote di emissione di CO<sub>2</sub>**

In particolare, per gli impianti considerati l'analisi mostra un incremento quasi lineare del bilancio globale conseguente all'aumento del prezzo delle quote di emissione. È interessante notare che per la Sarlux IGCC e la "Nuova Sulcis" il bilancio finanziario è positivo anche per bassi valori del costo delle quote. D'altra parte, gli impianti Sulcis CFBC e Sulcis SU3 presentano un bilancio positivo solo quando il costo delle quote è più alto di 16 e 22 €/t, rispettivamente.

Con riferimento alla Figura 55, l'analisi mostra una forte influenza del costo delle quote sul pay-back time. Un aumento del costo delle quote comporta una riduzione di tale tempo conseguente al più elevato profitto dato dalla vendita delle stesse quote.

Si fa presente che lo studio tecnico preliminare (Amorino et al., 2005) condotto di recente sul bacino carbonifero, secondo cui sarebbe possibile produrre circa 285 m<sup>3</sup> per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> confinata, non è basato su studi in loco ma solo sull'applicazione di due differenti metodi empirici; perciò è stata fatta un'analisi di sensitività per valutare l'influenza della quantità specifica di metano prodotto (m<sup>3</sup> di metano estratto per tonnellata di CO<sub>2</sub> confinata) sul bilancio globale (Figura 56) e sul pay-back time (Figura 57) per gli impianti considerati.

L'introduzione di un sistema CCS basato sulla tecnologia ECBM negli impianti Sarlux IGCC e "Nuova Sulcis" è sempre conveniente anche con una bassa produzione di metano (70,4 e 52,1 m<sup>3</sup>/t rispettivamente). D'altra parte, l'investimento per l'impianto Sulcis CFBC può essere conveniente solo se la quantità di metano estratta è superiore a 136,9 m<sup>3</sup>/t. In fine, per quanto riguarda la Sulcis SU3 l'investimento è vantaggioso solo per una quantità di metano estratta pari a 204,7 m<sup>3</sup>/t.

Per quanto riguarda il pay-back time, la Figura 57 mostra una notevole influenza della quantità di metano estratto su questo parametro. Come ci si aspettava, gli impianti IGCC Sarlux e la "Nuova Sulcis" sono caratterizzati da valori del pay-back time compresi in un intervallo che va da 6 a 17 anni, da comparare con la vita utile del progetto che è di 20 anni; perciò, l'investimento per questi impianti può essere considerato conveniente anche con basse produzioni di metano. D'altra parte, l'impianto Sulcis CFBC è caratterizzato da un elevato tempo di ritorno del capitale e l'investimento non è proficuo se non si ha un certo valore di metano estratto. Infine, l'impianto Sulcis SU3 è caratterizzato da un pay-back time compreso tra i 6 e gli 8 anni, da comparare con la vita utile del progetto che è di 8 anni; perciò l'investimento non appare conveniente neanche per elevate produzioni di metano.

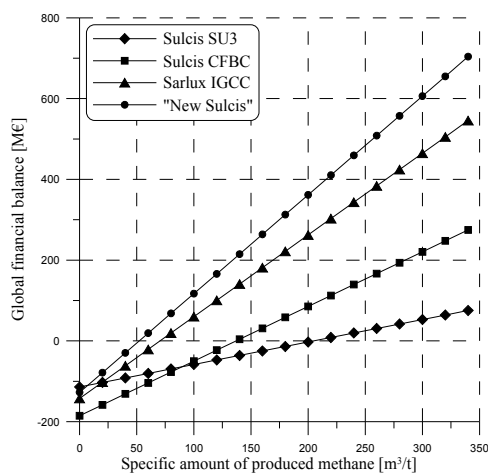


Figura 56. Variazione del bilancio globale con la produzione di metano

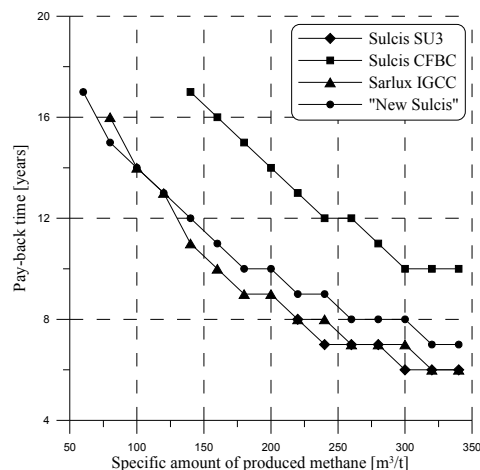


**Figura 57. Variazione del pay-back time con la produzione di metano**

Analisi tecnico-economica impianto zero-emissions con separazione e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>.

Parallelamente allo scenario presentato nel capitolo precedente è stata presa in considerazione una ulteriore applicazione delle tecniche ECBM nel Sulcis: un impianto integrato zero emission con potenza termica di 1500 MW, con captazione completa della CO<sub>2</sub> prodotta. Sono di seguito descritti gli aspetti impiantistici e le implicazioni economiche di tale progetto.

#### *L'impianto di generazione elettrica integrato con la miniera*

L'analisi dello stato dell'arte delle tecnologie di generazione elettrica su larga scala (tra 300 e 700 MWe) adatte all'applicazione nell'area del Sulcis ha individuate tre principali tipologie d'impianto: USPC (Ultra-Supercritical Pulverized Coal Combustion, impianti supercritici a polverino di carbone), PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion, combustione il letto fluido pressurizzato) e IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle, cicli combinati integrati con processi di gassificazione).

L'impianto USPC è basato su un boiler avanzato operante ad alta temperatura (con una pressione operativa di 250-280 bar e una temperatura di 580-600 °C). I gas combusti sono depurati in una linea di trattamento al fine di rimuoverne i principali composti inquinanti; in particolare un sistema di filtri a maniche opera la rimozione del particolato e un sistema SNOX per la rimozione catalitica combinata degli ossidi di azoto e zolfo. Nei processi SNOX lo zolfo contenuto nel gas è recuperato sotto forma di acido solforico ad alta purezza, mentre gli NOx sono ridotti ad azoto molecolare. Il processo non consuma acqua o altri materiali, fatta eccezione per l'ammoniaca utilizzata per la riduzione catalitica degli NOx; il sistema inoltre non genera alcuna fonte secondaria di inquinamento, come acque reflue, slurries o residui solidi (Schoubye et al., 2002).

L'impianto PFBC è basato su un ciclo a vapore sub-critico (operante alla pressione di 160-180 bar e alla temperatura di 550-560 °C). Il processo di combustione comprende una desolforazione "in situ" mediante sorbenti a base di calcio (con un rapporto Ca/S pari a circa 2, che corrisponde a una efficienza di rimozione degli SOx dell'83% circa); i gas reflui (caratterizzati da una pressione di 12-16 bar e da una temperatura di 800-900 °C) sono inviati a un ciclone, seguito da una turbina a gas, che produce circa il 15-20% dell'energia complessivamente prodotta. A valle della turbina a gas, i gas combusti sono inviati a un sistema di trattamento che comprende dei filtri a maniche per il completamento della depolverazione, un sistema FGD (Flue Gas Desulphurization) per la rimozione degli SOx e un sistema SCR (Selective Catalytic Reduction) per la separazione degli NOx.

Infine, l'impianto IGCC considerato è basato su un gassificatore a letto trascinato alimentato a slurry (processo di tipo GE/Texaco). Il syngas prodotto, alla temperatura di circa 1400 °C, è inviato a un sistema di syngas coolers (che producono vapore ad alta pressione) seguito da un wet scrubber per la rimozione delle polveri. I composti solforati (H<sub>2</sub>S e COS) vengono rimossi mediante un sistema di assorbimento convenzionale (tecnologia Selexol), con una efficienza di rimozione del 99%; i gas acidi sono trattati in un processo Claus/SCOT per il recupero dello zolfo elementare e il trattamento dei gas di coda. Infine, il syngas depurato è inviato al ciclo combinato, utilizzando una turbina a gas operante con un rapporto di compressione di 15-16 e con una temperatura di ingresso in turbina di 1300-1400 °C.

Per quanto riguarda il sito, la proposta è che l'impianto venga realizzato nei pressi della miniera di carbone, per ridurre drasticamente i costi di trasporto del carbone locale e delle ceneri, che possono essere confinate in modo permanente nelle vene esaurite di carbone (fatta eccezione per l'impianto IGCC, le cui ceneri sono totalmente inerti e possono essere riutilizzate nel settore edile).

la quantità di carbone locale utilizzato nell'impianto dovrebbe essere quanto più elevata possibile al fine di aumentare la produzione della miniera; ma d'altra parte, una quantità troppo elevata di carbone Sulcis (caratterizzato da un tenore di zolfo elevatissimo, dell'ordine del 6%) comporta un costo eccessivo per la riduzione delle emissioni di SO<sub>x</sub>. Pertanto, per il presente studio, è stato ipotizzato di alimentare l'impianto con una miscela composta per il 50% (in termini energetici) da carbone Sulcis e per il restante 50% da carbone d'importazione (caratterizzato da un tenore di zolfo non superiore allo 0,5-0,6).

La definizione della taglia dell'impianto è principalmente conseguenza dei limiti di emissione e della quantità di carbone Sulcis utilizzato. In particolare, considerando una disponibilità dell'impianto di circa 7500-8000 ore anno, si può assumere una taglia ottimale di 1500 MW termici, corrispondente a una potenza elettrica netta di 600-650 MW per le configurazioni impiantistiche convenzionali. Infine per tutte le tre configurazioni si è ipotizzato considerate di realizzare un impianto modulare composto da due gruppi identici.

I principali parametri operativi e le prestazioni dell'impianto, per le tre tecnologie considerate, sono riportati nella Tabella 20, con riferimento alla configurazione convenzionale (senza separazione della CO<sub>2</sub>) e alla configurazione "CO<sub>2</sub>-free", dotata di sistema CCS per la separazione e il confinamento della CO<sub>2</sub>.

**Tabella 20. Principali parametri operativi e prestazioni per le configurazioni in esame**

|                                                           | USPCC             |                  | PFBC              |                  | IGCC              |                  |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                                                           | Impianto convenz. | Impianto con CCS | Impianto convenz. | Impianto con CCS | Impianto convenz. | Impianto con CCS |
| Potenza termica [MW]                                      | 1500              | 1500             | 1500              | 1500             | 1500              | 1500             |
| Efficienza netta (sul PCI)                                | 43,0%             | 37,8%            | 42,0%             | 37,0%            | 41,0%             | 34,9%            |
| Potenza elettrica netta [MW]                              | 645,0             | 567,6            | 630,0             | 554,4            | 615,0             | 522,7            |
| Assorb sistema separazione CO <sub>2</sub> <sup>(a)</sup> | -                 | 12%              | -                 | 12%              | -                 | 15%              |
| Percentuale carbone Sulcis <sup>(b)</sup>                 | 50%               | 50%              | 50%               | 50%              | 50%               | 50%              |
| Disponibilità annua [h/anno]                              | 8000              | 8000             | 7500              | 7500             | 7500              | 7500             |
| Emissioni CO <sub>2</sub> [Mt/anno]                       | 4,13              | 0,41             | 3,87              | 0,39             | 3,87              | 0,39             |

<sup>(a)</sup> Con riferimento alla potenza netta della configurazione convenzionale (Parson, 2002; Rubin et al., 2004).

<sup>(b)</sup> In termini di contributo energetico.

L'introduzione del processo di separazione della CO<sub>2</sub> (basato su un sistema di assorbimento convenzionale basato su solventi chimici come la monoetanolamina) comporta una riduzione della potenza netta di circa il 12-15%, a causa dell'elevato assorbimento energetico, specialmente per la rigenerazione del solvente. Inoltre, mentre il sistema CCS applicato agli impianti USPCC e PFBC è di tipo post-combustione (operante sui gas combusti), nell'impianto IGCC esso opera sul syngas, a monte del processo di combustione. Pertanto, in quest'ultimo caso, la configurazione impiantistica di base dev'essere modificata con l'introduzione di un processo di water-gas shift (al fine di convertire il monossido di carbonio in CO<sub>2</sub>) a monte del processo di assorbimento dell'anidride carbonica; in tal modo il ciclo combinato risulta alimentato con un gas composto quasi esclusivamente da idrogeno.

### Emissioni

Per quanto riguarda le emissioni inquinanti e i residui solidi e liquidi, le tre tipologie d'impianto considerate sono caratterizzate da prestazioni fortemente differenti.

L'impianto USPCC è caratterizzato da una produzione non eccessiva di ceneri (circa 240.000 tonnellate annue) e di residui liquidi; in particolare, le ceneri possono essere confinate in modo permanente negli strati esausti del giacimento. Inoltre, il sistema di trattamento del gas basato sul processo SNOX consente una emissione estremamente limitata di NO<sub>x</sub> ed SO<sub>x</sub>.

L'impianto PFBC consente di ottenere emissioni inquinanti molto limitate, ma implica una grande produzione di ceneri e residui solidi (circa 750.000 tonnellate annue), come solfato e carbonato di calcio, derivanti dal processo di desolforazione "in situ" (Grammelis et al., 2002).

Infine, l'impianto IGCC, dotato di un processo convenzionale di trattamento del syngas, rispetto alle altre configurazioni impiantistiche, ha dei vantaggi in termini di emissioni inquinanti e residui solidi, circa 225.000 tonnellate annue; per via delle alte temperature del processo di gassificazione, le ceneri fuse vengono scaricate in un bagno d'acqua e il repentino raffreddamento provoca una solidificazione e vetrificazione delle stesse, che risultano essere completamente inerti e riutilizzabili ad esempio nel settore edile.

Come illustrato nella Tabella 21, le emissioni inquinanti sono simili per ciascuna delle configurazioni in esame. In ogni caso, dal punto di vista ambientale, l'elevata produzione di residui solidi rende la configurazione PFBC meno adatta rispetto alle configurazioni USPCC e IGCC.

La Tabella 21 mostra le emissioni globali di SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, particolato e monossido di carbonio per ciascuna delle configurazioni impiantistiche considerate.

**Tabella 21. Emissioni inquinanti**

|                 | USPCC                                     |                                                     | PFBC                                      |                                                     | IGCC                                      |                                                     |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                 | Emissione globale [t/anno] <sup>(a)</sup> | Concentrazione [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>(b)</sup> | Emissione globale [t/anno] <sup>(a)</sup> | Concentrazione [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>(b)</sup> | Emissione globale [t/anno] <sup>(a)</sup> | Concentrazione [mg/Nm <sup>3</sup> ] <sup>(b)</sup> |
| SO <sub>x</sub> | 2547                                      | 150                                                 | 2445                                      | 150                                                 | 1520                                      | 150                                                 |
| NO <sub>x</sub> | 339                                       | 20                                                  | 1019                                      | 63                                                  | 1013                                      | 100                                                 |
| Particolato     | 85                                        | 5                                                   | 81                                        | 5                                                   | 80                                        | 5                                                   |
| CO              | 1300                                      | 120                                                 | N.D.                                      | N.D.                                                | N.D.                                      | N.D.                                                |

Note:

<sup>(a)</sup> Riferito a una disponibilità annua dell'impianto di 8000 ore.

<sup>(c)</sup> Riferito a una disponibilità annua dell'impianto di 7500 ore.

<sup>(b)</sup> Riferito a una concentrazione di O<sub>2</sub> nei gas combusti pari al 6%.

### Analisi economica e finanziaria

L'analisi economica e finanziaria preliminare di ciascuna delle configurazioni impiantistiche considerate (con e senza separazione e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>) consente di valutare, per ciascun anno della vita dell'impianto, il flusso di cassa effettivo e attualizzato, quest'ultimo riferito al primo anno del finanziamento del progetto (ipotizzato ipoteticamente nel 2008).

La valutazione del costo capitale dell'impianto tiene conto delle principali fasi di costruzione e l'adattamento delle infrastrutture attualmente esistenti. È stato considerato un periodo di progettazione e costruzione della durata di quattro anni (dal 2008 al 2011). La valutazione del costo d'investimento per ciascuna configurazione impiantistica è riportata sinteticamente in Tabella 22.

**Tabella 22. Valutazione dei costi capitali**

| Costi capitali                               | USPCC            | PFBC             | IGCC             |
|----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Costo impianto <sup>(a)</sup>                | 944,5 M€         | 726,0 M€         | 993,9 M€         |
| Costi sistema CCS                            | 348,3 M€         | 340,2 M€         | 301,4 M€         |
| Material handling                            | 76,4 M€          | 76,4 M€          | 76,4 M€          |
| Altri costi <sup>(b)</sup>                   | 304,4 M€         | 282,5 M€         | 309,3 M€         |
| <b>TOTALE (imp. convenzionale)</b>           | <b>1325,2 M€</b> | <b>1084,9 M€</b> | <b>1379,6 M€</b> |
| <b>TOTALE (impianto CO<sub>2</sub>-free)</b> | <b>1673,5 M€</b> | <b>1425,1 M€</b> | <b>1681,0 M€</b> |

Note:

<sup>(a)</sup> Impianto convenzionale senza il sistema CCS.

<sup>(b)</sup> La voce include i costi per il rimodernamento della miniera e gli altri costi di investimento e imprevisti.

Una distribuzione dettagliata dei costi per l'impianto USPCC è mostrata in Tabella 23. L'investimento totale è composto dalla somma dei costi di apparecchiature, materiali, lavoro diretto e indiretto, ingegneria e contingenze. Fra le apparecchiature, il contributo maggiore deriva dal boiler ultrasupercritico, dalle turbine a vapore e dal sistema di depurazione del gas (che, globalmente, rappresentano oltre la metà del costo totale).

**Tabella 23. Distribuzione dei costi di investimento per l'impianto USPCC (U.S. DoE, 1999)**

|                               | Apparecchiature. | Materie      | Lavoro (diretto) | Lavoro (indir.) | Ingegneria   | Conting.      | TOT.          |
|-------------------------------|------------------|--------------|------------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|
| Movimentazione carbone        | 13,36            | 3,94         | 10,18            | 0,71            | 2,25         | 6,09          | 36,54         |
| Sistema di alimentazione      | 16,72            | 0,00         | 5,23             | 0,36            | 1,78         | 4,82          | 28,92         |
| Acque e BoP                   | 34,17            | 0,00         | 14,93            | 1,05            | 4,01         | 12,58         | 66,75         |
| Boiler e accessori            | 124,41           | 0,00         | 50,29            | 3,52            | 14,26        | 19,25         | 211,72        |
| Trattamento gas               | 66,00            | 0,00         | 37,01            | 2,30            | 8,43         | 10,68         | 124,42        |
| Ductwork and stack            | 18,58            | 0,55         | 13,78            | 0,96            | 2,71         | 5,67          | 42,25         |
| Turbina a vapore e generatore | 94,48            | 0,72         | 24,70            | 1,73            | 9,73         | 16,14         | 147,52        |
| Sistema di raffreddamento     | 15,46            | 8,04         | 14,62            | 1,02            | 3,13         | 7,54          | 49,82         |
| Movimentaz. ceneri e residui  | 11,55            | 0,15         | 21,12            | 1,48            | 2,74         | 5,62          | 42,67         |
| Apparecchiature elettriche    | 18,50            | 5,77         | 15,74            | 1,10            | 3,29         | 7,28          | 51,69         |
| Strumentazione e controllo    | 12,39            | 0,00         | 10,27            | 0,72            | 1,87         | 3,93          | 29,19         |
| Adeguamento sito              | 3,79             | 2,18         | 7,59             | 0,53            | 1,13         | 4,56          | 19,78         |
| Edifici e strutture           | 0,00             | 30,24        | 36,26            | 2,54            | 5,52         | 18,64         | 93,20         |
| <b>TOTALE</b>                 | <b>429,43</b>    | <b>51,60</b> | <b>261,74</b>    | <b>18,03</b>    | <b>60,86</b> | <b>122,81</b> | <b>944,47</b> |

Il costo capitale influenza in maniera significativa l'andamento del flusso di cassa dell'investimento. Pertanto tale costo è stato considerato congiuntamente al piano di ammortamento finanziario (Pareschi, 1994).

La Tabella 24 mostra le principali assunzioni di carattere economico e finanziario considerate nel presente studio. In particolare, è stato considerato un piano di ammortamento a rata costante (pari a 268,34 M€ per la configurazione USPCC) per una durata di otto anni.

**Tabella 24. Assunzioni economico-finanziarie (Porcu et al., 2007)**

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| Periodo di costruzione dell'impianto [anni] <sup>(a)</sup>       | 4   |
| Vita operativa dell'impianto [anni] <sup>(b)</sup>               | 25  |
| Durata del piano di ammortamento finanziario [anni]              | 8   |
| Tasso di interesse                                               | 7%  |
| Tassi di inflazione                                              | 2%  |
| Start-up, spare parts, royalties, working capital <sup>(c)</sup> | 5%  |
| Costi di ingegneria <sup>(d)</sup>                               | 10% |
| Contingenze <sup>(d)</sup>                                       | 15% |
| Costi annuali operative e di manutenzione <sup>(c)</sup>         | 4%  |

<sup>(a)</sup> Dal 2008 al 2011

<sup>(c)</sup> In percentuale rispetto al costo d'impianto

<sup>(b)</sup> Dal 2012 al 2036

<sup>(d)</sup> In percentuale rispetto al costo dei componenti

I costi operativi e globali dell'impianto sono la somma dei costi per l'estrazione del carbone Sulcis, per l'acquisto del carbone d'importazione, per il management e la manutenzione dell'impianto, per la movimentazione dei materiali e per le tasse. In particolare, i costi per l'approvvigionamento del combustibile costituiscono il 75% circa dei costi operativi totali, mentre i costi O&M (operative and maintenance) incidono per il 15% circa.

I costi per l'estrazione del carbone Sulcis non sono altro che i costi di gestione e manutenzione della miniera (ipotizzando che il gestore sia lo stesso dell'impianto di generazione elettrica). D'altra parte, per il carbone d'importazione è stato considerato un prezzo di 40 €/t, con un incremento annuo del 2% al fine di considerare l'attuale andamento dei prezzi.

I costi operativi e di manutenzione includono tutte le spese per la conduzione e la manutenzione dell'impianto e, in particolare, i costi della manodopera, delle manutenzioni "day-by-day", delle parti di ricambio, e così via.

#### Costi/profitti per l'acquisto/vendita delle quote di CO<sub>2</sub>

Il prezzo per l'acquisto o la vendita delle quote di CO<sub>2</sub> influenza notevolmente il flusso di cassa dell'investimento. Per le configurazioni impiantistiche di tipo convenzionale senza sistema di separazione e confinamento dell'anidride carbonica l'International Emissions Trading (IET) implica un costo per l'acquisto delle unità assegnate-AAUs (Assigned Amount Units); d'altra parte, se l'impianto è dotato di un sistema CCS, le emissioni di CO<sub>2</sub> sono



inferiori ai limiti consentiti e l'applicazione dei meccanismi dell'IET comporta un profitto per la vendita delle quote eccedenti.

In entrambi i casi, i costi o i profitti per gli scambi delle quote di CO<sub>2</sub> sono stati calcolati ipotizzando un prezzo medio delle AAUs pari a 25 €/t durante l'intera vita utile dell'impianto, oltre a una emissione costante di CO<sub>2</sub>. Pertanto, un decremento annuale dei limiti assegnati comporta, nel caso della configurazione impiantistica convenzionale, un aumento dei costi per l'acquisto delle AAUs (da 36 M€ nel 2012 a 52 M€ nel 2031, con riferimento alla tecnologia USPCC) oppure una riduzione del profitto (da 49 M€ nel 2012 a 35 M€ nel 2031) per l'impianto "CO<sub>2</sub>-free".

*Profitti per la vendita di energia elettrica e sottoprodotti*

L'energia elettrica prodotta dall'impianto viene in gran parte venduta alla rete nazionale e rappresenta il principale profitto dell'applicazione industriale. Inoltre, una parte della produzione energetica, pari inizialmente al 25% verrebbe utilizzata per contribuire alla richiesta energetica dell'area industriale del Sulcis.

Il profitto per la vendita di energia alla rete nazionale è stato calcolato con riferimento all'ordinanza CIP 6/92, che definisce il prezzo dell'elettricità sulla base dei "costi mancati". Inoltre, per i primi otto anni di attività produttiva dell'impianto (dal 2012 al 2019), il gestore della rete elettrica è tenuto a pagare un incentivo per la vendita di energia elettrica, in accordo al DPR 28/01/94. Il prezzo dell'energia elettrica venduta alla rete nazionale è mostrato in Tabella 25, con riferimento al primo anno di vita operativa dell'impianto (2012).

**Tabella 25. Prezzo dell'energia elettrica venduta al GSE**

|                              | Prezzo <sup>(a)</sup><br>[c€/kWh] |
|------------------------------|-----------------------------------|
| - Costi mancati impianto     | 2,27                              |
| - Costi mancati operative    | 0,79                              |
| - Costi mancati combustibile | 2,39                              |
| Costi mancati complessivi    | 5,45                              |
| Incentivo                    | 6,92                              |
| Prezzo complessivo           | 12,37                             |

Nota: <sup>(a)</sup> Riferito al primo anno di produzione (2012).

Dopo i primi otto anni (a partire dal 2020), quando il pagamento dell'incentivo per la vendita dell'energia elettrica viene sospeso, è comunque assegnato un leggero incentivo al prezzo dell'energia (0,74 c€/kWh, con riferimento al 2020), in accordo con il DPR 28/01/94.

Per quanto riguarda l'energia ceduta al mercato locale, il prezzo è stato calcolato considerando il costo marginale di produzione dell'energia, assunto pari ai costi variabili del progetto, e un *mark-up* corrispondente al 20% dei costi fissi. Globalmente, il prezzo dell'energia venduta al mercato locale è di 3,10 c€/kWh, con riferimento al 2012.

Ciascun termine componente il costo complessivo dell'energia elettrica ceduta al GSE e al mercato locale è stato calcolato per ciascun anno della vita utile dell'impianto, considerando un incremento annuo del 2%. L'andamento globale del profitto relativo a tale voce è mostrato in Figura 58, con riferimento alla configurazione convenzionale USPCC.

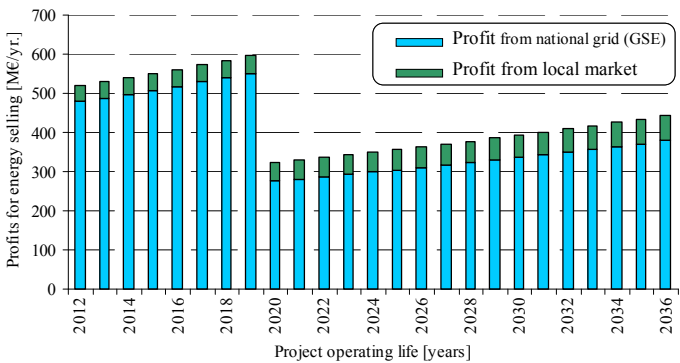


**Figura 58. Profitti derivanti dalla vendita di energia elettrica**

Gli impianti USPCC, PFBC e IGCC sono caratterizzati dalla produzione di differenti sottoprodotti, derivanti principalmente dalle sezioni di desolforazione: acido solforico, gesso e zolfo, rispettivamente. Nel presente studio, il profitto per la vendita di tali sottoprodotti è stato considerato, per semplicità, pari ai costi di movimentazione delle ceneri.

#### Costi e ricavi legati all'applicazione della tecnologia ECBM

Per quanto riguarda le configurazioni impiantistiche “CO<sub>2</sub>-free”, l'analisi dei flussi di cassa include anche i costi e i profitti legati all'applicazione della tecnologia ECBM.

Tale tecnologia comporta dei costi di investimento e operativi per la compressione, il trasporto e l'iniezione della CO<sub>2</sub> e un ricavo significativo legato alla vendita del metano estratto.

La CO<sub>2</sub> concentrata proveniente dall'impianto di separazione dev'essere compressa a 12-14 MPa (120-140 bar) e trasportata, mediante *pipeline*, ai pozzi di iniezione. La compressione avviene mediante compressori multistadio interrefrigerati, la cui tecnologia è matura e non richiede ulteriori sviluppi. Anche per quanto riguarda il trasporto, la tecnologia è matura ed è la stessa utilizzata per molti altri gas (Wong e Bioletti, 2002). I costi capitali e operativi di compressione e trasporto sono stati considerati costanti anno per anno; è stato ipotizzato un costo di compressione di 0,75 c€/kg (Hendriks et al., 2004) e un costo di trasporto di 1,4 c€/t-km (Metz et al., 2005). I costi annui di compressione e trasporto sono presentati in Tabella 26, insieme alla lunghezza stimata della *pipeline*. Un'analisi preliminare recentemente condotta nel bacino carbonifero del Sulcis (Amorino et al., 2005) conferma la possibilità di confinare una grande quantità di CO<sub>2</sub> (circa 200 Mt) negli strati profondi del bacino stesso. L'iniezione della CO<sub>2</sub> compressa (in fase liquida) può essere effettuata mediante tecnologie convenzionali, con un costo relativamente basso (Wong e Bioletti, 2002); nella presente analisi è stato considerato un costo di confinamento di 0,3 c€/kg (Metz et al., 2005; Gunter, 2002). Inoltre, per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> confinata, è possibile estrarre circa 285 m<sup>3</sup> di metano (Amorino et al., 2005; Van Bergen et al., 2004), il cui valore commerciale è stato assunto pari a 6,4 c€/m<sup>3</sup>, con un incremento annuo del 3,2% (Chiesa et al., 2006). Sulla base delle suddette assunzioni, è possibile stimare, per ciascun anno di attività dell'impianto, il costo del confinamento geologico dell'anidride carbonica e il profitto relativo alla vendita del metano estratto, come mostrato in Tabella 26.

**Tabella 26. Costi e ricavi annuali relative alla tecnologia ECBM**

|                                                    | USPCC | PFBC  | IGCC  |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Parametri di processo                              |       |       |       |
| Quantità di CO <sub>2</sub> confinata [Mt/anno]    | 3,72  | 3,48  | 3,48  |
| Lunghezza pipeline [km]                            | 5     | 5     | 5     |
| Produzione di metano [Mm <sup>3</sup> /anno]       | 1059  | 993   | 993   |
| Costi e ricavi annui                               |       |       |       |
| Costi compressione CO <sub>2</sub> [M€/anno]       | 27,88 | 26,14 | 26,14 |
| Costi trasporto CO <sub>2</sub> [M€/an no]         | 0,26  | 0,24  | 0,24  |
| Costi confinamento CO <sub>2</sub> [M€/anno]       | 11,15 | 10,45 | 10,45 |
| Ricavi per vendita metano [M€/anno] <sup>(a)</sup> | 79,37 | 74,41 | 74,41 |

Nota: <sup>(a)</sup> Valore riferito al primo anno di produzione dell'impianto (2012).

#### **Risultati**

L'analisi del flusso di cassa del progetto include, per ogni anno di attività dell'impianto, i costi capitali e operative, i ricavi dalla vendita di energia elettrica, i costi o ricavi, nel caso di impianto “CO<sub>2</sub>-free” per l'acquisto o la vendita delle quote di CO<sub>2</sub>. Inoltre, nel caso delle configurazioni impiantistiche dotate di sistema CCS, devono essere considerati anche i costi per la compressione, il trasporto e l'iniezione della CO<sub>2</sub> e i ricavi derivanti dalla vendita del metano estratto.

Il piano di ammortamento è stato distribuito in otto anni, corrispondenti al periodo di incentivazione per la vendita di energia al GSE. Pertanto, nel caso dell'impianto USPPC, tra l'ottavo e il nono anno di attività si può osservare, per la configurazione impiantistica convenzionale, un leggero decremento del flusso di cassa annuale (Figura 59) dato che la riduzione dei profitti per l'incentivo del GSE è superiore alla rata annua del piano di ammortamento. D'altra parte, nel caso della configurazione impiantistica dotata di sistema CCS, tra l'ottavo e il nono anno di attività si registra un notevole incremento del flusso di cassa; infatti l'introduzione del sistema CCS comporta un notevole aumento del costo capitale e della rata annua, la quale diventa preponderante rispetto all'incentivo per la vendita di energia elettrica al GSE (che diminuisce).

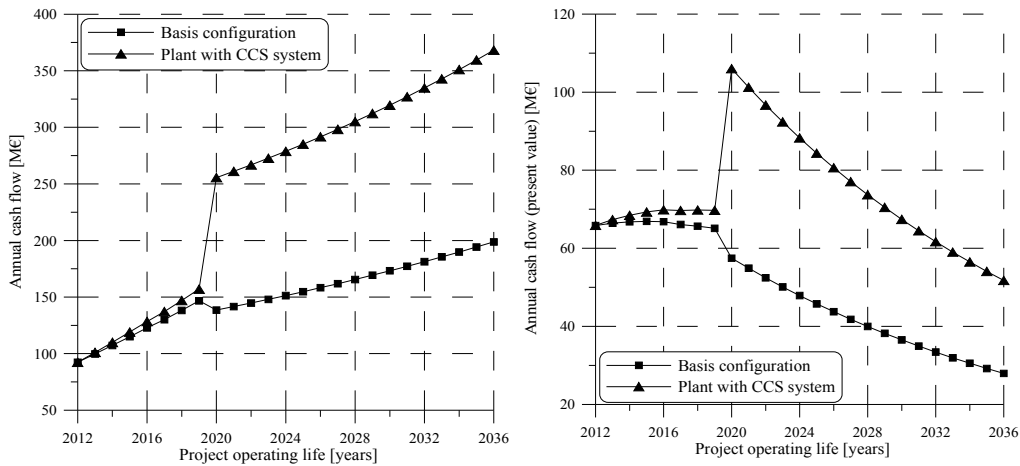


Figura 59. Impianto USPPC: cashflow effettivo ed attualizzato

Un andamento molto simile si ottiene anche per l'impianto PFBC (Figura 60), mentre nel caso dell'impianto IGCC (Figura 61) si ottiene, tra l'ottavo e il nono anno, un lieve incremento del flusso di cassa per entrambe le configurazioni impiantistiche (con e senza sistema CCS).

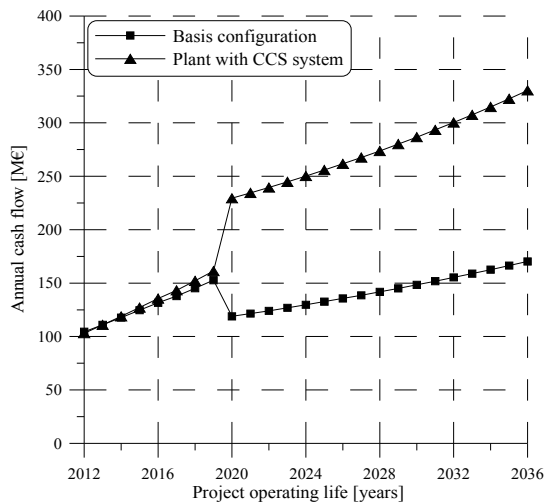


Figura 60. Impianto PFBC: cashflow effettivo

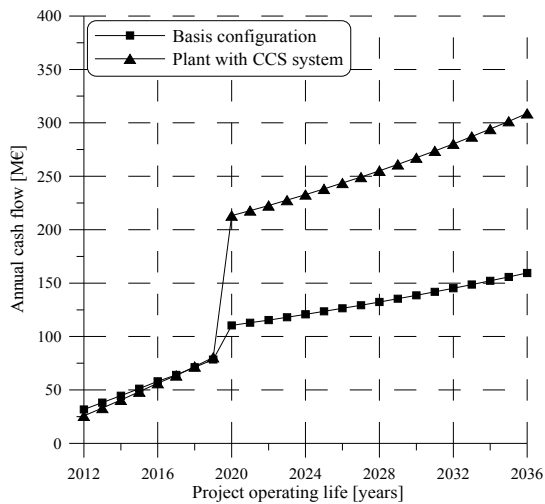


Figura 61. Impianto IGCC: flusso di cassa effettivo

Per ciascuna delle tecnologie considerate, le due differenti configurazioni impiantistiche con e senza sistema CCS può essere confrontata con riferimento a due parametri finanziari: il ricavo cumulativo alla fine della vita utile dell'impianto e il tempo di recupero del capitale (*payback time*). Il valore di tali parametri, per ciascuna configurazione in esame, è mostrato in Tabella 27, con riferimento a un prezzo medio delle AAUs assunto pari a 25 €/t. Sono inoltre riportati il costo per la produzione di energia elettrica (CoE, *cost of electricity*) e il costo di mancata emissione della CO<sub>2</sub>; il primo è il rapporto tra i costi capitali e operativi totali e l'energia elettrica

complessivamente prodotta nel corso della vita operativa dell'impianto, mentre il secondo rappresenta il costo specifico per la separazione, il trasporto e il confinamento della CO<sub>2</sub>.

**Tabella 27. Principali prestazioni economiche**

|                                                        | USPCC             |                  | PFBC              |                  | IGCC              |                  |
|--------------------------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                                                        | Impianto convenz. | Impianto con CCS | Impianto convenz. | Impianto con CCS | Impianto convenz. | Impianto con CCS |
| Ricavo globale cumulative [M€]                         | 3785              | 6222             | 3454              | 5745             | 2704              | 4794             |
| Payback time [anni]                                    | 13                | 12               | 11                | 11               | 19                | 16               |
| Costo dell'energia [c€/kWh]                            | 2,24              | 1,57             | 2,20              | 1,51             | 2,50              | 1,86             |
| Costi mancata em. CO <sub>2</sub> [€/t] <sup>(a)</sup> | -                 | 17,17            | -                 | 17,44            | -                 | 16,45            |

Nota: (a) Riferiti al valore attuale di ciascuna voce di costo.

L'analisi di tali risultati consente un primo confronto tra le tecnologie e le configurazioni individuate.

Per ciascuna tipologia d'impianto, l'aumento del costo capitale dovuto all'introduzione di un sistema CCS è ampiamente giustificato dall'aumento del profitto globale e da una riduzione del *payback time*; il costo dell'energia elettrica, nel caso delle configurazioni "*CO<sub>2</sub>-free*", è nettamente inferiore rispetto al caso delle configurazioni convenzionali. Inoltre, dalla Tabella 27 si vede che l'impianto USPCC risulta essere molto più redditizio rispetto alle tecnologie PFBC e IGCC; in particolare, la configurazione "*CO<sub>2</sub>-free*" consente un ricavo complessivo piuttosto elevato e un basso *payback time* (12 anni, rispetto ai 25 anni di vita utile dell'impianto), benché il costo dell'energia elettrica (1,57 c€/kWh) risulti essere leggermente più alto rispetto alle altre configurazioni impiantistiche.

Per quanto riguarda i costi di mancata emissione di CO<sub>2</sub>, l'analisi mostra un'ipotetica convenienza ad operare la separazione e il confinamento della CO<sub>2</sub> finché il prezzo delle AAUs rimane al di sopra di 18-20 €/t.

In conclusione è già possibile effettuare considerazioni in merito alle potenzialità ECBM della Provincia Carbonifera del Sulcis nell'ambito dello sviluppo di un progetto integrato di produzione di energia da carbone, con confinamento dell'anidride carbonica nel bacino carbonifero del Sulcis; e alla fattibilità tecnico-economica di realizzare un sistema integrato CCS che coinvolga sia gli impianti di generazione elettrica già presenti sul territorio sia gli impianti di futura realizzazione.

#### *Potenzialità ECBM del Bacino Carbonifero del Sulcis*

Relativamente alla applicazione delle tecniche di confinamento geologico della CO<sub>2</sub>, con conseguente produzione di metano si desume quanto segue:

Le informazioni raccolte confermano, a grandi linee, che lo sviluppo di un progetto di ricerca industriale per lo stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub>, adottando tecnologie ECBM nel bacino carbonifero del Sulcis come peraltro in altri bacini, risulta economicamente sostenibile in virtù dell'entrata in vigore dei meccanismi e degli obblighi derivanti dalla sottoscrizione del Protocollo di Kyoto.

La produzione di metano con l'applicazione e lo sviluppo di tecniche ECBM non costituisce ancora un'attrattiva commerciale come la sola produzione di gas naturale convenzionale. Infatti la velocità di produzione di CH<sub>4</sub> in un pozzo CBM (se pur incrementabile di un fattore 4 per effetto dell'applicazione della tecnologia ECBM) risulta di alcuni ordini di grandezza minore rispetto ad un buon pozzo di produzione di gas naturale.

Sulla base di esperienze maturate in altri siti (p.e. progetto Recopol), la tecnica ECBM si è mostrata abbastanza sicura per lo stoccaggio permanente della CO<sub>2</sub>.

Sulla base delle conoscenze acquisite sulle caratteristiche chimico-mineralogiche del carbone Sulcis e sulle prove di adsorbimento effettuate su campioni prelevati a meno 400 m, sono stati stimati, in via del tutto preliminare, quantitativi presunti di CO<sub>2</sub> immagazzinabile intorno ai 260 Mt, con un quantità di CH<sub>4</sub> recuperabile (come CBM ed ECBM) compresa tra 31.000 e 58.000 Mm<sup>3</sup>.

Per quanto indicato nel punto precedente e considerando le caratteristiche del carbone Sulcis, in particolare :

- gli attuali dati sperimentali a disposizione per il carbone Sulcis (riferiti attualmente a campioni prelevati a -400 m);
- il diagramma di Krevelen per i carboni “umici”;
- la classificazione del carbone come High volatile C bituminous;
- la prevalenza di macerali a vitrinite;
- il coefficiente di riflettanza della vitrinite (Ro) pari a circa 0,7 (ed in ogni caso maggiore di 0,45)
- il quantitativo di Materie Volatili (M.V.) compreso tra 38 e 55%.

risulta che il carbone Sulcis appare promettente per lo sviluppo delle tecniche CBM ed ECBM. Il fattore negativo di maggiore rilevanza risulta essere la sua elevata umidità, che potrebbe limitare sensibilmente la capacità di adsorbimento.

Il potenziale di generazione totale di gas (Potential Gas Generation) stimato in circa 200 ml/g di CH<sub>4</sub> (ad 1 atmosfera di pressione) può assumere valori superiori e più interessanti a profondità intorno a 800-1000 m.

Allo stato attuale, le caratteristiche litostratigrafiche (fino a -600 m.) e le conoscenze geochemiche dei fluidi indicano una buona capacità di assorbimento della CO<sub>2</sub> (determinato dall'effetto tampone nei confronti del gas acido iniettato) e di conseguenza buone potenzialità di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>.

Le caratteristiche geochemiche dei fluidi, con prevalente contenuto di NaCl, prive di SO<sub>4</sub>, dell'acquifero termale circolante nella Formazione del Calcare “Miliolitico” localizzato sotto gli strati di carbone, è molto promettente per la possibilità di trovare metano negli strati di carbone profondi del reservoir (compresi fra -800 e -1500 m), in analogia con casi simili studiati negli USA (Van Voast, 2005).

I nuovi dati geochemici dei fluidi, analizzati in questa fase del progetto, confermano l'importante ruolo della Faglia di S. Antioco. Essa separa in modo netto il bacino terziario (quindi anche il bacino carbonifero) a Sud della faglia suddetta, limitando fortemente lo sviluppo di tecniche CBM ed ECBM in questa direzione.

Le valutazioni economiche espresse nello studio, per quanto puramente indicative, suggeriscono che i benefici derivanti dalla realizzazione di un progetto industriale possano invogliare un coinvolgimento di capitali privati. Poiché questa fase preliminare di studio non è sufficiente per definire dettagliatamente le potenzialità reali della PCS, sono necessari ulteriori approfondimenti e indagini sulle caratteristiche del bacino alle profondità più promettenti di applicazione delle tecniche CBM-ECBM. Pertanto risulta essenziale passare attraverso una fase di sviluppo sperimentale che verifichi la fattibilità di un progetto CCS nell'area Sulcis (mediante lo sviluppo di attività di progettazione, realizzazione e sperimentazione di un impianto pilota).

#### *Realizzazione sistema CCS su impianti esistenti*

Come conseguenza dell'entrata in vigore del protocollo di Kyoto e dell'introduzione dell'International Emission's Trading (IET), le tecnologie di separazione e confinamento della CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Sequestration, CCS) stanno acquisendo un sempre maggiore interesse, soprattutto per la loro applicazione nel settore dei grossi impianti di generazione elettrica.

E' stata realizzata un'analisi tecnica ed economica preliminare sull'applicazione delle tecnologie CCS agli impianti di generazione elettrica situati (o in procinto di essere realizzati) nell'area del Sulcis o nelle aree immediatamente circostanti. In particolare, sono stati considerati quattro differenti impianti: un impianto a vapore convenzionale da 240 MW, alimentato a carbone; un impianto CFBC a carbone da 360 MW; un impianto IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) da 555 MW, alimentato con tar di raffineria; un impianto ultrasupercritico a carbone da 700 MW, che si prevede possa entrare in esercizio nel 2012.

L'analisi ha considerato la possibilità di installare, per ciascuno dei suddetti impianti, un sistema di separazione della CO<sub>2</sub> basato su un processo di assorbimento con ammine (operante, in tutti i quattro casi considerati, sui gas combustibili degli impianti), un processo convenzionale di compressione dell'anidride carbonica, un CO<sub>2</sub>-dotto per il trasporto del gas separato e la tecnologia ECBM (Enhanced Coal-Bed Methane) per il confinamento geologico della CO<sub>2</sub>.

L'analisi mostra che l'applicazione delle tecnologie CCS può essere estremamente redditizia per l'impianto Sarlux IGCC e per la centrale “Nuova Sulcis”, grazie agli elevati profitti globali (superiori a 400 M€ in 20 anni) e il pay-back time relativamente basso (7 e 8 anni, rispettivamente). Un guadagno inferiore può essere ottenuto per l'impianto CFBC dell'ENEL, che potrebbe consentire un profitto globale di circa 200 M€ con un pay-back time di 11 anni. Infine, l'investimento sul gruppo Sulcis SU3 appare inconvenientemente per il limitato profitto globale (circa 45 M€) e il pay-back time relativamente elevato (7 anni, da confrontarsi con gli 8 anni di vita utile del progetto).

Inoltre, a causa della forte instabilità del prezzo delle licenze di emissione e dell'incertezza della quantità di metano che si può estrarre per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> immessa, è stata effettuata un'analisi di sensitività allo scopo di valutare l'influenza di tali parametri sul profitto globale e sul pay-back time. In particolare, l'investimento sull'applicazione delle tecnologie CCS agli impianti Sarlux IGCC e "Nuova Sulcis" appare economicamente vantaggioso anche per bassi costi delle licenze di emissione (superiori a circa 10 €/t) o per una bassa produzione di metano (50-100 m<sup>3</sup> di metano per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub>). L'investimento sul gruppo Sulcis CFBC risulta essere meno conveniente dei precedenti, e richiede costi più elevati delle licenze di emissione (superiori a 15 €/t) o una maggiore produzione di metano (circa 150 m<sup>3</sup>/t). Infine, l'investimento sul gruppo Sulcis SU3 sembrerebbe essere economicamente vantaggioso solo con valori relativamente elevati del costo delle licenze di emissione (circa 22 €/t) e con una grande produzione di metano (200 m<sup>3</sup>/t).

### Realizzazione sistema CCS su impianti di nuova realizzazione

L'ipotesi di impianto di generazione elettrica ha considerato tre differenti configurazioni impiantistiche caratterizzate da emissioni inquinanti pressoché nulle: USGCC, PFBC e IGCC.

Per quanto riguarda il sistema CCS, è stato considerato un sistema ad assorbimento convenzionale della CO<sub>2</sub> con ammine e si è ipotizzato di applicare la tecnologia ECBM (Enhanced Coal Bed Methane) per il confinamento geologico dell'anidride carbonica.

L'analisi ha considerato, per ciascun anno di attività dell'impianto, il flusso di cassa annuo, calcolato come la somma dei principali costi e ricavi relativi alla costruzione e alla gestione dell'impianto. In particolare, i costi capitali e operativi, i costi (o ricavi) per l'acquisto (o cessione) delle quote di CO<sub>2</sub>, i ricavi per la vendita dell'energia elettrica e, nel caso delle configurazioni "CO<sub>2</sub>-free", i costi e ricavi per l'applicazione della tecnologia ECBM.

La valutazione preliminare ha considerato un prezzo medio della CO<sub>2</sub> di 25 €/t e, per le configurazioni impiantistiche dotate di sistema CCS, una produzione specifica di metano pari a 258 m<sup>3</sup> per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> confinata. Con riferimento a tali assunzioni, l'impianto USGCC consente un ricavo complessivo molto elevato (circa 3800 M€ per la configurazione convenzionale e circa 6200 M€ per la configurazione con CCS) e un payback time di 12-13 anni, da confrontarsi con i 25 anni di vita dell'impianto. Le prestazioni economiche relative alla tecnologia USGCC sono migliori di quelle che si potrebbero ottenere con le tecnologie PFBC e IGCC.

A causa dell'instabilità del prezzo delle AAUs e dell'incertezza sulla produzione specifica di metano mediante ECBM, è stata condotta una analisi di sensitività al fine di valutare l'influenza di tali parametri sui principali parametri economici e finanziari. In particolare, per i valori attesi di  $\mu$  (250-300 m<sup>3</sup>/t), l'introduzione di un sistema CCS può essere pertanto economicamente conveniente anche se il prezzo delle AAUs è piuttosto basso.

### Impianto sperimentale (Test Site)

Per definire la configurazione dell'impianto sperimentale ci si è basati sulla disposizione di impianti già esistenti.

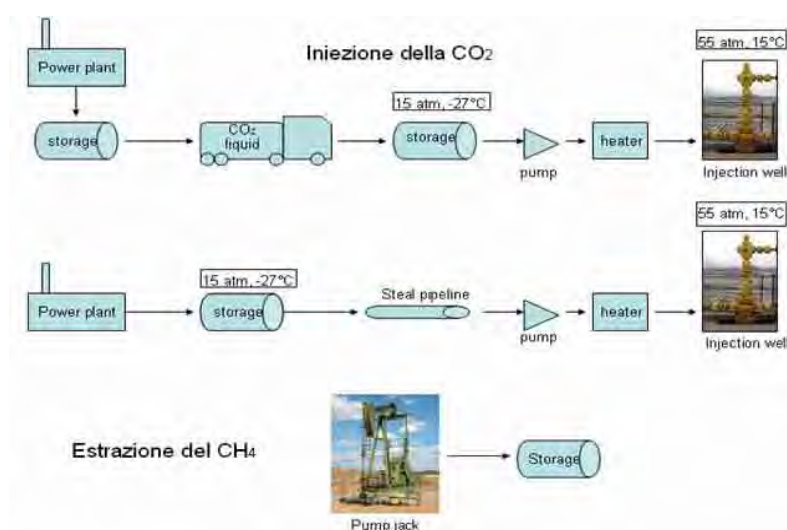


Figura 62. Tipica configurazione d'impianto pilota

Una volta che è stata decisa l'ubicazione del test site si passerà allo sviluppo del suo progetto che, nel caso più semplice, consisterà nella realizzazione di un pozzo di iniezione, uno di estrazione ed un impianto di pompaggio della CO<sub>2</sub> ed estrazione del CH<sub>4</sub>. La CO<sub>2</sub> prodotta dagli impianti di potenza individuati nell'area viene compressa e può essere trasportata nel sito ECBM-Test Site, mediante una tubazione dedicata (CO<sub>2</sub>-dotto) o trasportata mediante camion ed infine stoccata in apposito serbatoio in prossimità dell'impianto pilota.

In entrambe i casi la CO<sub>2</sub> si presenta allo stato criogenico (temperatura -

27 °C e pressione di 12-15 bar) e, prima dell'iniezione dovrà passare attraverso un impianto di trattamento.

Una tipica configurazione d'impianto per l'applicazione della tecnologia ECBM è mostrata in Figura 62 e prende in considerazione la CO<sub>2</sub> proveniente da un impianto di produzione energetica nei due casi sopra descritti.

L'impianto illustrato in entrambe i casi è costituito da una unità di pompaggio per l'iniezione della CO<sub>2</sub>, da un riscaldatore e dai sistemi di regolazione e controllo della pressione nonché dei sistemi di sicurezza contro le sovrappressioni. I sistemi presenti in questa configurazione consentono di garantire le condizioni di pressione e temperature necessarie al processo di iniezione e consentire una condizione supercritica della CO<sub>2</sub> all'interno del reservoir. Tali condizioni sono monitorate da un apposito pannello di controllo. In particolare il riscaldatore consente di aumentare la temperatura della CO<sub>2</sub> criogenica al di sopra di 10 °C, per evitare situazioni di stress all'interno del pozzo di iniezione, dovuti a fenomeni di contrazione/dilatazione delle tubazioni. La Figura 63 mette in evidenza quali sono i gradienti di pressione e temperatura (da accertare nel corso della perforazione) all'interno di un pozzo, che determinano le condizioni di iniezione della CO<sub>2</sub>. I gradienti T/P e la profondità del pozzo (quindi anche del reservoir), costituiscono i parametri essenziali che determinano le condizioni di stato supercritico in cui si deve trovare la CO<sub>2</sub> all'interno del reservoir per garantirne la stabilità.

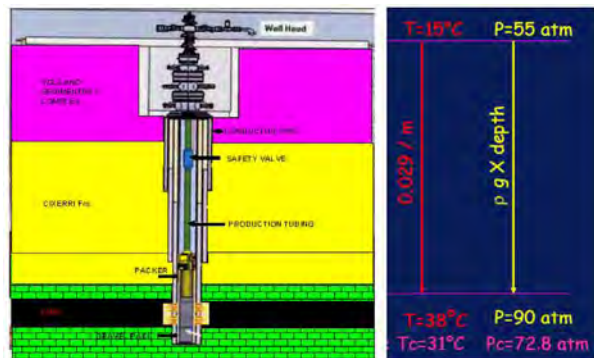


Figura 63. Schema esemplificativo di perforazione con condizioni d'esercizio ipotizzate ad 800 m di profondità

#### Stima dei costi di un impianto pilota (Test site)

L'incidenza maggiore sui costi di realizzazione di un test site sono imputabili alla realizzazione dei pozzi di iniezione ed estrazione.

Oltre i costi delle perforazioni, saranno considerati ulteriori costi riguardanti la compressione e il trasporto della CO<sub>2</sub>, così come indicato nello studio "Carbon capture and sequestration (CCS): a scenario for application of CCS technologies on power generation plants located in south-west Sardinia".

Un'incidenza minore sul totale dei costi è attribuita infine all'impianto pilota precedentemente descritto, costituito principalmente da un sistema di pompaggio e da un riscaldatore (Figura 62).

Infine sarà valutato il quantitativo totale di CO<sub>2</sub> stoccabile nel test site, sulla base di considerazioni già viste nello studio preliminare.

#### *Trivellazioni*

Sono stati considerati sia i costi di mercato delle perforazioni profonde, sia i dati acquisiti dallo studio Ecofys "Global carbon dioxide storage potential and costs". I costi di perforazione si possono considerare quantificabili in circa 1.000 € a metro, per un costo totale di 800.000 - 1.000.000 € a sondaggio (ipotizzando di realizzare perforazioni con profondità compresa tra gli 800 m e i 1.000 m).

Tenuto conto che la prima fase di avvio di un campo pilota ECBM prevede la realizzazione di un pozzo di iniezione di CO<sub>2</sub> e un pozzo per l'estrazione del CH<sub>4</sub>, il costo totale potrebbe essere stimato intorno ai 1,5-2 M€.

Tale importo, sulle base delle considerazioni fatte precedentemente, sarà moltiplicato per il numero di campi ECBM che si predisporrà nelle successive fasi del progetto.

#### *Compressione e trasporto della CO<sub>2</sub>*

In questo studio sono state prese in considerazione due ipotesi principali:

- nella prima si è ipotizzato l'approvvigionamento di CO<sub>2</sub> (da ditte specializzate) con trasporto in autocisterna;
- nella seconda è stato considerato l'impianto di generazione elettrica Sulcis CFBC di Portovesme come potenziale produttore di emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> (nell'area del Sulcis vicino al test site) ed approvvigionamento mediante CO<sub>2</sub>-dotto.

Con l'approvvigionamento di CO<sub>2</sub> da ditte specializzate e con trasporto in autocisterna, è stato considerato un costo medio della CO<sub>2</sub> pari a 2 €/kg (costi SIAD) e, supponendo di immagazzinarla in serbatoi di stoccaggio (ad



esempio da 5 m<sup>3</sup>) nell'area del test site, è possibile prevedere una campagna di test della durata di un anno per un quantitativo di CO<sub>2</sub> stoccata sino a 1000 t (es. progetto Recopol). I costi in questo caso si aggirerebbero attorno ai 2 M€.

**Tabella 28. Costi fornitura e trasporto ditta specializzata**

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Quantità CO <sub>2</sub> stoccata Mt/anno] | 0,1 |
| Costi annui fornitura e trasporto[M€/anno] | 2   |

Nel secondo caso considerato, l'impianto di generazione elettrica dovrà essere dotato di un opportuno sistema di cattura della CO<sub>2</sub> (come ad esempio il processo di assorbimento con ammine ritenuto ad alta affidabilità).

La CO<sub>2</sub> assorbita dall'impianto di separazione si ipotizza venga compressa e trasportata, tramite CO<sub>2</sub>-dotto, dall'impianto fino al pozzo di iniezione.

La tecnologia di compressione, basata su un compressore inter-refrigerato multistadio di tipo convenzionale, è abbastanza ben sviluppata e non necessita di ulteriori sviluppi per l'utilizzo con la CO<sub>2</sub>.

Il trasporto della CO<sub>2</sub> mediante gasdotti è una tecnologia molto affermata, che utilizza i metodi costruttivi per un normale gas (gli unici potenziali problemi sono dati dalla corrosione della condotta e dalla presenza nel fluido di due fasi, liquida e gassosa).

I costi di compressione e trasporto (inclusi i costi capitali delle infrastrutture e i costi operativi) sono stati assunti costanti per tutti gli anni di vita del progetto. Nello specifico, è stato considerato un costo di compressione di 0,75 c€/kg (riferito a una concentrazione di CO<sub>2</sub> tra l'83 e il 97%). D'altra parte, è stato assunto un costo di trasporto di 1,4 c€/(t km), riferito solo a condotte di terra (soluzione percorribile in uno stadio avanzato del progetto).

I costi annui di compressione e trasporto tramite CO<sub>2</sub>-dotto sono mostrati nella Tabella 29 insieme alla lunghezza stimata per la condotta.

La Tabella 29 mostra il costo annuo di compressione e trasporto della CO<sub>2</sub>.

**Tabella 29. Costi compressione e trasporto CO<sub>2</sub>-dotto**

|                                   | Sulcis CFBC |
|-----------------------------------|-------------|
| Quantità CO <sub>2</sub> Mt/anno] | 1,99        |
| Distanza dal test site [km]       | 15          |
| Costi annui                       |             |
| Compressione [M€/anno]            | 14,96       |
| Trasporto [M€/anno]               | 0,42        |

In conclusione è possibile stimare il costo totale annuo dell'impianto industriale per l'applicazione delle tecniche ECBM al carbone Sulcis

#### Caso 1

|               | Trasporto e Compressione | Perforazione Pozzi | Totale |
|---------------|--------------------------|--------------------|--------|
| Costi M€/anno | 2                        | 2                  | 4      |

#### Caso 2

|               | Trasporto e Compressione | Perforazione Pozzi | Totale |
|---------------|--------------------------|--------------------|--------|
| Costi M€/anno | 15,38                    | 2                  | 17,38  |

Sulla base dei dati sopra riportati si evidenziano gli alti costi di trasporto e compressione tramite CO<sub>2</sub>-dotto nella fase di test site che, tuttavia, saranno ammortizzati nei periodi successivi di sviluppo del campo ECBM.

Pertanto la soluzione migliore dal punto di vista economico nella fase iniziale di test, appare quella che prevede la fornitura di CO<sub>2</sub> con trasporto in autocisterna, anche per i modesti quantitativi utilizzati durante la sperimentazione.

#### Stima della CO<sub>2</sub> immagazzinabile nel test site

Come nello “Studio preliminare per l’applicazione di tecniche ECBM nel bacino minerario del Sulcis”, è stato stimato il quantitativo di CO<sub>2</sub> immagazzinabile nell’area del test site (stimata in 2,25 km<sup>2</sup>).

**Tabella 30. Capacità di stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub> nell’area del test site**

|                                                                                                            | TEST SITE   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| PG [Mt]                                                                                                    | 184         |
| CO <sub>2</sub> S<br>Capacità di stoccaggio di CO <sub>2</sub> in regime ECBM [Mt]                         | 0,41        |
| CO <sub>2</sub> S <sub>extra</sub><br>Capacità di stoccaggio oltre l’applicazione delle tecniche ECBM [Mt] | 1,10        |
| <b>CO<sub>2</sub>S + CO<sub>2</sub>S<sub>extra</sub> [Mt]</b>                                              | <b>1,51</b> |

PG = Gas Producibile in loco in metri cubi;

CO<sub>2</sub>S = Anidride Carbonica che può essere immagazzinata nel sottosuolo [Mt];

CO<sub>2</sub>S<sub>extra</sub> = indica l’ulteriore quantitativo immagazzinabile oltre le tecniche ECBM

#### Monitoraggio ambientale

Eventuali alte concentrazioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera possono essere associate o a fuoriuscite di CO<sub>2</sub> durante le fasi operative quali la cattura, il trasporto e l’iniezione in sottosuolo o al rilascio in atmosfera dal sito di stoccaggio.

Nel primo caso riguardante la cattura, il trasporto e l’iniezione della CO<sub>2</sub>, il problema è da considerarsi risolto, vista la possibilità di utilizzare tecnologie all’avanguardia. Nelle tubazioni utilizzate per il trasporto e per l’iniezione sono previste valvole di sicurezza che interrompono il flusso di gas al loro interno, nel caso in cui si registri una variazione di pressione dovuta alla rottura della tubazione.

I rischi in questa fase possono essere ulteriormente contenuti provvedendo ad utilizzare materiali anticorrosione, evitando in questo modo fuoriuscite incontrollate di CO<sub>2</sub>.

Le considerazioni sul rilascio della CO<sub>2</sub> dai siti nei quali viene stoccata, si basano esclusivamente su eventi naturali. Infatti la CO<sub>2</sub> è normalmente presente nel sottosuolo e le fuoriuscite sono correlabili ad attività vulcanica dove le concentrazioni della CO<sub>2</sub> al suolo dipendono dai fattori di dispersione in atmosfera.

E’ chiaro che la pericolosità della CO<sub>2</sub> è associata ad un rilascio molto rapido in spazi ristretti, tale da generare alte concentrazioni. Detto ciò il processo di iniezione in sottosuolo dell’anidride carbonica si basa su processi di diffusione nei livelli carboniferi, e le eventuali perdite sono lente e diffuse.

Per valutare possibili effetti dell’iniezione di CO<sub>2</sub> è necessario stabilire le condizioni iniziali, di base, che esistono prima dell’inizio delle operazioni. Pertanto saranno prelevati i campioni durante la fase iniziale delle perforazioni che saranno analizzati in laboratorio per determinare le condizioni della roccia intatta.

## **PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI**

In questa sezione vengono riportate le attività affidate a soggetti esterni coinvolti a diverso titolo, in questo caso rappresentati da Sotacarbo S.p.A., da quattro Dipartimenti universitari dell’Università di Cagliari e dal Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano.

**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 rientrano in quelle descritte precedentemente, e riguardano essenzialmente la verifica di fattibilità teorica e sperimentale di operare con CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

il **Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari** (DIMECA) disponendo delle conoscenze e competenze per lo sviluppo di attività di ricerca sulle tematiche di interesse del progetto stato coinvolto su attività che vanno a concentrarsi sulla verifica di fattibilità di operare con CO<sub>2</sub> e/o ricircolo dei prodotti di gassificazione e combustione come agenti gasificante. Ha operato principalmente sulla modellistica con codici commerciali basati sia su modellistica fluido dinamica numerica (CFD) che sull'analisi termodinamica.

Le attività svolte dal **Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Cagliari** sono andate a concentrarsi sullo sviluppo di temi riguardanti la cinetica dei sistemi di desolforazione a caldo del syngas e la rigenerazione dei sorbenti utilizzati in questo tipo di processi. Su un secondo versante si sono occupati della modellistica dei processi di adsorbimento della CO<sub>2</sub> e desorbimento del CH<sub>4</sub> nel carbone Sulcis a supporto dell'applicazione di tecniche ECBM nel bacino del Sulcis.

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 Geingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari che a livello nazionale rappresenta uno tra i più prestigiosi dipartimenti universitari che si è occupato e si occupa di ingegneria mineraria. 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. Oggetto delle attività di studio affrontate dal suo personale sono state da un lato la disamina delle tecnologie di monitoraggio e controllo di bacini di stoccaggio della CO<sub>2</sub> e dall'altro la caratterizzazione di miscele slurry di carbone.

Infine è stato coinvolto il **Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano**, oltre che per motivazioni di ordine scientifico anche sulla scia delle collaborazioni con ENEA già operanti ormai da diversi anni. In particolare, il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano è a livello nazionale uno tra i più prestigiosi dipartimenti universitari che si occupano di sistemi energetici avanzati con particolare attenzione alla produzione di energia elettrica da fonti fossili con cattura della CO<sub>2</sub>. Il suo contributo è risultato importante per via delle conoscenze teoriche e per la lunga esperienza accumulata nel campo della simulazione di sistemi complessi. Oggetto delle attività di studio presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano è stato da un lato la verifica di fattibilità e la simulazione di impianti integrati di generazione elettrica basati sulla gassificazione del carbone che utilizza CO<sub>2</sub> come agente gasificante e dall'altro l'analisi e la modellazione di sistemi di produzione elettrica basati sulla gassificazione del carbone che utilizza tecnologie di desolforazione a caldo del gas di sintesi prodotto.



## Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno

Nell'attuale quadro energetico internazionale assumono particolare rilevanza le politiche e le iniziative volte alla messa a punto 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 e aprire quindi la strada verso una possibile economia basata su questi due ultimi vettori energetici (elettricità e idrogeno).

L'Italia è fra i Paesi più 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 ed europeo 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 al passo con i tempi e coordinato con le iniziative europee ed internazionali. Molti progetti sono in corso, altri sono 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 sequestrazione (=separazione + stoccaggio definitivo) della CO<sub>2</sub> e si pone l'obiettivo di fondo di favorire l'integrazione delle varie iniziative in Italia – già avviate, in fase di definizione, oppure o in fase di proposta - allo scopo di consentire una più ampia ed efficace partecipazione del nostro Sistema-Paese ad importanti iniziative internazionali.

Le tecnologie per l'utilizzo del carbone in sistemi che prevedano la cattura ed il sequestro della CO<sub>2</sub> con concomitante produzione di idrogeno ed elettricità, sono attualmente entrate in una prima fase dimostrativa, che prevede un rilevante numero di iniziative internazionali per la realizzazione di impianti dimostrativi. Molte delle tecnologie necessarie per la cattura ed il sequestro della CO<sub>2</sub> sono già disponibili (ad esempio la gassificazione del carbone, la produzione di ossigeno, i reattori di shift, i processi di estrazione di gas acidi da miscele di gas) ed inoltre i programmi di ricerca e sviluppo hanno dato buoni risultati. Tali tecnologie possono quindi già oggi essere integrate con le moderne tecnologie già 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 emissioni di CO<sub>2</sub> prossime allo zero.

La UE ritiene che con un impegno continuo e definendo condizioni di mercato che rispecchino vincoli chiari e ambiziosi in termini di emissioni di carbonio, si potranno rendere praticabili sotto il profilo commerciale le tecnologie del carbone sostenibile nel giro di 10-15 anni. Ciò richiederà però coraggiosi investimenti industriali per finanziare una serie di impianti di dimostrazione, all'interno e all'esterno dell'UE, ed iniziative politiche connesse per un periodo relativamente prolungato, da adesso fino almeno al 2020, oltre che le necessarie attività di ricerca e sviluppo che, in un processo iterativo, dovranno seguire in parallelo tutta la fase di dimostrazione.

### 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, volte 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 CO<sub>2</sub> e con una parallela riduzione sensibile delle emissioni di macro e micro 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.

Contestualmente il progetto intende favorire il coordinamento e l'integrazione di diversi progetti condotti in Italia nell'ambito di programmi differenziati e con fonti di finanziamento diversificate (MIUR: FISIR e 297; MATT, Regioni, MAP) anche al fine di definire una "roadmap" italiana che tenga conto delle priorità dell'industria nazionale e delle scelte strategiche governative. Inoltre, la presente proposta progettuale ha l'obiettivo di favorire una più ampia, autorevole e qualificata partecipazione del sistema italiano impresa/ricerca ai grandi programmi ed iniziative europee ed internazionali quali Hypogen, i programmi FP7, CSLF, Futurgen e Implementino Agreement della IEA "Clean Coal Center".

Le attività del primo anno sono articolate in quattro obiettivi intermedi che prevedono:

#### **A. Studi e sperimentazioni preliminari sulle fenomenologie di gassificazione del carbone**

- Studio di cicli termodinamici innovativi  $H_2-O_2$  e  $H_2$ -aria arricchita: verranno analizzate le varie problematiche connesse alla gassificazione del carbone e la decarbonatazione del syngas, studiate varie configurazioni del ciclo innovativo Zecomix, con particolare riferimento ad un impianto pilota da 5 MWt oggetto di definizione e progetto all'interno dell'attività, e definite le attività sperimentali da laboratorio da effettuarsi;
- sperimentazione in piccola scala sulla gassificazione del carbone: verranno effettuate sperimentazioni su un impianto di gassificazione da laboratorio con vari rapporti aria/ossigeno e ossigeno/vapore per approfondire le conoscenze di base sulle fenomenologie di gassificazione del carbone e mettere a punto la modellistica a riguardo;
- sperimentazione in piccola scala per lo studio di tecnologie di cleaning del syngas: sullo stesso impianto verranno testate varie metodologie di gas cleaning, con particolare riferimento all'eliminazione del tar ed alla desolforazione "interna", realizzata direttamente all'interno del gassificatore immettendo, oltre al combustibile e al comburente, anche opportuni sorbenti basici ( come calcare o dolomite ) che provocano la formazione di solfuri, i quali vengono successivamente ossidati in solfati e scaricati insieme alle ceneri.

#### **B. Studi e sperimentazioni sulle tecnologie impiantistiche per la produzione di elettricità e idrogeno da syngas da carbone**

- Sperimentazione per lo studio del ciclo  $CaO-CaCO_3$  di separazione della  $CO_2$ : era stato previsto lo svolgimento sperimentazioni, in scala laboratorio, per approfondire le conoscenze di base sulle fenomenologie di carbonatazione dell'ossido di calcio e successiva calcinazione del carbonato;
- sperimentazione sulla combustione di  $H_2$  con lo svolgimento di sperimentazioni sulla combustione di idrogeno con ossigeno e vapore su un impianto sperimentale esistente (impianto IDEA);
- definizione ed progettazione di un dimostrativo innovativo completo di produzione di idrogeno ed elettricità con cattura della  $CO_2$ . L'attività riguarda lo studio di fattibilità ed il progetto concettuale di un impianto pilota da 5 MWt che dimostri la reale fattibilità di un ciclo completo composto da impianto di idrogassificazione, impianto di decarbonatazione e rigenerazione del sorbente in funzionamento continuo e produzione di idrogeno e/o elettricità mediante turbina a gas.

#### **C. Survey geologico e studi delle potenzialità di applicazione dell'ECBM nei giacimenti carboniferi del Sulcis**

Verranno effettuate, da Carbosulcis, test da laboratorio su materiali estratti durante le attività di trivellazione ai fini di una caratterizzazione geologica completa dei siti Sulla base delle attività suddette e di quelle svolte nell'ambito del tema 5.2.5.2, verranno approfonditi ed affinati gli studi delle potenzialità di applicazione dell'ECBM nei giacimenti carboniferi del Sulcis.

Allo scopo di valorizzare in ambito internazionale le attività svolte sulle tecnologie ECBM in Italia, verrà effettuata un'analisi complessiva dei vari risultati connessi a tali attività ai fini di concordare e coordinare le azioni necessarie sia per una partecipazione a progetti internazionali sia per la definizione delle attività future.

#### **D. Definizione Roadmap tecnologica italiana sulle tecnologie zero emission da carbone, costituzione della Associazione italiana sulla $CO_2$ . Attività di informazione tecnologica e divulgazione delle tecnologie**

L'obiettivo è di effettuare il punto della situazione italiana, dal punto di vista sia dello stato dell'arte impiantistico, sia delle attività di ricerca e sviluppo attualmente in corso, al fine di individuare le priorità del settore a livello nazionale e favorirne l'integrazione su scala mondiale (Advisor per MSE). Verrà effettuata a tal fine un'azione di coordinamento delle varie attività ed iniziative in Italia nel campo delle tecnologie di cattura della  $CO_2$  per la produzione di idrogeno ed elettricità da carbone, già avviate, in fase di definizione, oppure o in fase di proposta, allo scopo di consentire una più ampia ed efficace partecipazione del nostro Sistema-Paese alle importanti iniziative internazionali.

Verranno attuate una serie di azioni di carattere informativo e divulgativo, allo scopo di aumentare la conoscenza, attualmente assai limitata, sulle tecnologie CCS ed accrescere la consapevolezza sul fatto che è realmente possibile sia utilizzare combustibili fossili, in primis il carbone, adottando tecnologie in grado di separare la  $CO_2$  evitando che venga immessa in atmosfera sia garantire che la  $CO_2$  possa essere confinata mediante stoccaggio geologico, sicuro e per lunghissimi periodi.

### **A. Studi e sperimentazioni preliminari sulle fenomenologie di gassificazione del carbone**

**A1. Studio di cicli termodinamici innovativi H2-O2 e H2-aria arricchita ed analisi delle problematiche connesse al ciclo innovativo Zecomix**

L'attività svolta è ha riguardato due fasi: una di modellazione stazionaria di impianto, con la messa a punto accurata dei modelli dei componenti più innovativi, ed in particolare del gassificatore di carbone ad ossigeno ed del reattore di reforming/decarbonatazione alimentato a metano e ossido di calcio; l'altra di modellazione dinamica, per entrare nel dettaglio di funzionamento del reattore di reforming/decarbonatazione essendo questo alimentato con una carica "batch" di sorbente e quindi con funzionamento estremamente dipendente dall'esaurimento della carica. Si espongono di seguito, i risultati più significativi del lavoro svolto.

Nella I fase è stato effettuato uno studio teorico approfondito delle modalità di funzionamento dell'impianto sperimentale Zecomix (il cui schema semplificato è mostrato in Figura 64), ed in particolare dell'idrogassificatore, del gassificatore ad ossigeno e del carbonatore e messo a punto un simulatore di impianto (Figura 65) che è stato poi utilizzato per approfondire le condizioni di funzionamento anche off-design, ponendo in evidenza l'influenza dei diversi parametri operativi di impianto e permettendo in tal modo di individuare i criteri per l'impostazione delle future campagne sperimentali. Lo stesso simulatore sarà poi utilizzato per simulare l'impianto da 5 MWt funzionante in pressione ed in condizioni vicine a quelle del ciclo teorico che è oggetto dell'attività dell'obiettivo B.

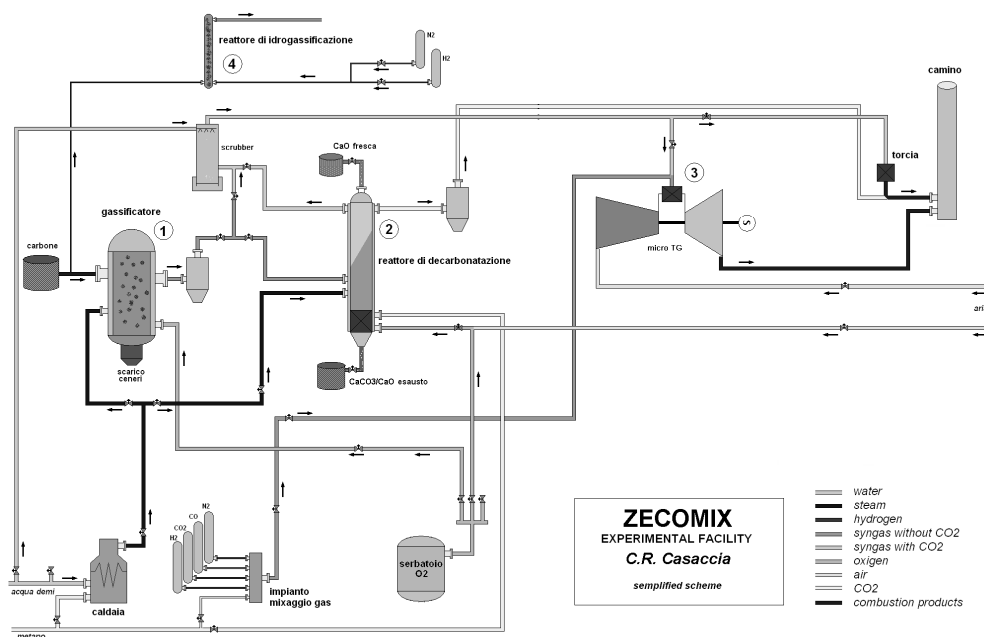


**Figura 64. Schema semplificato dell'impianto sperimentale Zecomix**

L'indagine sulla sezione di gassificazione, ha innanzitutto evidenziato i ruoli svolti dai due agenti gassificanti, l'ossigeno ed il vapore, sull'equilibrio delle reazioni e l'influenza delle loro portate sul processo di conversione energetica del carbone, determinando sia la composizione e la temperatura del syngas uscente che il suo contenuto energetico totale.

La temperatura e la composizione di uscita del syngas è importante anche in relazione all'accoppiamento con il reforming/decarbonatore e quindi al funzionamento di quest'ultimo.



Lo studio delle condizioni di fluidizzazione del letto ha portato poi alla determinazione dei diametri delle particelle di carbone e di sabbia nei diversi regimi di alimentazione del gassificatore così da avere una velocità di fluidizzazione delle particelle stesse compresa tra la velocità di minima fluidizzazione e quella di trascinamento.

L'analisi sulla sezione di Decarbonazione e Steam Reforming ha in seguito evidenziato come la portata di metano, attraverso l'azione di assorbimento di calore rilasciato dalla reazione di cattura della  $\text{CO}_2$ , influisca indirettamente sull'efficienza della cattura stessa.

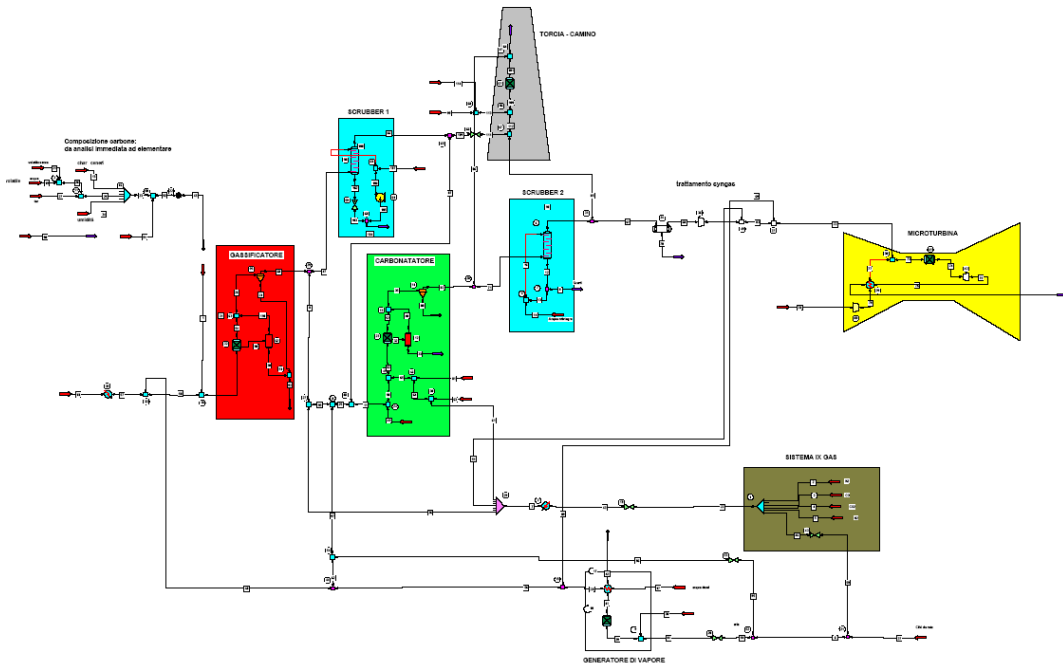


Figura 65. Sinottico simulatore della Piattaforma Sperimentale Zecomix

In particolare, si è visto come contenendo la temperatura nell'intorno di 600 °C mediante opportuna portata di metano, il decarbonatore sia in grado di assorbire circa il 90% della portata di moli di Carbonio in ingresso e rilasciare un syngas con concentrazione di Idrogeno pari a circa il 95% (su base secca).

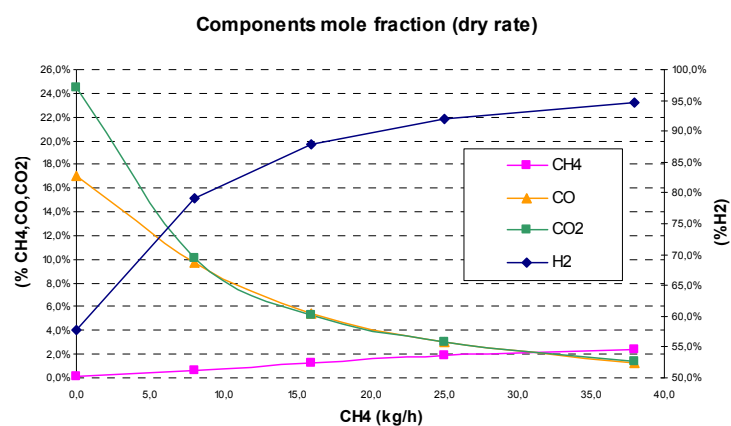


Figura 66. Andamento della composizione del syngas uscente, al variare della portata di metano

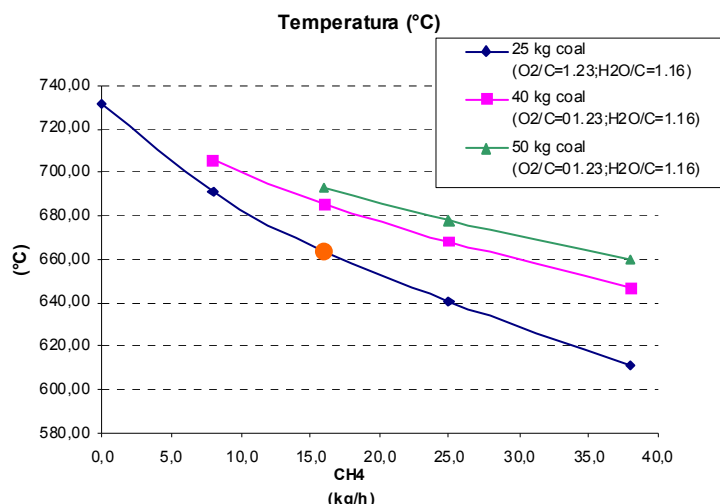


Figura 67. Andamento della temperatura al variare della portata di metano

Le variazioni rispetto al caso di riferimento per tale componente dell'impianto, sia nelle portate che nelle composizioni del syngas entrante, hanno poi consentito di capire la dinamica di interconnessione esistente tra il sottosistema di gassificazione e quello di cattura della CO<sub>2</sub>.

I parametri fondamentali da cui dipende tale fenomeno sono rappresentati dalla variazione del contenuto di monossido di carbonio e dalla temperatura del syngas da gassificazione, grandezze, come detto, dipendenti in particolare dalla portata di ossigeno in ingresso al gassificatore.

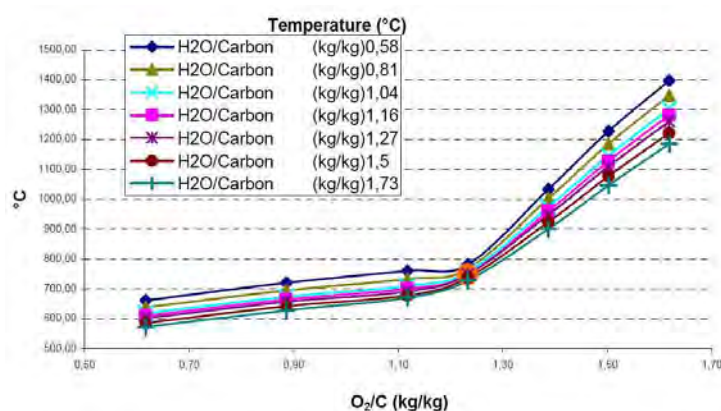


Figura 68. Andamento della temperatura di uscita gassificatore al variare di O<sub>2</sub>/C e H<sub>2</sub>O/C

Alle basse portate di quest'ultimo si ottiene un syngas povero di CO a causa delle minori reazioni di gassificazione che necessitano di sviluppo di calore. Il processo di cattura risulta più efficiente a causa, ovviamente del minor calore complessivamente sviluppato da tali reazioni.

Per portate di ossigeno maggiori di quelle nominali, invece, la temperatura del syngas risulta più elevata e determina un'inevitabile scadimento delle prestazioni.

Altro aspetto interessante emerso è che all'aumentare della portata di metano (e vapore), oltre alla cattura, aumenta in proporzione la resa di idrogeno nel syngas uscente, mentre il metano residuo resta comunque contenuto (la concentrazione percentuale di metano residua subisce al massimo un incremento del 2,5%). Questo è indice di buona tendenza del processo verso la produzione di syngas ad alto contenuto d'idrogeno.

I limiti alle portate di metano e di vapore (necessario al reforming) hanno tenuto conto delle esigenze di fluidizzazione del letto, per non avere eccessivo trascinamento, ma soprattutto dei tempi di residenza del gas all'interno del reattore che non possono essere eccessivamente ristretti, altrimenti l'ossido di calcio non avrebbe il tempo necessario per reagire.

Dal modello messo a punto per il calcolo del tempo effettivo di buona cattura dell'anidride carbonica nel parte del letto, si è infine stimato in 35-40 min circa il regime di buon funzionamento del Decarbonatore. Questo valore è assunto come limite entro cui i valori ottenuti dalle relative simulazioni saranno prossimi a quelli reali.

Nella seconda fase di lavoro è stata approntato un modello dinamico del reattore sperimentale di decarbonizzazione dell'impianto Zecomix. Tale modello, sviluppato in ambiente Matlab, ha lo scopo di studiare il comportamento del reattore durante l'evoluzione temporale della fase di decarbonizzazione e determinare, in tal modo, le condizioni operative del reattore al variare del tempo e delle condizioni iniziali dello stesso. Si sintetizzano, di seguito, i principali risultati dell'attività, ed in particolare il confronto tra i risultati del modello teorico definito per la particella di sorbente (modello a grani) e i risultati sperimentali (riportati nel paragrafo B1, relativo all'attività sperimentale).

Per lo studio della reazione gas-solido è stato utilizzato un modello a grani, nel quale la superficie per unità di volume di solido è supposta proporzionale al numero di grani di carbonato di calcio, supposti di forma sferica, contenuto in quel dato volume.

In tal modo la velocità di cattura dell'anidride carbonica è:

$$\mathfrak{R}_{\text{cbn}} = N_{\text{Oca}} \frac{dX}{dt} = \frac{k\sigma_{\text{O,CaO}}(1-X)^{\frac{2}{3}}(C_A - C_{Ae})}{1 + \frac{k}{D_{\text{pl}}} \cdot \frac{1}{2} \delta_{\text{CaO}} \sqrt[3]{1-X} \left[ 1 - \sqrt{\frac{1-X}{1+X(Z-1)}} \right]}$$

Nel modello a grani preso in considerazione si è supposto che il prodotto solido della reazione di carbonatazione si depositi sulla superficie di ogni singolo grano che costituisce la struttura della particella di dolomite calcinata. Si ipotizza inoltre che il singolo grano reagisce con l'anidride carbonica secondo il modello cinetico di reazione progressiva e che il carbonato di calcio si depositi sul cuore del grano non reagito mantenendo inalterata la forma sferica del grano stesso.

Nel modello a grani si fa l'ulteriore ipotesi che il prodotto solido della reazione di carbonatazione, durante la cattura di CO<sub>2</sub>, cambia la propria struttura. La scelta di introdurre il cambiamento strutturale è legato al fatto che è stata osservata una riduzione della conversione finale anche per particelle di 165 µm per le quali è difficile immaginare che la diffusione nei pori diventi il meccanismo controllante soprattutto se si tratta di dolomite dove l'ossido di magnesio non reagisce.

L'introduzione del cambiamento strutturale della particella di sorbente implica una diminuzione della diffusività effettiva nel layer del carbonato di calcio. Si è proposto per il coefficiente di diffusività la seguente relazione:

$$D_{\text{pl}} = D_{\text{pl0}} \cdot \exp(-aX^b)$$

dove  $a$  è detto *decay parameter* mentre  $b$  è un parametro di fitting del modello. Per i punti sperimentali riportati in Figura 68 e per il solo caso a 700 °C, otteniamo i seguenti valori:

**Tabella 31. Parametri di fitting dei punti sperimentali**

|         |      |
|---------|------|
| $a [-]$ | 12,4 |
| $b [-]$ | 1,45 |

Con i dati riportati in Tabella 31 si sono ottenuti i risultati numerici riportati in Figura 69:

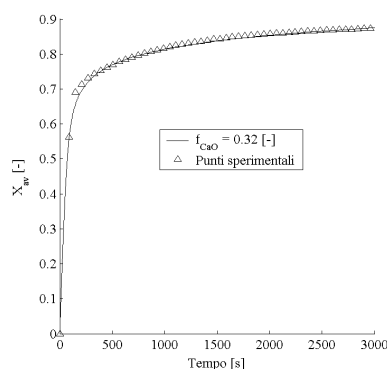


**Figura 69. Confronto dei risultati numeri e dei punti sperimentali a 700 °C**

Come si vede in Figura 69 si ha una buona sovrapposizione dei risultati numerici ai punti sperimentali.

Utilizzando il modello descritto, è stato realizzato il modello del reattore catalitico di carbonatazione, basandosi sulle equazioni di Xu-Froment per la modellizzazione delle reazioni catalitiche (steam reforming e CO-shift).

In particolare, le fasi del processo di modellazione sono state le seguenti:

1. calcolo della carica di dolomite, del catalizzatore e della portata molare elaborata dal reattore di carbonatazione;
2. implementazione del modello di Xu-Froment;
3. implementazione del modello a grani;
4. scrittura delle equazioni di bilancio di materia ed energia;
5. adimensionalizzazione delle equazioni che reggono il modello;
6. integrazione del sistema di equazioni che governano il modello;
7. calcolo della temperatura della composizione del syngas decarbonizzato e dell'intervallo di pre-breakthrough del carbonatatore;
8. determinazione della portata volumetrica del syngas che interessa il carbonatatore;
9. calcolo del diametro interno del reattore e dell'altezza del letto in regime di fluidizzazione.

Di seguito vengono presentati i risultati dello studio di sensitività del sistema al variare del valore di temperatura del sistema reattivo.

Per scegliere la temperatura più favorevole alla conduzione del processo in esame si è scelto di portare avanti una serie di simulazioni del reattore sperimentale in condizioni isoterme in maniera tale da individuare la temperatura ideale cui sottoporre il processo per avere una buona tenore di idrogeno nel syngas decarbonizzato.

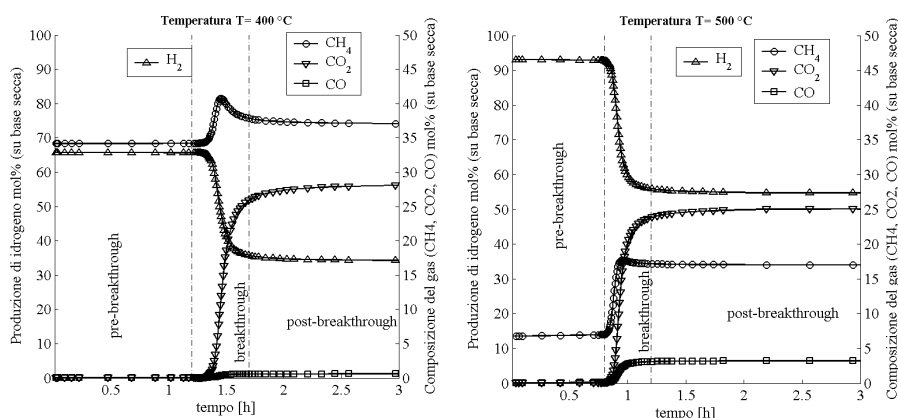


Figura 70. Curve di breakthrough del carbonatatore a diversi valori della temperatura

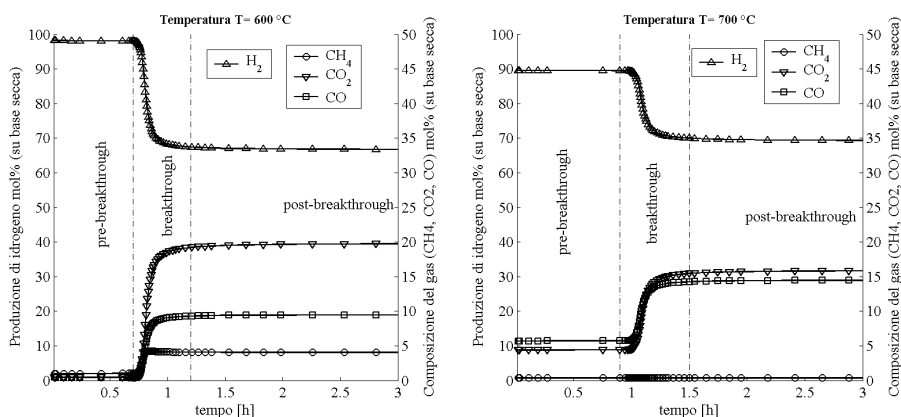


Figura 71. Curve di breakthrough del carbonatatore a diversi valori della temperatura

Si è riscontrata quindi una evoluzione temporale del funzionamento del carbonatore caratterizzata da tre diversi intervalli di comportamento:

- un primo periodo di pre-breakthrough in cui si ha il massimo della produzione di idrogeno grazie alla cattura “*in situ*” della CO<sub>2</sub> con il conseguente spostamento dell’equilibrio verso la produzione di idrogeno;
- un periodo di break-through in cui la capacità sorbente del letto di dolomite calcinata inizia a diminuire a causa dell’aumento della resistenza offerta dallo strato di carbonato di calcio alla diffusione dell’anidride carbonica verso l’ossido di calcio;
- Un terzo ed ultimo periodo di post-breakthrough durante il quale, nel reattore, esaurita la capacità sorbente del letto, prendono luogo le sole reazioni catalitiche.

La Figura 72 mostra un confronto tra le risposte del carbonatore alle varie temperature imposte.

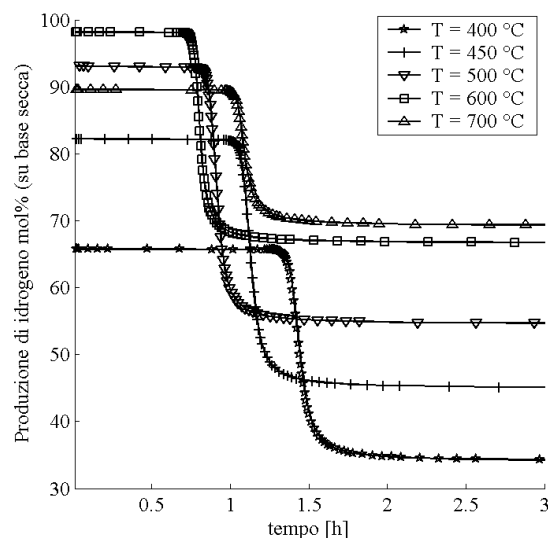


**Figura 72. Confronto della produzione di idrogeno a diverse temperature**

## A2. Sperimentazione in piccola scala sui processi di gassificazione e idrogassificazione del carbone e messa a punto della modellistica sulla gassificazione del carbone a letto fisso

Si tratta di attività di tipo sperimentale su impianti da laboratorio opportunamente allestiti, che hanno riguardato le seguenti linee di ricerca.

### a. Attività di caratterizzazione del carbone

Per quanto riguarda questa linea di ricerca sono state effettuate su strumentazione di tipo bilancia termogravimetrica (TGA), prove di caratterizzazione di vari tipi di carbone, sia nazionali (Sulcis) che estero; si è individuata l’analisi immediata, la temperatura di fusione delle ceneri il potere calorifico inferiore e superiore, il contenuto di zolfo totale del carbone, e la densità effettiva.

I carboni analizzati sono stati il carbone Sulcis, il carbone di legna, il carbone estero (sudafricano o indonesiano) e il coke.

Le attività di caratterizzazione del carbone si sono sviluppate con il principale obiettivo di fornire i dati sperimentali su cui definire le condizioni operative da utilizzare nell’impianto di gassificazione da 5 kg/h installato presso i laboratori ENEA. I valori ottenuti, saranno inoltre i parametri di input al modello numerico che dovrà essere messo a punto per simulare il processo oggetto dello studio sperimentale.

Le prime attività condotte su campioni di carbone del Sulcis hanno permesso di definire:

- l’analisi immediata non strumentale, seguendo quanto definito dalle norme ASTM D3172-02
- il potere calorifico secondo quanto definito dalla norma ASTM D5865-04

- la temperatura di fusione delle ceneri, parametro fondamentale per i problemi di slagging e fouling; individuata mediante valutazione non standard in mancanza di una strumentazione adeguata per eseguire quanto previsto dalla norma ASTM
- Densità effettiva ed apparente; parametro utile per valutare il riempimento del reattore e la quantità oraria alimentata, mediante il dosatore volumetrico.

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 32, dove viene indicato il riferimento normativo e la strumentazione utilizzata.

**Tabella 32. Caratterizzazione del carbone Sulcis**

| Prova                             | Metodo                          | Campione | Riferimento normativo | % A.R. *              | % DRY | % D.A.F.<br>Dry ash free |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-------|--------------------------|
| Analisi immediata                 | Umidità                         | Sulcis   | ASTM D3173-02         | 7,31                  | 00    | -                        |
|                                   | Ceneri                          | Sulcis   | ASTM D3174-02         | 15,71                 | 16,95 | -                        |
|                                   | Volatili                        | Sulcis   | ASTM D3175-02         | 43,38                 | 46,8  | 56,35                    |
|                                   | Carbonio Fisso                  | Sulcis   | ASTM D3172-02         | 33,6                  | 36,25 | 43,65                    |
|                                   | Totale                          |          |                       | 100                   | 100   | 100                      |
| Determinazione dello zolfo totale | % S                             | Sulcis   | ASTM D3177-02         | 5,33                  | 5,75  | -                        |
| Potere calorifico                 | Calorimetro di Berthelot-Mahler | Sulcis   | ASTM D5865-04         | PCS                   |       | PCI                      |
|                                   |                                 |          |                       | 24,5 MJ/kg            |       | 23,4 MJ/kg               |
| Densità                           | Bilancia di Mohr-Westphal       | Sulcis   |                       | Densità Apparente     |       | Densità Effettiva        |
|                                   |                                 |          |                       | 790 kg/m <sup>3</sup> |       | 1430 kg/m <sup>3</sup>   |

\* A.R.: As received

Oltre a campioni di carbone Sulcis sono stati analizzati carboni di provenienza estera (Sudafricano o Indonesiano) e coke, di cui si è valutato il potere calorifico e la densità (Tabella 33).

**Tabella 33. Potere calorifico e densità effettiva del coke e del carbone di provenienza estera**

| Metodologia                     | Campione       | Riferimento normativo | Unità             | PCS   | PCI  |
|---------------------------------|----------------|-----------------------|-------------------|-------|------|
| Calorimetro di Berthelot-Mahler | Coke           | ASTM D 5865-04        | MJ/kg             | 30,1  | 30   |
| Calorimetro di Berthelot-Mahler | Carbone estero | ASTM D 5865-04        | MJ/kg             | 31,3  | 31,2 |
| Picnometro                      | Coke           | -                     | kg/m <sup>3</sup> | 1.445 | -    |
| Picnometro                      | Carbone estero | -                     | kg/m <sup>3</sup> | 1.045 | -    |

La bilancia termogravimetrica consente l'analisi della variazioni in peso (perdita/acquisizione) di campioni sottoposti a flussi costanti di reagenti gassosi per differenti variazioni di temperatura.

Sfruttando tale proprietà si è impostata una metodologia per effettuare l'analisi immediata di campioni di carbone, secondo quanto definito dalla norma ASTM D5142/02.

La metodologia così definita, riportata nella Tabella 34 ed in Figura 73, permette di eseguire una rapida caratterizzazione di qualsiasi campione.

**Tabella 34. Metodologia implementata in TGA per effettuare l'analisi immediata condotta secondo la norma ASTM D 5142/02**

| Temperatura<br>[°C] | Rampa di riscaldamento<br>[°C/min] | Gas di reazione N <sub>2</sub><br>[ml/min] | Gas di reazione aria<br>[ml/min] |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|
| 25-105              | 10                                 | 150                                        | -                                |
| 105                 | isotermo 15 min                    | 150                                        | -                                |
| 105-950             | 40                                 | 150                                        | -                                |
| 950                 | isotermo 7 min                     | 150                                        | -                                |
| 950-600             | -40                                | 150                                        | -                                |
| 600-700             | 10                                 | -                                          | 150                              |
| 700                 | isotermo 15 min                    | -                                          | 150                              |
| 700-950             | 25                                 | -                                          | 150                              |
| 950                 | 10                                 | -                                          | 150                              |

Mediante tale metodologia si è condotta l’analisi immediata dei seguenti campioni: carbone di legna, carbone del Sulcis, carbone estero e coke; riportata in Tabella 35.

I differenti valori ottenuti per il Sulcis, mediante TGA e mediante analisi non strumentale, sono da imputare all’estrema eterogeneità del campione e alla necessità, di conseguenza, di effettuare più valutazioni su un numero di campioni rappresentativo.

Il carbone estero, in accordo con quanto ottenuto nella determinazione del potere calorifico, è risultato un carbone di alto rango, con un elevato contenuto di carbonio fisso e un basso contenuto di volatili.

**Tabella 35. Analisi immediata condotta secondo la norma ASTM D 5142/02 su differenti tipi di carbone mediante TGA**

| Campione       | Granulometria         | Umidità<br>% peso | Volatili<br>% peso | Carbonio fisso<br>% peso | Ceneri<br>% peso |
|----------------|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|------------------|
| Carbone legna  | 250 $\mu$ m (60 mesh) | 4,98              | 21,34              | 3,82                     | 69,85            |
| Carbone Sulcis | 250 $\mu$ m (60 mesh) | 7,59              | 40,37              | 38,15                    | 13,89            |
| Carbone estero | 250 $\mu$ m (60 mesh) | 3,68              | 8,52               | 71,90                    | 15,89            |
| Coke           | 250 $\mu$ m (60 mesh) | 0,67              | 1,94               | 90,42                    | 6,97             |

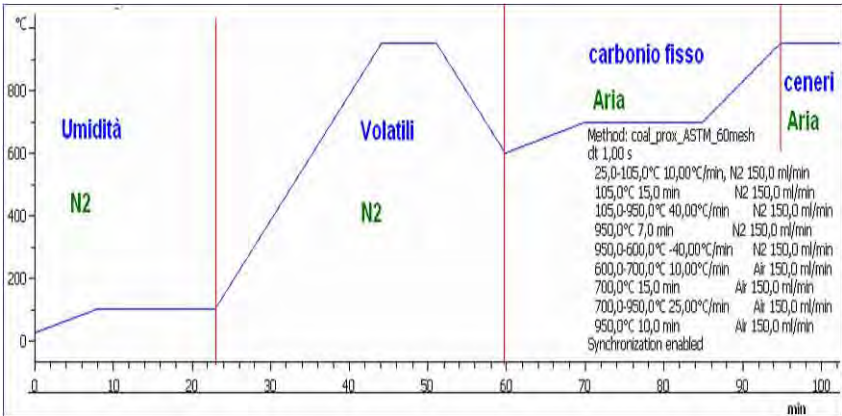


**Figura 73. Grafico della metodologia seguita per effettuare l’analisi immediata secondo la norma ASTM in TGA**

b. Valutazione preliminare della reazione di gassificazione del carbone con assorbimento di tar, di composti dello zolfo (prodotti di gassificazione) su sorbente liquido

Le attività sperimentali relative alla seconda linea di attività sono state eseguite su un reattore a scala laboratorio opportunamente approntato (vedi Figura 74).

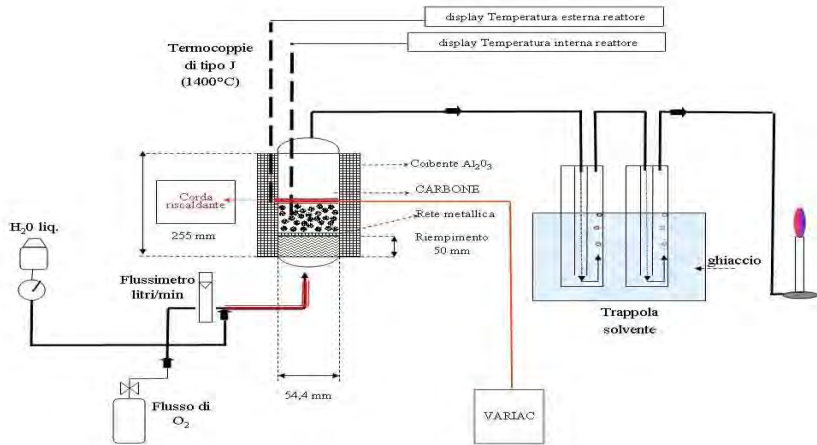


**Figura 74. Schema dell’impianto per la gassificazione del carbone su scala di laboratorio**



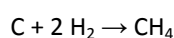
I test sperimentali eseguiti hanno riguardato:

- la verifica del dato sperimentale ( $O_2/H_2O$  1:10 in peso con riferimento all'aria) di letteratura, per trovare condizioni operative (portata vapore ed ossigeno in ingresso e temperatura) riproducibili del processo su scala di laboratorio;
- prove di ossidazione del carbone in condizioni stazionarie e controllate;
- l'individuazione delle condizioni operative del processo su scala di laboratorio, per l'eliminazione fisica ed olfattiva del tar e dei composti solforati, mediante utilizzo di solventi, quale l'acetato di etile.

#### c. *Messa a punto impianto da laboratorio per lo studio dell'idrogassificazione del carbone*

Si è approntato un impianto da laboratorio per effettuare, in generale, studi parametrici su processi termochimici che implicano la caratterizzazione sia fisica, superficie specifica (porosità, BET), sia chimica (TDP, TDR, TPO) dei materiali in funzione di temperatura e pressione.

In particolare si vuole caratterizzare il processo di idrogassificazione del carbone, ossia la reazione del carbone con idrogeno e conseguente formazione di metano secondo la reazione:



Tale reazione chimica è agevolata da alte pressioni, generalmente maggiori di 30 bar, e da temperature dell'ordine di 800 °C. Al di sotto di tali valori la trasformazione è limitata da problematiche inerenti alla cinetica chimica.

Il processo di idrogassificazione è alla base del ciclo innovativo Zecomix proposto da ENEA, che prevede la decarbonizzazione del syngas in uscita dall'idrogassificatore, ricco di metano, mediante assorbimento della  $CO_2$  ad opera di ossido di calcio. La concomitanza delle reazioni di carbonatazione e di reforming del metano è particolarmente favorevole alla produzione di un syngas ricco fondamentalmente di idrogeno e vapore da inviare successivamente in turbina.

I processi in studio richiedono l'utilizzo di una apparecchiatura in grado di resistere ad attacchi acidi, a temperature e pressioni piuttosto elevate (pressioni fino a 60 bar e temperature oltre i 1000 °C).

L'apparecchiatura scelta è stata il Chemisorption Analyser AUTOCHEM 2950, adattata opportunamente per resistere agli agenti corrosivi previsti, come gli acidi cloridrico, solforico e solfidrico, presenti nel carbone, ed è predisposta per futuri upgrade, come un generatore di vapore e un forno speciale dotato di sistema di condensazione e recupero semivolatili.

### **B. Studi e sperimentazioni sulle tecnologie impiantistiche per la produzione di elettricità e idrogeno da syngas da carbone**

Questa parte di studi ha avuto come obiettivo principale la definizione e progettazione di massima di un impianto pilota da 5 MW termici di idrogassificazione del carbone con cattura della  $CO_2$  mediante sorbenti solidi ad alta temperatura. Si tratta sostanzialmente dell'evoluzione dell'impianto Zecomix attualmente in fase di realizzazione, da 300 kWt che prova, su banchi separati, idrogassificazione e decarbonatazione.

Al fine di approfondire le tematiche relative alla tecnologia in studio, sono stati attivati contratti con i partner POLIMI, per quanto riguarda la definizione e l'ottimizzazione del processo Zecomix di riferimento, UNIVAQ per quanto riguarda lo studio ed il dimensionamento di un impianto pilota da 5 MWt ed infine Università di Roma per quanto riguarda le problematiche connesse alla desolforazione a caldo del gas.

E' emersa inoltre la necessità di approfondire gli studi, sia teorici che modellistici, su alcuni processi innovativi di CO-shift, di arricchimento dell'idrogeno nel syngas e sui processi di desolforazione del syngas a caldo. A questo scopo è stato attivato un subcontratto con la società Sotacarbo.

Per quanto riguarda le attività svolte direttamente da ENEA, esse riguardano essenzialmente sperimentazione, su attrezzature esistenti, sul ciclo  $CaO-CaCO_3$  di separazione della  $CO_2$  e sulla combustione dell'idrogeno con ossigeno e vapore (obiettivi B1 e B2).

#### **B1. Sperimentazione, in scala laboratorio, per lo studio del ciclo $CaO-CaCO_3$ di separazione della $CO_2$**

Tali attività hanno avuto l'obiettivo di validare ed approfondire le conoscenze teoriche del processo di carbonatazione e calcinazione, che sarà parte dell'impianto Zecomix. In particolare si è testata la capacità del sistema reagente costituito da varie tipologie di sorbente, a partire dall'ossido di calcio puro fino a dolomite

calcinata, con varie granulometrie e temperature di reazione. I risultati hanno permesso di acquisire dati sia sulla cinetica di reazione sia sulla capacità di riprodurre il maggior numero di cicli di carbonatazione/calcinazione.

Per studiare la reazione di calcinazione della dolomite e la successiva reazione tra dolomite calcinata ed anidride carbonica è stata impiegata la tecnica termo-gravimetrica in cui la variazione in peso di un certo campione solido è acquisita istante per istante. L'apparato sperimentale consiste di una bilancia termo-gravimetrica, un modulo automatico di acquisizione ed un sistema di alimentazione dei gas. Per seguire la reazione di calcinazione e successiva carbonatazione della dolomite è stata utilizzato un analizzatore termo-gravimetrico della Mettler-Toledo modello GC-10 che misura il peso del campione solido in funzione del tempo a temperatura fissa o variabile. La parte principale della bilancia consiste di una camera di reazione di forma tubolare che ospita il campione solido. La velocità di riscaldamento varia da 0 °C/min (isoterma) a 100 °C/min mentre la camera di reazione regge temperature fino a 1600 °C. Infine, il sistema di alimentazione comprende bombole, flussimetri e tubi di alimentazione connessi alla bilancia. La dolomite utilizzata nelle varie prove sperimentali è di tipo Pilkington con granulometria tra 180-210 µm. Raggiunta la temperatura di 1000 °C, il carbonato di calcio e magnesio che formano la dolomite si decompongono nei rispettivi ossidi. Il campione di dolomite calcinata viene così avviato ad una data temperatura di carbonatazione, raffreddando la camera di reazione che si trova a 1000 °C ad una velocità di 10 °C/min. Quando la fornace arriva alla temperatura di carbonatazione desiderata, viene previsto un periodo di 5 minuti per assicurare che il campione arrivi alle condizioni stazionarie. A questo punto, la portata di azoto viene interrotta e la camera di reazione è saturata da una portata di 20 ml/min di anidride carbonica (100 % CO<sub>2</sub>).

Le prove sperimentali possono essere divise in due parti: la prima parte ha avuto come obiettivo lo studio dell'effetto della temperatura di reazione sul processo di carbonatazione; la seconda invece è stata focalizzata sulle prestazioni della dolomite calcinata se sottoposta a più cicli di calcinazione-carbonatazione. La conversione della particella di dolomite è stata ottenuta come rapporto tra l'aumento in peso registrato dalla bilancia ed il massimo aumento in peso possibile, attraverso la formula:

$$X = \frac{M_{\text{CaCO}_3} \Delta m}{f_{\text{CaCO}_3} m M_{\text{CO}_2}} \quad (1)$$

dove  $\Delta m$  è l'aumento in peso del campione misurato dalla bilancia,  $m$  è la massa di dolomite caricata nella camera di reazione e  $f_{\text{CaCO}_3}$  è la frazione in peso del carbonato di calcio contenuto nella dolomite, mentre  $M_{\text{CO}_2}$  è invece il peso molecolare della CO<sub>2</sub>.

### *Influenza della quantità di dolomite calcinata*

Per studiare l'effetto della quantità di campione di dolomite calcinata sulla curva conversione-tempo sono state condotte delle prove con diversi valori della massa di campione caricata nel sistema di analisi (3, 4,5 e 6 mg) ad una temperatura di 600 °C. I risultati sono stati riportati in Figura 75. Le curve presentano un breve periodo di nucleazione seguito da un rapido aumento della conversione della particella. Un confronto tra le curve corrispondenti a 3 mg e 4,5 mg suggerisce che queste hanno una pendenza iniziale paragonabile tra loro, mentre la curva a 6 mg ha una pendenza lieve-mente più bassa suggerendo che l'influenza della resistenza alla diffusione attraverso il campione inizia ad avere una certa importanza al di sopra di un campione da 4,5 mg. Le prove sperimentali alla temperatura di 600 °C confermano questa osservazione.

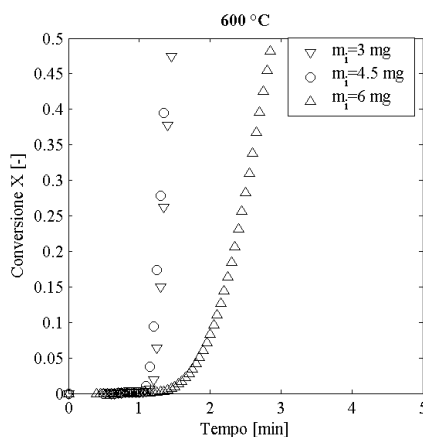


**Figura 75. Conversione X al variare della quantità di dolomite caricata nel sistema TGA**

La Figura 75 mostra, inoltre, come la resistenza alla diffusione attraverso il campione si riflette in un periodo di nucleazione maggiore per quantitativi di campioni più grandi.

#### *Influenza del numero di cicli*

Alla luce di quanto fin qui riportato sono state condotte delle prove sperimentali utilizzando un campione di 3 mg. In particolare si è sottoposto il campione di dolomite a quattro cicli di carbonatazione-calcinazione. In Figura 76 sono riportati i risultati sperimentali ad una temperatura di 700 °C. Si vede come durante il primo ciclo di carbonatazione, dopo aver raggiunto velocemente una conversione di circa 70 % segue un periodo in cui la velocità di carbonatazione è molto lenta. In questa figura si nota che all'aumentare del numero di cicli, il cambiamento di regime da una data velocità ad un'altra minore avviene sempre più gradualmente. Infine in Figura 77 è riportata la parte iniziale della reazione gas solido rispettivamente a 600 °C. Tale Figura suggerisce che all'aumentare del numero di cicli la pendenza della curva t-X diminuisce. Questo fenomeno può essere spiegato con una diminuzione (da verificare con la sperimentazione) della superficie di interfaccia tra l'ossido di calcio e l'anidride carbonica.

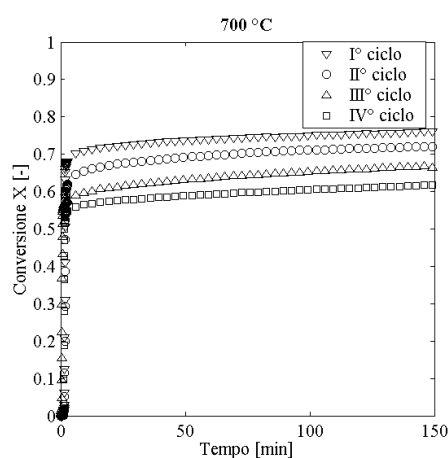


**Figura 76. Conversione della particella al variare del numero di cicli a 700 °C**

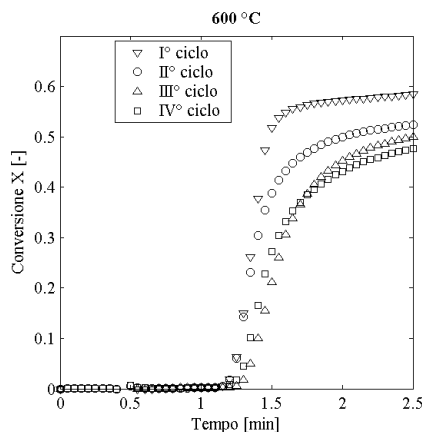


**Figura 77. Diminuzione della pendenza della curva di conversione all'aumentare dei cicli di utilizzo della dolomite alla temperatura di 600 °C**

#### *Influenza della temperatura*

La Figura 78 mostra, per il primo ciclo di separazione-rigenerazione, l'effetto della temperatura sulla conversione della particella di dolomite in funzione del tempo. Come è facile notare, il cambiamento di velocità ad un regime molto più lento avviene a tutte le temperature ma a differenti livelli di conversione: a temperature più alte questo avviene a gradi di carbonatazione più elevati. Per quanto riguarda il comportamento nei cicli successivi, si riportano a titolo esemplificativo, in Figura 79, i risultati sperimentali dell'influenza della temperatura per il 4° ciclo

di carbonatazione. In (2) è riportato l'andamento della pressione di equilibrio dell'anidride carbonica in funzione della temperatura.

$$P_{A,eq} = 4.137 \cdot 10^7 e^{\frac{20474}{T}} ; \quad C_{A,eq} = \frac{P_{A,eq}}{RT} \quad (2)$$

Per studiare l'influenza che la temperatura esercita sulla reazione dell'ossido di calcio con l'anidride carbonica, sono state condotte prove sperimentali a due differenti temperature (500-600 °C). Utilizzando un modello a grani per l'interpretazione di questi dati, si vede che all'inizio della reazione gas-solido, quando le resistenze alla diffusione possono essere trascurate, la velocità di reazione è:

$$\text{rate} = k \sigma_{0, \text{CaO}} (C_A - C_{eq}) \quad (3)$$

dove  $C_A$  è la concentrazione molare dell'anidride carbonica e  $\sigma_{0, \text{CaO}}$  è la superficie iniziale dell'interfaccia tra reagente gassoso ( $\text{CO}_2$ ) e reagente solido ( $\text{CaO}$ ). Inoltre la costante cinetica  $k$  come riportato in Bathia and Perlmutter, 1981, non varia al variare della temperatura. Si vede in Figura 80 che per le tre temperature analizzate (500, 600 e 700 °C), la reazione gas-solido mostra, nella parte iniziale del processo una curva conversione-tempo con una pendenza che cresce all'aumentare della temperatura. Questa osservazione sembrerebbe andare contro l'equazione (3) che suggerisce, invece, una diminuzione della velocità di reazione all'aumentare della temperatura ( $C_{eq}$  cresce in maniera esponenziale con la temperatura). Quindi una prima conclusione, da verificare sperimentalmente, è che la velocità della reazione di carbonatazione dell'ossido di calcio può essere espressa dall'equazione (3) sopra riportata quando il sistema  $\text{CaO}-\text{CO}_2$  è vicino la concentrazione di equilibrio  $C_{eq}$ .

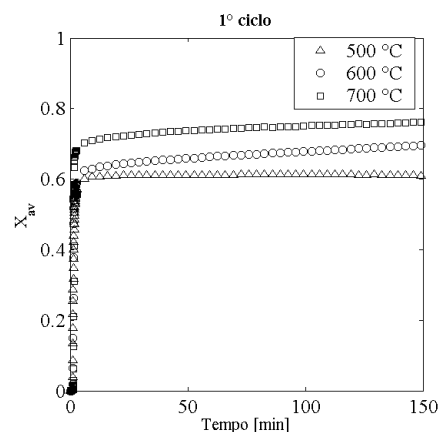


Figura 78. Influenza della temperatura sul grado di conversione del sorbente solido (1° ciclo)

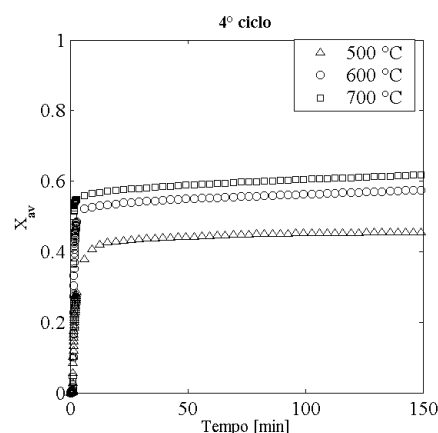


Figura 79. Influenza della temperatura sul grado di conversione del sorbente solido (4° ciclo)

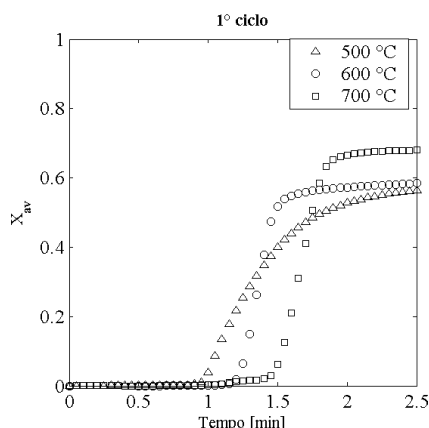


Figura 80. Aumento della pendenza della curva di conversione all'aumentare della temperatura (1° ciclo)

## B2. Sperimentazione sulla combustione di $H_2$ su impianto IDEA

Nel corso del 2008 è stato attivato e reso operativo l'impianto IDEA (Figura 81). L'impianto, della potenza termica di 100 kW circa è stato realizzato per condurre attività sperimentali, a supporto della modellistica numerica circa la combustione di idrogeno o combustibili idrogenati (es. syngas da gassificazione).

L'obiettivo è quello di individuare geometrie di bruciatori caratterizzate da un ampio range di funzionamento stabile, con tassi di idrogeno crescenti fino a idrogeno puro, che prevengano la formazione di "hot spot" (formazione di  $NO_x$ ), e condizioni di flash-back. Un obiettivo non secondario è anche quello di sviluppare strumentazione e diagnostica di controllo in grado di operare anche su impianti reali, data la bassissima intrusività, la remotizzazione del punto di analisi, il basso costo e la facilità di impiego.



Figura 81. Impianto IDEA

La strumentazione speciale di cui l'impianto è dotato consente misure non invasive per la determinazione del campo fluidodinamica, termico e chimico, nonché per la verifica di condizioni stabili ed efficienti di combustione.

In questa ottica è stata avviata una prima campagna sperimentale su di un bruciatore coassiale non "swirlato", volta a caratterizzare, per differenti valori di potenza nominale, la stabilità di combustione al variare del rapporto di equivalenza, ottenuto, fissata la portata di combustibile, variando la portata di aria primaria.

In questa attività è stato utilizzato il sistema di misura denominato ODC, di brevetto ENEA (vedi Figura 15), che attraverso l'acquisizione e l'analisi delle fluttuazioni di luminosità associata alla produzione di radicali OH, permette la misura diretta delle condizioni stabili o meno di combustione, nonché delle fluttuazioni nel rilascio termico e quindi del campo locale di temperatura.

In base alle sue caratteristiche di non intrusività ed elevata risposta in frequenza, lo strumento è in grado di caratterizzare dal punto di vista della stabilità le diverse condizioni operative, e quindi l'involuppo di funzionamento stabile di un dato bruciatore.

Sulla fiamma citata di tipo "0" (alimentazione coassiale combustibile-comburente), è stato caratterizzato il range di funzionamento compreso tra  $\lambda$  1,2 e 1,7, individuando l'incipienza di condizioni di instabilità fino allo spegnimento.

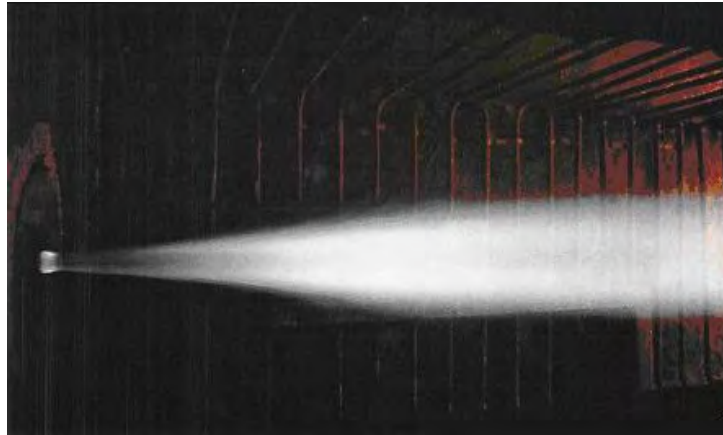


Figura 82. Fiamma di tipo "0"

L'attività prosegue su fiamme swirlate di tipo 1 ( $\text{swirl} < 0,5 - 0,6$ ) e 2 ( $\text{swirl} > 0,6$ ).

### **B3. Definizione ed progettazione di un dimostrativo innovativo completo di produzione di idrogeno ed elettricità con cattura della $\text{CO}_2$ da 5 MWt.**

Questo obiettivo è realizzato integrando i risultati dei contratti attivati con UNIVAQ il cui tema è la progettazione concettuale e nella verifica della reale fattibilità del processo innovativo e della corrispondente soluzione impiantistica, pensata per un impianto pilota della capacità di 5 MW termici, e con Università di Roma che approfondisce invece le problematiche realizzative dei dispositivi da applicare all'impianto da 5 MW al fine di desolfurare il syngas a valle dell'idrogassificatore.

Per quanto riguarda la definizione della configurazione dell'impianto pilota (vedi rapporto tecnico Università dell'Aquila), le analisi fin qui effettuate indicano che la soluzione impiantistica che appare più promettente è quella di un processo continuo fondato sull'impiego di reattori 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  $\text{CO}_2$  e quella per la rigenerazione del sorbente.

La soluzione alternativa, costituita da una coppia di reattori a letto circolante, operante in continuo (uno solo per la carbonatazione ed il secondo solo per la rigenerazione) appare particolarmente complessa dal punto di vista fluido dinamico:

- Mantenimento costante e accurato dei livelli di pressione nei due reattori;
- Realizzazione di una portata ben definita di circolazione del solido;
- Necessità di mantenere completamente separati gli ambienti gassosi nei due reattori, rispettivamente riducente e ossidante.

In generale, questa configurazione presenta un maggiore rischio di insuccesso realizzativo al livello di impianto pilota, ed è pertanto da considerarsi meno interessante di quella proposta.

Su queste tematiche ha lavorato l'Università dell'Aquila che ha potuto effettivamente verificare che l'ipotesi di impiego di reattori operanti alternativamente in condizioni di carbonatazione e di calcinazione a due livelli di pressione diverse, con una pressione più elevata durante la fase di cattura di anidride carbonica, permette di innalzare la temperatura di esercizio minimizzando i tempi e i consumi energetici legati al riscaldamento del reattore nella fase successiva di calcinazione. Il nuovo processo, simulato e confrontato a quello che opera ad un'unica pressione (quella atmosferica), utilizzando il programma Aspen Pro, ha dimostrato la validità concettuale della nuova proposta impiantistica.

Lo studio sperimentale sulla cattura di anidride carbonica, svolto sempre da UNIVAQ, ha visto una prima serie di prove da banco con l'obiettivo di valutare l'effetto della presenza dei tar sulle capacità catalitica e sorbente di  $\text{CO}_2$  del letto formato da dolomite e catalizzatore commerciale al Nichel. In sostanza è stato modificato l'impianto da

banco e sono state alimentate al reattore insieme alla miscela azoto e vapore d'acqua sia toluene che metil-naftalene. Risultati allo stato attuale sembrano confermare la validità della scelta di operare con letti fluidizzati composti dalla dolomite e dai catalizzatori commerciali al Nichel anche in presenza di tar. Per quanto riguarda l'ultimo punto dello studio sperimentale cioè l'effetto della presenza dei composti contenenti lo zolfo, è in corso di preparazione una pianificazione delle prove sperimentali che ha visto anche essa bandita una seconda borsa di studio in attesa di assegnazione.

È stato inoltre oggetto di indagine sperimentale, la messa a punto di una tecnica basata sulle misure delle fluttuazioni di pressione al fine di monitoraggio del grado di calcinazione del letto fluidizzato. Da misure delle fluttuazioni di pressione durante le prove cicliche di calcinazione e di ricarbonatazione della dolomite, condotte nell'impianto da banco, sembra possibile correlare il grado di calcinazione e di ricarbonatazione nel reattore alla deviazione standard delle fluttuazioni di pressione. La misura dello stato fisico del sorbente solido costituisce un parametro operativo fondamentale per la conduzione e controllo dei cicli alternati di esercizio. La tecnica indagata necessita una conferma definitiva dalle misure su impianti in scala pilota.

Per quanto riguarda la desolforazione del syngas (rapporto del Dip. Meccanica Università di Roma La Sapienza) essa rappresenta un problema fondamentale, indipendente dalla soluzione impiantistica adottata, legata al contenuto di zolfo nel gas prodotto dalla idro-gassificazione del carbone. I solfuri presenti nel gas possono avvelenare il sorbente e quindi portare ad un forte derating delle prestazioni dell'impianto.

Sono stati analizzati gli effetti delle procedure di desolforazione più comunemente usate, che sono del tipo "a freddo", che prevedono cioè un pre-raffreddamento del syngas a monte del trattamento. Dato che il syngas desolfurato viene poi sottoposto ad un successivo pre-riscaldamento prima di essere bruciato nel combustore, i trattamenti a freddo introducono in realtà delle forti irreversibilità di Seconda Legge anche in presenza di un recupero spinto del calore all'interno dei confini di batteria.

Nel lavoro effettuato dall'Università di Roma (Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica) è stato analizzata la tecnologia cosiddetta HTHPD (High-T, high p desulfuration), un processo ad adsorbimento ad alta temperatura che impiega un sorbente rigenerabile a base di titanato di zinco; il processo HTHPD è stato modellato sulla base di una cinetica chimica fortemente semplificata ed una schematizzazione "black-box" del componente. Sia la parte chimica che quella fisica del modello sono basate su alcune referenze bibliografiche e sui pochi risultati sperimentali disponibili.

Il modello di desolforatore calcola la "funzione di trasferimento" del componente (in questo caso, l'efficienza di rimozione dello S) in funzione delle caratteristiche del sorbente e delle condizioni operative (temperatura, pressione, concentrazione in  $H_2S$ , portata del syngas), usando correlazioni semi-empiriche, ottenute da interpolazioni di risultati sperimentali, e bilanci di massa ed energia esatti. Le "curve operative" che si ottengono per l'HTHPD non fanno così uso della cinetica esatta (istantanea), ma la comprendono in senso integrale: le costanti di reazione ("K") non sono assegnate a priori, ma calcolate come "steady state approximations" alla cinetica reale, allo stesso modo in cui la mappa di un compressore "contiene" ed "esprime" la termo-fluidodinamica locale dell'efflusso.

Quindi il metodo generale descritto in questo studio può in effetti essere applicato per ricavare la "mappa operativa" di qualsiasi reattore chimico, ed apre così la strada ad un largo campo di implementazioni nell'area della simulazione di processo.

#### **B4. Analisi ed ottimizzazione dei processi ad alta efficienza di produzione di idrogeno da carbone**

Tale attività ha avuto come obiettivo l'analisi di configurazioni di impianto basati sul processo Zecomix per la cattura della  $CO_2$  che, partendo dal ciclo ideale già studiato in cui si ottengono efficienze nette di impianto molto elevate (attorno al 50%) a fronte però dell'impiego di dispositivi non maturi tecnologicamente e che presuppongono la risoluzione di elevate problematiche di R&S, siano invece realizzabili nell'arco dei prossimi 5 anni in un prototipo di impianto della taglia approssimativa di 50 MWt.

Le attività sono state svolte dal Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica e sono presentate nel dettaglio nel documento "Definizione e studio di fattibilità di un impianto prototipo da 50 MWth con idrogassificazione di carbone e cattura della  $CO_2$  ad alta temperatura con sorbenti solidi a base di ossidi di calcio".

E' stato inoltre effettuato uno studio approfondito dei processi connessi alla produzione di idrogeno da gassificazione del carbone, ed in particolare i processi di depolverizzazione, desolforazione a caldo e a freddo, CO shift, assorbimento  $CO_2$  e purificazione  $H_2$ , valutandone le prestazioni mediante lo sviluppo di opportuni modelli di simulazione.



Lo studio, svolto dal partner Sotacarbo, è descritto più in dettaglio nei rapporti tecnici Sotacarbo “Studio di processi per l’arricchimento dell’idrogeno nel syngas” e “Modelli di calcolo di un processo per l’arricchimento dell’idrogeno nel syngas”:

I rapporti citati sono disponibili sul sito ENEA.

### **C. Survey geologico e studi delle potenzialità di applicazione dell’ECBM nei giacimenti carboniferi del Sulcis**

Nell’ambito dell’attività di applicazione delle tecnologie “ECBM/CO<sub>2</sub> storage” sono state approfondite le tematiche legate alla caratterizzazione geologica dei siti di “CO<sub>2</sub> storage” in generale e sulle potenzialità del grande giacimento carbonifero del Sulcis in particolare.

L’obiettivo è quello di valorizzare in ambito internazionale le attività svolte sulle tecnologie “ECBM/CO<sub>2</sub> storage” in Italia, al fine di partecipare a progetti internazionali e definire le attività future.

Le attività svolte sono descritte dettagliatamente nel report Carbosulcis “Survey geologico e studio delle potenzialità di applicazione di tecnologie ECBM nel giacimento carbonifero del Sulcis” e nel rapporto redatto da OGS:

### **D. Roadmap tecnologica italiana, coordinamento, associazione CO<sub>2</sub>, attività di informazione tecnologica e divulgazione delle tecnologie**

#### **D1. Costituzione della Associazione italiana sulla CO<sub>2</sub>**

Si è costituito un comitato promotore composto da esponenti di ENEA, CESI Ricerca (attualmente RSE, Ricerca Sistema Energetico), Carbosulcis, OGS, Università di Roma e INGV, al quale si sono poi aggiunti come membri anche ENEL ed ENI.

#### **D2. Realizzazione di un sito internet sulle tecnologie CCS e sulle moderne tecnologie di utilizzo del carbone e sulle azioni di ricerca in Italia, organizzazione di un workshop divulgativo e realizzazione di documenti di carattere di sintesi tecnico-istituzionale ed educativo**

E’ stato strutturato un sito internet sulle tecnologie CCS, in continuo aggiornamento per quanto riguarda in particolare i contenuti scientifici.

E’ stato organizzato ad Erice un workshop scientifico dal titolo “CO<sub>2</sub> CAPTURE & STORAGE: TOWARDS A UK/ITALY COMMON STRATEGY WITHIN A GLOBAL FRAMEWORK”. Il workshop si è tenuto presso l’International School of Geophysics di Erice dal 31 ottobre al 7 novembre 2007 e sponsorizzato da INGV, MUR, ENEA, British Embassy di Roma, l’UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), Schlumberger e Sotacarbo.

#### **D3. Contributo alla definizione ed aggiornamento di una roadmap tecnologica italiana nel settore delle tecnologie ad emissione zero che individui le priorità nazionali e le scadenze realizzative.**

E’ stato messo a punto un documento di indirizzo e un documento di base strategico come premessa per la determinazione delle linee programmatiche per poter promuovere lo sviluppo delle tecnologie CCS nel nostro Paese.

## **PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI**

### **Politecnico di Milano (POLIMI)**

Il POLIMI è stato coinvolto per svolgere attività di ricerca nell’ambito degli obiettivi B4 e D2. L’attività svolta ha avuto come obiettivo generale la valorizzazione delle attività di R&S italiane sulle tecnologie CCS, ed in particolare sulla gassificazione del carbone ad alta efficienza e ad emissioni nulle, agendo da una parte a completamento di attività progettuali e sperimentali in corso, ed in particolare l’attività sul ciclo innovativo Zecomix, dall’altra in un ambito più informativo e divulgativo delle tecnologie in questione.

Le attività su cui verte il presente Contratto di Ricerca seguono quindi due linee distinte. la prima linea di attività riguarda una serie di studi su possibili configurazioni di cicli innovativi di gassificazione di carbone, utilizzando la tecnologia della cattura ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi, con l’obiettivo di arrivare alla definizione di una configurazione di impianto che possa essere realizzata a livello di impianto prototipale di taglia non superiore ai 50 MWt. Tale impianto dovrà dimostrare l’effettiva fattibilità del sistema di cattura della CO<sub>2</sub>

mediante sorbenti a caldo basati su ossido di calcio, opportunamente integrato con il sistema di produzione energetica e di depurazione del syngas. L'impianto dovrà avere comunque prestazioni concorrenziali rispetto allo stato dell'arte attuale e produrre, utilizzando carbone di varia natura (anche il carbone del Sulcis seppur miscelato a carbone estero), sia idrogeno che energia elettrica.

La seconda linea di attività riguarda il supporto alla preparazione del contenuto documentale sullo stato dell'arte delle tecnologie CCS da inserire nella realizzazione del sito internet sulle CCS stesse. L'obiettivo dell'attività è stato quello di raccogliere ed organizzare i dati più aggiornati sullo stato dell'arte delle tecnologie CCS applicate agli impianti di produzione di energia elettrica, al fine di realizzare la parte più strettamente tecnica del sito internet dedicato alle CCS. I dati riguardano sia le tecnologie ad oggi prese in considerazione per un immediata applicazione sul mercato, sia le attività di R&S svolte in campo nazionale ed internazionale per migliorare le prestazioni ed i costi delle tecnologie attuali o per studiare e mettere a punto sistemi più innovativi.

### Università dell'Aquila – Dipartimento di Chimica (UNIVAQ)

UNIVAQ è stata coinvolta per svolgere attività di ricerca nell'ambito dell'obiettivo B3.

L'attività di ricerca consiste nella progettazione concettuale e nella verifica della reale fattibilità del processo innovativo e della corrispondente soluzione impiantistica, pensata per un impianto pilota della capacità di 5 MW termici.

L'impianto dovrà soddisfare i seguenti requisiti:

- efficienza dal punto di vista energetico
- semplicità dal punto di vista tecnico-costruttivo e operativo
- affidabilità dal punto di vista della conduzione.

L'attività ha due obiettivi:

1. la sperimentazione per lo studio del ciclo  $\text{CaO-CaCO}_3$  di separazione della  $\text{CO}_2$ : erano previste prove sperimentali, in scala laboratorio, allo scopo di chiarire gli aspetti cinetici riguardanti la cattura della  $\text{CO}_2$  mediante dolomite calcinata, dalla corrente gassosa di composizione simile a quella prodotta nel processo di idro-gassificazione del carbone. I test sperimentali, che vanno ad integrare quelli svolti da ENEA su diverse tipologie di sorbenti e diversa strumentazione, sono condotti in presenza e in assenza di  $\text{H}_2\text{S}$  nel gas alimentato. Successivamente il solido granulare presente nel reattore viene sottoposto a calcinazione. Questa fase dell'attività è attualmente in fase di realizzazione.
2. la definizione e progettazione delle sezioni di idro-gassificazione e di decarbonatazione del gas, di un impianto dimostrativo innovativo per la produzione di idrogeno e elettricità con cattura della  $\text{CO}_2$ . Vengono definite le specifiche per il reattore di idro-gassificazione e per il decarbonatore/calcinatore, ambedue nella taglia corrispondente ad un impianto da 5 MW termici (definizione della geometria delle apparecchiature, dei distributori dei gas di fluidizzazione, nonché degli interni del letto fluidizzato, e della zona di separazione gas/particelle o "freeboard". Definizione degli aspetti fluidodinamici, cinetici e termici. Dimensionamento delle apparecchiature. Condizioni operative nominali. Procedure di accensione e spegnimento dell'impianto). Vengono sviluppati e forniti modelli di calcolo adatti alla definizione quantitativa di tutti i parametri caratterizzanti il reattore di idro-gassificazione e quello di decarbonatazione del gas/calcinazione del solido. Questa fase dell'attività, ha portato alla definizione della configurazione migliore di impianto, come riportato nella descrizione delle attività.

### Università di Roma La Sapienza – Dipartimento di Meccanica & Aeronautica (UNIROMA)

UNIROMA è stata coinvolta per svolgere attività di ricerca nell'ambito dell'obiettivo B3. L'obiettivo fondamentale della attività, è quello di studiare il sistema migliore di applicare le metodologie di desolforazione a caldo nel ciclo innovativo di gassificazione e cattura della  $\text{CO}_2$  Zecomix.

Sono state previste due linee distinte di attività:

1. Analisi comparativa degli impianti di desolforazione di gas caldi. E' stata condotta una ricerca bibliografica sui processi attualmente impiegati per la desolforazione di gas caldi da gassificazione e consultate fonti industriali per tentare di determinare una funzione di costo affidabile per ciascuno di tali processi. E' stato redatto un database di tali costi, e condotte delle valutazioni preliminari di processo che includano i costi di installazione ed operativi, in modo da arrivare ad una stima del "costo di rimozione del kg di  $\text{SO}_2$  equivalente" per ciascun processo considerato separatamente (cioè non integrato nel ciclo ZECOTECH); questa attività è attualmente in fase realizzativa

2. Modellazione di un processo di desolforazione del syngas ad alta temperatura ed implementazione del modello nel simulatore di processo CAMEL-Pro: verrà prodotto un modello termodinamico e termo-economico di un processo di desolforazione a caldo del syngas da idro-gassificazione. Tale processo dovrà risultare “fattibile” secondo i criteri stabiliti nella fase 1 della presente attività. Il modello sarà individuato da opportune equazioni di bilancio di massa e di energia, da un bilancio chimico ragionevolmente realistico, da un “bilancio” dell’exergia, da opportune correlazioni di efficienza sotto diverse condizioni operative e da una sufficiente serie di correlazioni termo-economiche da poter eseguire un’analisi termo-economica del processo in stand-alone e inserito nel ciclo ZECOTECH-2. Le simulazioni saranno eseguite con il codice CAMEL-Pro, redatto ed implementato dal gruppo di ricerca proponente della UDR1 e già in uso presso l’ENEA. Nello stato attuale, è stato messo a punto il modello termodinamico e termo-economico del processo di desolforazione per il codice CAMEL.

## SOTACARBO

SOTACARBO è stata coinvolta per svolgere attività di ricerca nell’ambito dell’obiettivo B4.

Nell’ambito delle attività di studio e di test sperimentali su processi innovativi di gassificazione basati su sistemi di pulizia gas e cattura della CO<sub>2</sub>, le attività di modellistica sia di sistema che del singolo processo, sono fondamentali per tre ordini di motivi: per la definizione del ciclo energetico ottimizzato, per la caratterizzazione del singolo processo ed infine per la messa a punto delle attività sperimentali e la progettazione dei componenti chiave del processo.

Le attività svolte della società Sotacarbo si inquadrano appunto nella modellistica sia di sistema che di singolo processo, con particolare riferimento ai processi di cattura della CO<sub>2</sub> e di desolforazione ad alta temperatura.

Le ricerche effettuate sono le seguenti:

### *1. Studio di processi per l'arricchimento dell'idrogeno nel syngas*

L’attività ha riguardato una analisi teorica, effettuata con l’ausilio dei modelli di simulazione, dei processi di CO-shift (ad alta e bassa temperatura), al fine di valutarne le prestazioni e i limiti di applicazione. In particolare sono state evidenziate le proprietà principali e gli eventuali effetti sul processo di composti quali l’H<sub>2</sub>S.

Sono stati poi effettuati studi teorici e modellistici su sistemi di arricchimento del syngas in idrogeno e CO<sub>2</sub>. In tal modo, in vista di uno scale-up tecnologico, è possibile separare l’anidride carbonica per realizzare un impianto CO<sub>2</sub>-free (con separazione e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>) e utilizzare il syngas arricchito in idrogeno in sistemi di generazione di energia.

### *2. Modellistica di sistema*

Nell’ambito delle attività di modellistica, Sotacarbo ha sviluppato i modelli di simulazione dettagliati delle singole sezioni d’impianto in vista di una loro integrazione. Lo scopo è stato quello di dotarsi di un modello capace di analizzare l’intero processo al fine di valutarne le prestazioni e di individuare le principali problematiche relative a uno studio di scale-up.

## Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS)

OGS è stata coinvolta per svolgere attività di ricerca nell’ambito degli obiettivi C, D1 e D2. Le attività hanno riguardato una serie di azioni atte a divulgare le tecnologie ed i processi legati alla cattura ed al sequestro della CO<sub>2</sub>.

L’obiettivo è quello di valorizzare i risultati degli studi effettuati sulle possibili modalità di sequestro della CO<sub>2</sub> in Italia, ed in particolare nella zona carbonifera del Sulcis, da una parte attraverso l’analisi dei risultati degli studi effettuati sulla tecnologia ECBM, dall’altra attraverso un’azione divulgativa che si concretizzerà con la realizzazione di un sito internet sulle tecnologie CCS.

Le attività effettuate sono state le seguenti:

### *1. Survey geologico e studi delle potenzialità di applicazione dell’ECBM nei giacimenti carboniferi del Sulcis*

Allo scopo di inquadrare le attività che saranno svolte in ambito italiano nel contesto più ampio di analoghe iniziative in Europa e nel mondo, si sta redigendo una relazione che descrive ed analizza alla data i più importanti progetti di confinamento geologico della CO<sub>2</sub> in giacimenti di carbone. Tale attività è stata svolta in coordinamento con le attività di Carbosulcis sullo stesso tema.

## 2. Attività di informazione tecnologica e divulgazione delle tecnologie

L'attività ha avuto come obiettivo la realizzazione di una serie di azioni di informazione tecnologica e divulgazione delle tecnologie, attraverso l'attivazione del sito internet dell'Associazione Italiana sulla CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> Club), nonché la gestione del Segretariato della Associazione.

In tale sito è in corso di implementazione lo stato dell'arte sulle tecnologie CCS e le attività di ricerca in atto in Italia e nel mondo per migliorarne l'efficienza ed ottimizzarne i costi.

L'obiettivo è stato raggiunto, tranne che per il completamento del sito nelle parti relative allo stato dell'arte delle tecnologie, effettuato in coordinamento con il POLIMI che ha fornito la documentazione tecnica da inserire nel sito stesso.

### CARBOSULCIS

CARBOSULCIS è stata coinvolta per svolgere attività di ricerca nell'ambito dell'obiettivo C. Le attività di studio affidate a CARBOSULCIS sono state relative al survey geologico e studio delle potenzialità di applicazione di tecnologie ECBM nel giacimento carbonifero del Sulcis e di CO<sub>2</sub> storage nel sottostante acquifero salino profondo che vanno così a integrare gli studi fatti sul restante territorio nazionale in coordinamento con OGS e ERSE (oggi RSE, Ricerca Sistema Energetico).

Il coinvolgimento della Carbosulcis S.p.A. è stato suggerito oltre che da motivazioni di ordine territoriale anche dalla collaborazione già operante con la società partecipata Sotacarbo e l'ENEA stesso. In particolare la Carbosulcis è a livello nazionale il più importante partner nel settore minerario legato al carbone. Il suo contributo risulta determinante per il know how acquisito sulle tematiche connesse allo storage della CO<sub>2</sub> oltre che alla conoscenza e allo sviluppo delle tecnologie per lo sfruttamento del grande bacino carbonifero del Sulcis.

Nell'ambito dell'attività di applicazione delle tecnologie ECBM/CO<sub>2</sub> storage, Carbosulcis sta approfondendo le tematiche legate alla caratterizzazione geologica dei siti di CO<sub>2</sub> storage in generale e sulle potenzialità del grande giacimento carbonifero del Sulcis in particolare. Allo scopo di valorizzare in ambito internazionale le attività svolte sulle tecnologie ECBM/CO<sub>2</sub> storage in Italia, si sta effettuando un'analisi complessiva dei vari risultati connessi a tali attività ai fini di concordare e coordinare le azioni necessarie sia per una partecipazione a progetti internazionali sia per la definizione delle attività future.



## Censimento del potenziale energetico nazionale delle biomasse

In Italia esistono studi e stime sulle potenzialità della biomassa contenuti nei piani energetici regionali. Pur essendo dei validi strumenti orientativi, i piani energetici presentano alcune limitazioni, la prima è la non specificità dei rapporti sull'aspetto biomassa, infatti le relazioni contengono tutti gli aspetti energetici regionali, la stima della biomassa non è che una minima parte di rapporti di centinaia di pagine.

Altro limite la natura regionale delle stime, questo rappresenta una barriera, per esempio nel caso di studi di fattibilità di filiere energetiche multiregionali, in quanto i dati di più regioni non sono automaticamente ed elettronicamente confrontabili e computabili. L'altro grosso problema risiede nella natura dei dati, che non sono in formato elettronico di database, mancano di standard, mancano di corrispondenza cronologica nelle varie regioni, che emettono il rapporto in anni diversi e riferiscono i dati ad anni diversi.

Le moderne esigenze di visualizzazione ed elaborazioni interattive dei dati, tra cui quelle delle stime delle biomasse, sono soddisfatte dall'utilizzo dei Sistemi informativi territoriali o GIS (Geographical Information System), software di estrema potenza e sofisticazione, ma interattivi e intuitivi, che consentono agli utilizzatori finali vari gradi di elaborazione e visualizzazione di risultati, senza necessariamente essere esperti di GIS.

Il GIS permette di gestire i Database, ma nello stesso tempo importa ed elabora dati da telerilevamento satellitare che sono sempre più usati nella diagnostica ambientale e agroforestale su vasta scala. Le mappe sono sempre più un prodotto informatico e non solo cartaceo, il GIS importa ed elabora tutti i moderni dati geografici e di uso suolo, in formato digitale, ormai base della nuova cartografia, trend provato da fatti reali come la informatizzazione degli archivi del catasto, oppure il prossimo sistema informativo dell' AGEA con investimenti di 1,3 miliardi di Euro.

Le applicazioni dedicate GIS biomassa in Italia sono oggi riferite a iniziative locali e frammentate sul territorio, sono servite a dimostrare l'applicabilità del sistema su aree ristrette, manca un riferimento nazionale unico a copertura dell'intero territorio nazionale.

### DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo del progetto è la creazione di un sistema informativo territoriale consultabile in modalità WEB-GIS. Il sistema contiene le informazioni sulle potenzialità della biomassa agricola e forestale nazionale e sul biogas potenzialmente ottenibile dalla fermentazione anaerobica di reflui di allevamenti suini e bovini in stabulazione, dagli scarti di macellazione, dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani.

L'attività programmata prevedeva i seguenti obiettivi:

**A. Verifica delle produttività specifiche territoriali delle colture agricole e forestali e agroindustria. Relazione tra residui e colture. Selezione e acquisizione di inventari, geodati, mappe telerilevate e classificate di uso suolo.** Determinazione delle tipologie di biomasse residuali agricole, rilievo su base provinciale del rapporto ponderale tra prodotto agricolo principale e residuo associato. Rilievo del potenziale provinciale di legno forestale accessibile. Determinazione della produttività unitaria delle colture energetiche dedicate. Individuazione del potenziale di biogas producibile dai reflui allevamenti, scarti di macellazione, Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani. Selezione e acquisizione di software specialistici, inventari, geodati, mappe telerilevate e classificate di uso suolo.

#### B. Indagini di mercato sulle biomasse

Indagini sui mercati della biomassa, metodo WISDOM per le biomasse forestali, analisi regionale delle frazioni di biomassa residuale agricola conferite e utilizzate per le categorie censibili.

#### C. Test dei software e prove di calcolo

Implementazione degli algoritmi di calcolo e costruzione di 7 database geografici rappresentativi delle biomasse censite, costruzione del sistema informativo territoriale operante in modalità GIS, messa in opera del server dedicato e software APOLLO ERDAS per la consultazione interattiva dei dati in modalità WEB GIS.

## RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Le varie tipologie di biomassa censite sono riferite e rappresentate a livello provinciale. Il WEB-GIS prodotto, consultabile in rete all'indirizzo [www.atlantebiomasse.enea.it](http://www.atlantebiomasse.enea.it), contiene tutti gli elementi della moderna cartografia elettronica, come vie di comunicazione, aree protette, zone urbane, immagini satellitari. I geodatabase delle biomasse sono scaricabili come tabelle excel, ma anche messi a disposizione in modalità WMS (Web Map Server) per essere utilizzati in formato geografico da utenti professionali.

La stima delle biomasse residuali è un'importante operazione alla base della pianificazione energetica dell'impiego della risorsa stessa. È infatti importante comprendere quali siano le potenzialità delle biomasse per l'energia e se queste possano significativamente incidere sul bilancio energetico di un territorio in modo economicamente sostenibile e rinnovabile nel tempo.

Il settore agro-alimentare costituisce uno dei comparti produttivi a cui sono attribuibili le più elevate produzioni di biomasse residuali. Per la quantificazione di questi residui non è però possibile avvalersi dei MUD, moduli previsti per legge per la dichiarazione dei rifiuti prodotti da attività industriali o artigianali, che non sono richiesti nel caso di attività agricole. Occorre infatti sottolineare come l'applicazione della definizione di rifiuto non risulti del tutto congruente con la realtà dei fatti in quanto tali prodotti sono da sempre riutilizzati come co-prodotti o lasciati sul campo, il che equivale a un riciclo a circuito breve della sostanza organica.

Pertanto l'unico strumento efficace è rappresentato da studi specifici di settore o rilievi diretti che consentano di determinare le produzioni di biomasse residuali per unità di prodotto reso.

Stimare la disponibilità dei residui agricoli è un'operazione complessa, soprattutto a causa delle differenze in resa, tipologia e umidità tra le diverse colture. Per avere a disposizione dati e parametri il più possibile attendibili e relativi ad una particolare area geografica, occorre eseguire un lavoro di raccolta di dati sulla quantità dei residui derivanti da colture e dall'area in esame. I valori che caratterizzano una coltura dipendono infatti strettamente da fattori come le condizioni climatiche della zona, la fertilità del terreno, il sistema produttivo e la tecnologia utilizzata.

Per quanto riguarda i residui agro-industriali occorre sottolineare che, a differenza dei residui agricoli, non si ha una differenziazione degli indici di produzione in base all'area geografica esaminata, ma più che altro a seconda del processo produttivo. Ad esempio nel caso delle vinacce la loro produzione dipende sia dalla dimensione produttiva sia dalla tecnica utilizzata nel processo di vinificazione.

Le colture analizzate sono state scelte in base alla diffusione nelle regioni di competenza, assieme al tipo di residuo e al relativo periodo di produzione.

Uno sforzo notevole è stato applicato per la definizione di produttività unitaria delle colture energetiche, è semplice ricordare che non si tratta di produzioni di tipo industriale, ma le piante sono organismi viventi la cui crescita e sviluppo dipende dalle condizioni pedoclimatiche, irrigazione e nutrizione, ma nello stesso tempo consapevoli che è necessario dare una stima di produttività si è definita una metodologia che fornisse dei dati indicativi.

Anche per la stima della disponibilità forestale, soprattutto in Italia dove le foreste sono spesso in aree montane, spesso soggette a vincoli ambientali, si sono definiti dei criteri di accessibilità per arrivare al potenziale forestale prelevabile.

Infine si sono definiti i comparti produttivi principali, potenziali produttori di biomassa fermentabile e quindi biogas, costruendo attraverso algoritmi dedicati quattro database consultabili.

Per quanto riguarda le aziende agrarie, si è richiesto a Confagricoltura un elenco di nominativi da poter contattare per ciascuna provincia delle regioni di competenza. Al fine di verificare i dati ricevuti sono state effettuate delle visite presso alcune aziende che hanno dato la propria disponibilità; tali sopralluoghi sono serviti anche ad effettuare il campionamento delle biomasse residuali al momento della raccolta o al termine del processo industriale.

Nel seguito si descrivono nel dettaglio le attività svolte nel quadro dei singoli obiettivi.

### **A. Verifica delle produttività specifiche territoriali delle colture agricole e forestali e agroindustria. Relazione tra residui e colture. Selezione e acquisizione di inventari, geodati, mappe telerilevate e classificate di uso suolo**

#### **A1. Foglio elettronico acquisizione automatica banca dati annuale ISTAT**

Annualmente l'ISTAT pubblica e aggiorna 107 database, rappresentativi delle superfici e produzioni agricole delle province italiane, circa 150 coltivazioni sono censite. Vista l'enorme mole di dati da acquisire, circa 600 record per



provincia, ed il continuo aggiornamento a cui è soggetto il dato sorgente, il foglio elettronico sviluppato contiene macro in visual basic, con la funzione di confrontare automaticamente le varie coltivazioni ed evidenziare incongruenze numeriche. Con i fogli elettronici si è provveduta all'acquisizione del dato della campagna agronomica 2006, la prima disponibile con dati definitivi. Il contenuto del foglio elettronico, elaborato con algoritmi dedicati è poi stato trasformato in geodatabase.

## A2. Fogli di calcolo e realizzazione database

Sono stati realizzati i **fogli elettronici per l'inserimento dei dati censiti** e personalizzati in base alle attività di indagine da svolgere e sono stati inviati alle cinque università cobeneficiarie. E' stato creato un foglio per l'indagine agricola, uno per quella forestale, uno per colture da energia, quattro per le biomasse fermentabili. I fogli sono stati creati in maniera tale da poter subire controlli di congruità automatici, attraverso Visual Basic, e poi generare il geodatabase con gli algoritmi sviluppati, parametri e dati rilevati nelle indagini sono stati inseriti nei fogli elettronici, dove sono riscontrabili rapporti residuo prodotto sui prodotti agricoli e forestali, le biomasse fermentabili, le colture energetiche erbacee.

## A3. Indagine biomassa agricola

E' stato **realizzato il database della biomassa residuale agricola italiana**, metodo ENEA-AIGR, anno agronomico 2006, che contiene i quantitativi potenziali teorici relativi a paglie cereali, stocchi mais, potature fruttiferi, frasca olivo, sarmenti vite, gusci rotta secca, lolla di riso, espressi in tonnellate di sostanza secca annua presenti nelle province italiane. Il database utilizza come input di calcolo le acquisizioni dati ISTAT agricoltura, le stime preliminari di produttività residuo associata a coltura principale, la caratterizzazione chimico fisica del residui, principalmente umidità e potere calorifico.

Si sono prima individuate le colture da investigare e la stagionalità.

**Tabella 36. Colture analizzate e periodo di produzione dei relativi residui**

| Coltura         | Residuo  | Periodo di produzione |
|-----------------|----------|-----------------------|
| Frumento tenero | paglia   | Giugno – Luglio       |
| Frumento duro   | paglia   | Giugno – Agosto       |
| Orzo            | paglia   | Luglio – Agosto       |
| Avena           | paglia   | Luglio – Agosto       |
| Mais            | stocchi  | Ottobre – Novembre    |
| Riso            | paglia   | Ottobre – Novembre    |
| Vite            | potature | Novembre – Febbraio   |
| Olivo           | potature | Gennaio – Aprile      |
| Melo            | potature | Dicembre – Febbraio   |
| Pero            | potature | Dicembre – Febbraio   |
| Pesco           | potature | Dicembre – Febbraio   |
| Mandorlo        | potature | Novembre – Dicembre   |
| Agrumi          | potature | Febbraio – Marzo      |
| Nocciolo        | potature | Novembre – Dicembre   |

A seconda della posizione geografica (Nord, Centro, Sud) dei siti di coltivazione, le produzioni di alcuni residui diminuiscono (ad esempio la paglia prodotta dal grano tenero) mentre quelle di altri aumentano (ad esempio i residui di potatura degli olivi) spostandosi da Nord a Sud. Ciò a causa delle variazioni del clima e delle caratteristiche del suolo. Questo perché piogge più frequenti nelle regioni del Nord favoriscono la crescita delle piante di frumento, mentre il clima più mite del Sud favorisce lo sviluppo degli alberi di olivo, che producono più residui di potatura.

Per definire con ragionevole accuratezza le quantità di scarti agricoli su base provinciale è stato necessario ricorrere a metodi di stima basati sulla conoscenza del rapporto esistente tra produzioni principali e il residuo associato. Per il prodotto principale, frutta, cereali, legumi L'ISTAT stima annualmente le produzioni e le superfici agricole utilizzate, il residuo normalmente è lasciato sul campo – eventualmente sminuzzato per favorire la sua umificazione – o utilizzato nella zootecnia o in altri settori).

La metodologia ENEA permette di passare dalla conoscenza delle produzioni agricole principale pubblicata su ISTAT, e stimare i quantitativi di residui attraverso l'utilizzo di fattori di conversione rilevati sul campo. Sono stati considerati i seguenti tipi di biomasse.

**Sottoprodotti culturali**, suddivisi in:

- **erbacee**: frumento tenero e duro, orzo, riso, avena, segale, mais
- **arboree**: vite, olivo, agrumi, pesco, albicocco, melo, pero, mandorlo, nocciolo, ciliegio, nettarine, susino.

La valutazione è stata basata sul calcolo delle masse di residui a partire da dati statistici relativi alle produzioni agricole, rilevati sul campo, confrontati e integrati con dati bibliografici sul rapporto tra quantità di residui per unità di prodotto (rapporto sottoprodotto/prodotto). È opportuno sottolineare che questo ultimo parametro rappresenta il punto chiave di tutta la stima, in quanto i valori dei rapporti sottoprodotto/prodotto nella realtà operativa variano in relazione a molteplici fattori quali: varietà, tecnica culturale, condizioni pedoclimatiche, tecniche di raccolta, aspetti fitopatologici, ecc.

La valutazione del potenziale energetico presente nell'unità territoriale di indagine è stata basata sul reperimento delle seguenti informazioni:

#### ***Biomassa Agricola***

- colture più importanti e, fra queste, selezione di quelle con sottoprodotti idonei alla conversione energetica;
- superfici e produzioni in termini di prodotto principale alla raccolta delle colture selezionate;
- quantità di sottoprodotto in relazione all'unità di massa di prodotto principale o all'unità di superficie coltivata;

I dati statistici sono stati desunti in gran parte dal DataWarehouse dati congiunturali agricoltura disponibile sul sito web dell'ISTAT ed estratti con disaggregazione fino al livello provinciale.

Il geodatabase costituisce le fondamenta del Sistema Informativo Territoriale poiché progettato per operare con dati riferiti allo spazio geografico. In altre parole si ottiene uno strumento informatico in grado di visualizzare, manipolare ed analizzare dati di tipo geografico e di collegare inoltre dei database ad "oggetti geografici georeferenziati", per ottenere "mappe dinamiche intelligenti" in grado di rendere chiaramente analizzabili le informazioni disponibili sul territorio in oggetto.

#### ***Rappresentazione ed elaborazione grafica***

Una volta determinati i quantitativi di biomasse vegetali nel database, si può valutare graficamente, la distribuzione geografica delle stesse nelle province, avere interattivamente mappe tematiche, interrogare il database con query SQL, avere tabelle e statistiche.

Per la rappresentazione della distribuzione geografica si è lavorato su un file \*.shp\* dei confini provinciali

Le formule principali applicate sono in sintesi sotto riportate:

#### ***Dati del foglio di calcolo***

- Prodotto: [Prodotto principale della coltura considerata]
- Sottoprodotto (SI): [Sottoprodotto principale della coltura]
- Superficie in produzione: [Superficie occupata dalla coltura in grado di fornire prodotto; ha; input: dato statistico; ISTAT: Istat 2006]
- Produzione raccolta: [Massa di prodotto raccolto sulla superficie in produzione; t/anno di t.q.; input: dato statistico; ISTAT 2006]
- Sottoprodotto / Prodotto: [Rapporto tra le masse di prodotto principale e di sottoprodotto principale della coltura]
- Umidità S1: [Contenuto medio in acqua del sottoprodotto principale al recupero; % sul t.q.].

#### ***Procedure di calcolo degli output***

Disponibilità lorda sottoprodotto = [Produzione raccolta] x [Sottoprodotto / prodotto] x [1 -(Umidità /100)]

Poi con gli algoritmi sviluppati si è costruito il database (vedi paragrafo risultati finali), che nella sua versione estesa, realizzata, censisce paglie dei cereali compresi stocchi di mais, potature fruttiferi, frasca olivo, sarmenti

vite, per tutte le province italiane; il database nella sua versione definitiva include i potenziali dei residui agroindustriali: sanse; vinacce; gusci e lolla; espressa in tonnellate di sostanza secca annua.

#### A4. Indagine biomassa forestale

E' stato realizzato il database disponibilità biomassa forestale, metodo WISDOM, relativo a boschi a prevalenza latifoglie, boschi a prevalenza conifere, arboricoltura con le disponibilità e bilanci. Il calcolo della disponibilità di biomasse legnose per le finalità appena esposte, richiede la conoscenza di tre elementi di seguito illustrati.

**Produttività annua potenziale sostenibile** di biomassa legnosa per fini energetici; si tratta cioè di stimare la quota parte di biomassa legnosa annualmente prodotta nel territorio in esame (nella fattispecie, nel comprensorio forestale provinciale) che può essere utilizzata in modo sostenibile, ovvero entro i limiti di naturale rinnovabilità della risorsa; la quantificazione di tale aspetto richiede la conoscenza:

- 1) dell'entità della superficie forestale presente nell'unità territoriale esaminata, ripartita per forme di governo (fustaia e ceduo) e specie dominanti;
- 2) dei valori di incremento legnoso attribuibili alle differenti forme di governo e specie dominanti nell'area esaminata.

A partire da questi dati e utilizzando alcune semplici assunzioni è possibile ottenere una stima della *produttività annua potenziale sostenibile* nel territorio esaminato (t/anno di sostanza secca).

**Produttività annua potenziale sostenibile al netto delle limitazioni** di biomassa legnosa per fini energetici; non tutta la produttività annua potenziale sostenibile è effettivamente ritraibile dal bosco e dunque trasformabile in energia; in un'ottica di sostenibilità ambientale delle utilizzazioni forestali è opportuno introdurre restrizioni al prelievo rispetto al potenziale massimo, anche nelle condizioni stazionali più favorevoli alla meccanizzazione delle utilizzazioni forestali; si deve inoltre tener conto delle limitazioni connesse all'accessibilità dei soprassuoli forestali, che condizionano l'ambito di convenienza economica delle utilizzazioni. Pertanto la disponibilità netta a scala territoriale di biomassa legnosa può ridursi anche sensibilmente rispetto alla produttività potenziale sostenibile, in relazione alla distribuzione spaziale delle superfici forestali.

**Consumi di biomassa legnosa per uso domestico e industriale.** Nell'ottica di una quantificazione a scala territoriale della biomassa legnosa effettivamente disponibile per l'alimentazione di impianti di trasformazione della biomassa è necessario conoscere i quantitativi eventualmente già destinati a impieghi energetici. È importante sottolineare come i dati relativi ai prelievi legnosi per uso energetico della fonte statistica ufficiale (ISTAT) non forniscano un dato attendibile circa i consumi effettivi di biomassa legnosa, per diversi motivi:

- sottostimano i consumi reali in quanto si limitano alle utilizzazioni forestali rilevate attraverso le dichiarazioni di taglio fornite al Corpo Forestale dello Stato (CORONA *et al.*, 2007);
- escludono il contributo delle coltivazioni arboree e degli alberi fuori foresta;
- sono in genere scarsamente attendibili per la stima dell'autoapprovvigionamento (GERARDI *et al.*, 1998; TOMASSETTI, 2000; GERARDI e PERELLA, 2001).

Tenuto conto di tali considerazioni, la metodologia applicata nella presente ricerca si differenzia dall'ipotesi di sviluppo energetico da biomasse forestali a cui fa concettualmente riferimento l'allegato tecnico dell'Accordo di Collaborazione (AIGR, 1994); il modello di stima adottato in tale studio impiega come dati di input i dati ISTAT delle statistiche forestali relativi a superficie forestale, superficie forestale utilizzata e quantità di legna utilizzata da lavoro e energia, che per le ragioni sopra esposte non possono essere considerati attendibili.

La metodologia proposta, invece, utilizza dati cartografici e inventariali per produrre una stima geograficamente dettagliata del bilancio annuo tra produttività potenziale sostenibile a netto delle limitazioni di biomassa legnosa (di seguito, produttività potenziale sostenibile netta) e il consumo domestico di biomassa legnosa; la valutazione è basata sulla metodologia Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM), elaborata in ambito FAO (FAO, 2003; MASERA *et al.*, 2006) e recentemente applicata in Italia per una stima a carattere preliminare del bilancio della domanda e dell'offerta di combustibili legnosi a scala regionale (DRIGO *et al.*, 2007).

Un aspetto distintivo e qualificante della metodologia WISDOM è la sua flessibilità d'applicazione a diversi livelli di aggregazione territoriale (nazionale, regionale, provinciale, comunale). Pertanto essa si presta come strumento d'analisi territoriale ottimale per la produzione di bilanci domanda/offerta georeferenziati.

## Metodologia di stima dell'offerta di biomassa legnosa a fini energetici

La stima della produttività annua potenziale sostenibile netta di biomassa legnosa per usi energetici a scala provinciale deriva dalla somma della produttività potenziale di combustibili legnosi per differenti tipologie fisionomiche di bosco ridotta in funzione di serie di limitazioni connesse a fattori stagionali e d'accessibilità

Le fisionomie di bosco considerate corrispondono a:

- boschi a prevalenza di latifoglie;
- boschi a prevalenza di conifere;
- impianti di arboricoltura da legno, principalmente rappresentati da impianti di latifoglie.

## Stima della produttività potenziale annua sostenibile

L'informazione di riferimento per la stima della superficie forestale provinciale è stata derivata dalla cartografia Corine Land Cover di IV Livello rilevata al 2000 (CLC2000); essa rappresenta il riferimento cartografico più dettagliato e recente (APAT, 2005) per la mappatura delle principali tipologie di bosco presenti sul territorio nazionale (superficie minima cartografata 25 ha). I boschi a prevalenza di latifoglie sono cartografati attraverso 14 classi fisionomiche, quelli a prevalenza di conifere attraverso 10 classi fisionomiche e gli impianti di arboricoltura da legno di latifoglie attraverso 3 classi fisionomiche.

La dimensione dell'unità minima cartografabile del CLC2000 non consente una mappatura accurata delle superfici investite ad arboricoltura da legno, impianti di dimensione nell'ordine dell'ettaro, nella maggior parte dei casi. Non essendo disponibili altri dati cartografici aggiornati a copertura nazionale relativi alle piantagioni fuori foresta, la disponibilità di biomassa legnosa per usi energetici ritraibile da queste superfici forestali risulta inevitabilmente sottostimata.

In alternativa, per la stima delle superfici forestali provinciali potevano essere utilizzati i dati di terza fase del più recente Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio (INFC, 2007); tuttavia il geodataset dei dati inventariali di terza fase non risulta accessibile a utenti esterni, nemmeno per motivati scopi di ricerca.

Pertanto, si è operato come segue:

- 1) ogni poligono di bosco della copertura CLC2000 è stato classificato preliminarmente secondo la forma di governo prevalente (fustaia/ceduo), sulla base della distribuzione geografica dei punti inventariali dall'Inventario Forestale Nazionale Italiano del 1985 (IFNI 85; ISAF, 1988);
- 2) per le fustaie di conifere o latifoglie la produttività di biomassa legnosa per usi energetici è stata quantificata sulla base degli scarti delle utilizzazioni forestali (rami e cimale), ovvero quella frazione di biomassa derivante dagli scarti di lavorazione del legname da lavoro prodotto dalla fustaia che può essere impiegata per scopi energetici previa trasformazione in cippato; tale frazione può essere stimata come aliquota del volume dendrometrico totale, e rappresenta in larghissima media il 30-35% del volume dendrometrico totale dei boschi a prevalenza di latifoglie e il 15-20% nei boschi a prevalenza di conifere (APAT, 2003). Tale aliquota è stata applicata all'incremento corrente di volume derivato per le diverse fisionomie forestali mappate dal CLC2000 e con dettaglio regionale in base ai dati INFC (INFC, 2007), corretto per il fattore di espansione BEF (Biomass Expansion Factor) per ottenere l'incremento attribuibile al volume dendrometrico totale. Pertanto a ciascun poligono di bosco della copertura CLC2000 classificato come fustaia, in base alla regione e alla classe fisionomica di appartenenza, è attribuita una stima della produttività annua potenziale sostenibile espressa attraverso un campo di variazione così derivato:

Fustaie di conifere

$$\text{Minimo} = Ic_{\text{INFC}} * (1 - 2ES\%) * db * BEF * 0,15$$

$$\text{Massimo} = Ic_{\text{INFC}} * (1 + 2ES\%) * db * BEF * 0,30$$

Fustaie di latifoglie

$$\text{Minimo} = Ic_{\text{INFC}} * (1 - 2ES\%) * db * BEF * 0,30$$

$$\text{Massimo} = Ic_{\text{INFC}} * (1 + 2ES\%) * db * BEF * 0,35$$

dove:

$Ic_{\text{INFC}}$  = incremento corrente INFC per specie/gruppi di specie e per regione amministrativa

ES% = errore standard della stima dell'incremento corrente INFC per specie/gruppi di specie a livello nazionale

db = densità basale per specie/gruppi di specie secondo i valori riportati in APAT (2007)

BEF = fattore di espansione BEF per specie/gruppi di specie secondo i valori riportati in APAT (2007)

È stato inoltre associato a ciascun poligono anche un valore medio derivato come mediana del campo di variazione sopra definito.

3) per i **cedui** la stima della produttività potenziale annua sostenibile si basa sulle seguenti assunzioni:

- i boschi cedui sono utilizzati sulla base del turno fisiocratico T; in corrispondenza di T l'incremento corrente di volume ( $I_c$ ) è pari all'incremento medio ( $I_m$ );
- la superficie totale a bosco ceduo nell'unità territoriale di riferimento (S), in questo caso la provincia, è assestata; quindi, la superficie annualmente utilizzabile è pari  $s = S/T$ ;
- nelle condizioni suddette, ipotizzando di destinare interamente per scopi energetici l'intera provvigione presente nella frazione di superficie annualmente utilizzabile, la **produttività potenziale annua sostenibile dei boschi cedui** riferita alla superficie S può essere stimata come:

$$S/T * I_m * T = I_c * S$$

Anche in questo caso la stima della produttività annua potenziale è espressa attraverso un *campo di variazione* così derivato:

$$\text{Minimo} = I_{c \text{ INFC}} * (1 - 2ES\%) * db * BEF$$

$$\text{Massimo} = I_{c \text{ INFC}} * (1 + 2ES\%) * db * BEF$$

L'unica eccezione è rappresentata dai cedui di castagno ove una frazione della provvigione totale è finalizzata alla produzione di paleria, orientativamente stimata pari al 50% del volume totale (Castellani, 1982). Pertanto, il campo di variazione relativo alla stima della produttività annua potenziale nei cedui di castagno, è così definito:

$$\text{Minimo} = 0,5 * I_{c \text{ INFC}} * (1 - 2ES\%) * db * BEF$$

$$\text{Massimo} = 0,5 * I_{c \text{ INFC}} * (1 + 2ES\%) * db * BEF$$

Così come per le fustaie, insieme alla stima del campo di variazione è stata calcolato un valore medio della produttività annua potenziale.

#### A5. Stima della produttività Colture energetiche erbacee

Lo studio è finalizzato a stimare le produzioni potenziali di colture erbacee da energia nelle diverse province italiane, elemento di particolare interesse ai fini della pianificazione territoriale e della dislocazione degli impianti di trasformazione.

Mentre per le colture erbacee tradizionali (es. frumento e mais), e in minor misura anche per quelle da biomassa arboree (es. pioppo), esiste una rete nazionale di prove e dati abbastanza particolareggiata da permettere una stima diretta delle potenzialità produttive delle colture a livello provinciale, il settore delle colture da biomassa erbacee è ancora ampiamente scoperto, con esperienze sufficientemente rappresentative in meno di 10 province (Bologna, Udine, Catania, Pisa, Bari, Potenza). Di conseguenza, una stima capillare della produttività richiede estrapolazioni e raffronti indiretti. In tale ottica, viene di seguito descritta la metodologia utilizzata con l'obiettivo di creare un "atlante italiano delle biomasse" a livello di singole province e/o di aggregati territoriali più ampi.

##### Metodologia stima colture erbacee

La metodologia si compone di una sequenza di passaggi logici riassunti di seguito esposti

##### Aggregati territoriali

Sono state individuate zone eco-pedologiche derivate dall'omonima carta, reperibile in formato interattivo sul sito Internet del Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'Ambiente (<http://www.pcn.minambiente.it/PCN/>). La carta eco-pedologica, realizzata per soddisfare gli obiettivi di caratterizzazione dei suoli e l'individuazione delle relazioni suolo-vegetazione, si configura come elemento di raccordo delle varie componenti della Carta della Natura (esclusa la parte faunistica): geologia, geo-morfologia, suolo, vegetazione e clima. La carta ecopedologica è quindi stata individuata come fonte di zonazione più appropriata per suddividere il territorio italiano in aree omogenee dal punto di vista agro-climatico, partendo dal presupposto che la costruzione ad hoc di aree pedo-climatiche che rispondano alle esigenze specifiche (es. dotazione di elementi nutritivi, disponibilità idriche ecc.) delle colture da energia presupporrebbe un lavoro a sé stante.

Il Servizio Cartografico Nazionale ha suddiviso il territorio italiano in 13 zone omogenee per caratteristiche eco-pedologiche. Le province a cavallo di più zone sono state attribuite alle zone che per estensione le rappresentavano maggiormente.

#### *Calcolo degli indici, della produttività media provinciale delle colture*

- Tale metodologia adottata si sviluppa attraverso un processo iterativo sintetizzato nei seguenti punti:
  - scelta di una coltura di riferimento (CR) su cui indicizzare la vocazionalità del territorio delle diverse province. Il mais è stato scelto quale CR essendo quella con ciclo primaverile estivo (quindi grosso modo analogo a quello delle colture erbacee dedicate qui considerate) più diffusa nel territorio nazionale;
  - sulla base dei dati ISTAT, è stato costruito un database della produttività del mais suddiviso per singola provincia nel decennio 1999-2008. La valutazione della produttività del mais in un decennio, anziché per un solo anno, ha permesso di calcolare successivamente la variabilità temporale dell'indice di vocazionalità e quindi la variabilità temporale della produttività potenziale delle colture da biomassa.
- Il calcolo dell'indice di vocazionalità (IV; adimensionale) per ogni *i*-esima provincia è stato calcolato come:

$$IV = R_{CRi}/R_{CRr}$$

ove  $R_{CRi}$  è la resa del mais nella *i*-esima provincia (fonte ISTAT), mentre  $R_{CRr}$  è la resa del mais nella provincia di riferimento (Bologna). Quest'ultima è stata scelta come riferimento poiché è la stessa provincia in cui sono state misurate le rese medie delle colture da energia (Barbanti et al., 2008; Bezzi et al., 2006, 2007; Monti et al., 2004). Tali rese sono state ottenute mediando le rese produttive di un settennio escludendo, per le colture poliennali, l'anno di impianto. In particolare le rese medie ( $t\ ha^{-1}$  di sostanza secca) sono risultate le seguenti: *Arundo donax* = 23,6; *Panicum virgatum* = 14,2; *Cynara cardunculus* = 7,6; *Miscanthus sinensis* x *Giganteus* = 18,8; *Sorghum bicolor* = 19,3.

Calcolati gli indici di vocazionalità (IV) e le rispettive deviazioni standard, si è potuto stimare la produzione media delle colture da energia nella *i*-esima provincia ( $PM_i$ ) semplicemente moltiplicando la resa della coltura da biomassa nella provincia di riferimento ( $PM_r$ ) per i relativi IV provinciali ( $IV_i$ ):

$$PM_i = IV_i \cdot PM_r$$

Rispetto alle biomasse, per le principali oleaginose destinate alla produzione di biodiesel (girasole, colza), esistono dati statistici di colture commerciali in larga parte del territorio nazionale. Ove presenti, ci si è pertanto riferiti ([www.istat.it/agricoltura/datiagri/coltivazioni/](http://www.istat.it/agricoltura/datiagri/coltivazioni/)) ai dati provinciali ISTAT 2006, scelta come annata di riferimento per questo studio e non caratterizzata, da nord a sud, da profonde anomalie climatiche.

In tutte quelle province in cui anche per girasole e colza non si dispone di dati, sono stati adottati valori di riferimento costruiti nel modo seguente:

1. nelle province in cui si dispone di dati per il 2006, confronto fra produzioni di girasole e colza con quelle di cereali di riferimento (frumento tenero, orzo e mais);
2. scelta del cereale di riferimento, per ciascuna delle due oleaginose, in base alla bontà statistica della relazione trovata;
3. costruzione del dato nelle province mancanti attraverso l'equazione lineare che lega i dati del cereale (variabile indipendente) a quelli dell'oleaginosa (variabile dipendente).

#### **Limiti della metodologia stima colture dedicate erbacee**

Un limite della metodologia è rappresentato dall'attribuzione di una provincia ad una specifica zona eco-pedologica quando invece la Provincia stessa si trova a cavallo di più zone. In tal caso è stato scelto di attribuire la Provincia alla zona che più ne rappresenta l'estensione territoriale.

Altro limite è rappresentato dalla impossibilità di tenere conto della disomogeneità territoriale all'interno di una stessa provincia. Moltissimi sono i casi infatti di province comprendenti zone pianeggianti e collinari, terreni sciolti e compatti, aree a diversa piovosità annuale, aree a diverso indirizzo produttivo ecc. L'individuazione della produttività media potenziale su scala provinciale, dovrebbe prevedere l'impostazione di un lavoro *ad hoc* che tenga conto della variabilità delle caratteristiche pedo-climatiche di una singola provincia, per giungere alla distinzione di zone pedo-climatiche con diversi gradi di vocazione alla produzione di specie dedicate da biomassa. Non essendo prevista dal lavoro in oggetto e richiedendo un tempo e un impegno sicuramente molto consistenti,

ove sia realizzabile, questa fase operativa è stata sostituita dall'utilizzo della zonazione eco-pedologica prodotta dal Ministero per l'Ambiente.

Se i gruppi eco-pedologici rappresentano un metodo per omogeneizzare zone geografiche in base alle caratteristiche del suolo, climatiche e quindi del rapporto pianta-suolo-atmosfera, il raggruppamento di Province, e quindi l'attribuzione del valore medio di resa, può portare ad una diminuzione nell'accuratezza del dato. Per contro, il raggruppamento di più provincie all'interno di una stessa area permette il calcolo della deviazione standard spaziale oltreché temporale, come calcolata dalla media di produzione decennale.

I risultati di produttività potenziale delle Province italiane andrebbero inoltre letti non solo in senso assoluto, ma in relazione alla qualità della superficie agricola utilizzabile e della sua destinazione. Se infatti una provincia presenta una grande SAU, ma prevalentemente adibita a produzioni alimentari con buoni sbocchi economici, sarà difficile prevedere una sostituzione di tali colture con quelle energetiche. É forse più realistico pensare che zone meno vocate alle produzioni tipiche alimentari possano essere convertite a produzioni non-food. Un'altra opzione potrebbe essere rappresentata dalla introduzione delle colture energetiche in avvicendamento a quelle alimentari.

Altro limite riguarda l'assunzione che tutte le colture abbiano risposte proporzionali a quella del mais, vale a dire l'applicazione di un unico indice a tutte le colture. Se infatti è ammissibile che il mais fornisca una indicazione attendibile della vocazionalità produttiva del territorio, non è certo che tutte le colture da energia abbiano decrementi o incrementi produttivi proporzionali ad esso. Ad esempio, la diminuzione di resa del mais da zone umide a siccitose potrebbe essere simile a quella di miscanto, ma più che proporzionale rispetto al sorgo o al cardo. Non si dispone del resto di confronti sperimentali fra mais e colture da biomassa che permettano di supportare tale ipotesi. A ciò si aggiunge che anche il dato ISTAT su mais assume una diversa rilevanza in zone di ampia diffusione della coltura, rispetto a zone dove la sua presenza è molto più circoscritta e probabilmente legata ad ambienti o situazioni di coltura particolari. In altre parole occorrerebbe correggere con coefficienti colturali specifici che tengano conto della diversa tolleranza delle colture a situazioni meno favorevoli. Coefficienti che potrebbero essere facilmente ottenuti in pochi anni con la creazione una rete nazionale di monitoraggio delle rese di tali colture.

In tal senso, i risultati di questa attività vanno interpretati come una indicazione alla vocazionalità delle Province italiane alla produzione di colture dedicate da energia. In assenza di dati specifici sulla produttività di tali colture in Italia, il riferimento alla vocazionalità dell'area viene dato in base alle produzioni di una coltura diffusa in tutto il Paese e con ciclo paragonabile a quello delle specie da biomassa.

### Risultati stima colture erbacce

I risultati vengono presentati su un foglio di lavoro Excel, sia in formato tabulare, sia grafico. riporta gli indici di vocazionalità calcolati come precedentemente descritto per tutte le province italiane, e la relativa deviazione standard. Nelle tabelle sono indicati i valori del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) delle relazioni fra le due oleaginose e i tre cereali, sempre statisticamente altamente significative ( $P = 0,01$ ), e le equazioni di regressione scelte per costruire i dati provinciali mancanti delle oleaginose a partire dai dati del cereale. Per entrambi colza e girasole è stato scelto l'orzo come cereale di riferimento. Il mais, infatti, ha sempre fornito una performance inferiore in termini di variabilità spiegata ( $R^2$ ), oltre tutto con correlazione inversa (pendenza della retta negativa) di non facile interpretazione. Viceversa, il grano tenero ha fornito una prestazione analoga a quella dell'orzo, ma la sua disomogenea distribuzione da nord a sud lo rende potenzialmente meno esplicativo dell'orzo. Interessante anche la relazione che lega le due oleaginose direttamente tra loro ( $R^2 = 0,40$ ). Assumendo l'orzo come coltura di riferimento, i dati produttivi delle due oleaginose ( $t\ ha^{-1}$ ) per le province mancanti sono stati costruiti con le equazioni di regressione emerse dallo studio relazionale:

$$\text{Girasole} = 1,1966 + 0,26 * [\text{orzo}] ;$$

$$\text{Colza} = 0,4162 * [\text{orzo}].$$

Si definiscono alla fine le rese potenziali delle colture da energia considerate per ciascuna Provincia singolarmente, rispettivamente nell'Italia del Nord, Centro e Sud. Per le cinque colture con produzioni stimate (Arundo, Miscanto, Panico, Cardo e Sorgo), le barre di errore indicano la deviazione standard su base temporale nei dieci anni di cui si dispone delle rese della coltura di riferimento. I dati delle due oleaginose (girasole e colza) risultano notevolmente più bassi in quanto dovuti al computo del solo seme in piante intrinsecamente caratterizzate da basso Harvest Index (il rapporto tra la porzione di interesse commerciale e la biomassa totale della pianta). A ciò si aggiunge che l'accumulo di sostanze grasse nel seme (attorno al 45% e al 40%, rispettivamente per girasole e colza) è intrinsecamente più costoso dell'accumulo di carboidrati (in una proporzione di circa 2,5:1), il che rende inevitabilmente più bassa la produzione delle oleaginose rispetto ai cereali. Comparando i risultati di tutte le Province, che per ragioni di dimensioni non è possibile riportare su uno stesso grafico, si nota che i valori di resa



potenziali più elevati si riscontrano nelle Province del raggruppamento Nord (Lodi, Bergamo, Brescia) e in generale i valori medio-alti si concentrano nelle Province settentrionali, con alcune eccezioni, tra le quali spiccano Crotone e Nuoro. Tali valori vengono interpretati come outlayer rispetto al quadro generale delle produzioni. Questo fatto è una misura del rischio in cui si incorre nel momento in cui ci si affida a dati statistici (in questo caso i dati annuali Istat sulle produzioni agricole) per sviluppare proiezioni future, nei casi in cui questi dati siano basati su superfici limitate.

In Italia il limite più rilevante al raggiungimento di elevate produzioni è infatti la disponibilità idrica. È del tutto evidente che tale vincolo sia più forte al Sud che al Nord. A confronto con la questa, la durata del ciclo colturale (somma termica stagionale), più limitata al Nord che al Sud, rappresenta un vincolo di gran lunga inferiore, come dimostrato dall'andamento delle rese produttive, decrescente da Nord a Sud. L'effetto delle piovosità legato alla latitudine appare così forte da riflettersi anche su colza, nonostante la collocazione autunno-primaverile del ciclo di questa coltura.

In Italia converrebbe analizzare le rese delle colture da energia per raggruppamento eco-pedologico. Ogni gruppo ha come resa la media delle rese delle province componenti, con la deviazione standard come indice di variabilità al suo interno. Sono stati espunti i dati relativi al gruppo S2, con la sola Provincia di Siracusa, poiché le limitate superfici a mais non possono rappresentarne la vocazionalità. Più attendibili, invece, i dati dei gruppi N ed NE, costituiti da più province del Nord a medio-ampia diffusione della coltura di riferimento (mais). I buoni risultati dei gruppi N ed NE confermano nuovamente come la minor durata potenziale del ciclo in queste zone rappresenti una limitazione minore rispetto alla siccità che colpisce più duramente le province del Sud Italia.

Monitorare su larga scala le produzioni di colture come le biomasse per energia, non ancora diffuse sul territorio, rappresenta un esercizio di non facile svolgimento, inevitabilmente soggetto ad una certa aleatorietà dei risultati. Per superare tale limite, è parso utile adottare una coltura di riferimento con buona diffusione territoriale come il mais, che compie il proprio ciclo nella stagione calda così come tutte le colture comprese in questo studio.

Il raffronto con le produzioni della coltura standard in un areale in cui si dispone di dati parcellari ben assestati per le biomasse (Provincia di Bologna), ha permesso di stilare una graduatoria di produttività per queste ultime, da estendere al resto di Italia. Con poche eccezioni, tale graduatoria vede primeggiare le zone più fertili del Nord e del Centro, in cui il deficit idrico non rappresenta una limitazione così forte come nel Sud e nelle Isole. Per le oleaginose, la presenza in larghe fasce del territorio e la correlazione con i dati dell'orzo per la copertura delle zone sprovviste di dati, hanno reso il compito più semplice.

L'approccio seguito lascia un quesito aperto relativamente all'effettiva produttività delle colture da biomassa ove, nell'ambito delle unità studiate (province, gruppi), non siano coltivate nei terreni normalmente destinati a mais, ma in terreni di inferiore qualità agronomica. In tal senso, i dati riportati esprimono la potenzialità delle cinque colture da biomassa a parità di situazione colturale col mais e permettono di ipotizzare prezzi e punti di pareggio economico che queste dovrebbero realizzare per poter reggere la concorrenza col cereale. È del resto scontato che in condizioni colturali meno favorevoli la loro superiorità dovrebbe essere certa, in virtù della generale rusticità che le caratterizza e della minor incidenza di stadi colturali critici all'interno del ciclo, paragonabili alle fasi riproduttive nel mais.

#### **A6. Stima del potenziale del biogas producibile dalle biomasse fermentabili**

Le attività svolte per il conseguimento degli obiettivi preposti sono stati:

- Identificazione, selezione, raccolta, elaborazione ed organizzazione dei dati di base utili alla successiva scelta della metodologia di calcolo del potenziale di biogas producibile da biomasse fermentescibili;
- Preanalisi dei dati ai fini della identificazione della rilevanza quantitativa delle diverse biomasse e identificazione delle priorità di indagine;
- Analisi di ciascun settore identificato al fine di valutarne gli elementi dimensionali e spaziali in relazione alle taglie tecnologiche oggi disponibili;
- Identificazione e valutazione di soglie dimensionali di convenienza tecnico economica o di natura legislativa da collegare al numero di capi aziendali minimi;
- Analisi della letteratura disponibile al fine di scegliere i parametri per il calcolo della producibilità di scarti fermentescibili e del relativo biogas;
- Rielaborazione e organizzazione dell'indagine prodotta dal CRPA sugli impianti a biogas attivi nel 2006 in Italia per poter valutare il livello di sfruttamento in quell'anno delle biomasse fermentescibili;

- Sviluppo di metodologia di stima specifica per ciascuno dei settori identificati delle potenzialità della biomassa e relativi fogli di calcolo; costruzione di database in formato Excel, Produzione di tabelle di sintesi di risultati e loro trasformazioni in formato geografico tramite software Arcview;
- Analisi dei risultati e loro rappresentazione grafica e sintesi tabellare;
- E' inoltre iniziata la fase di controllo e verifica dei dati per arrivare ad una fase di validazione che si realizza attraverso azioni che continuano oltre la durata del progetto, controlli di qualità, verifica incrociata di dati.

Relativamente alle produzioni animali e relative biomasse fermentescibili da avviare a DA sono di seguito descritte le attività in dettaglio relativamente a tre settori, bovini, suini e scarti di macellazione.

Le azioni ed i passaggi compiuti per il settore bovino sono stati i seguenti:

- Identificazione e selezione delle migliori fonti dei dati di base;
- Definizione ed esplicitazione della metodologia di calcolo;
- Individuazione, sulla base delle caratteristiche generali del settore, di soglie dimensionali aziendali per il calcolo di diversi livelli di potenziale;
- Scelta dei parametri più appropriati per quantificare il potenziale;
- Affinamento, validazione e consolidamento dei risultati.

Preliminarmente al lavoro di stima è stata realizzata una analisi regionale del settore al fine di inquadrare la distribuzione e le principali caratteristiche strutturali delle aziende bovine e bufaline, elementi di particolare rilevanza per i nostri scopi in quanto, l'effettiva possibilità di realizzare impianti a biogas aziendali o consortili, è connessa alle caratteristiche dimensionali e alla concentrazione delle aziende sul territorio.

Le diverse fonti di dati sono state analizzate e confrontate preliminarmente con l'obiettivo di individuare quella o quelle che consentono di rispondere nel modo più completo ed accurato possibile agli obiettivi specifici dello studio: l'anno di riferimento, il 2006 ed il livello di dettaglio territoriale almeno provinciale. Successivamente dall'analisi delle fonti e della disponibilità di dati e parametri è stata identificata la migliore metodologia di stima e schematizzato il procedimento e gli assunti per il calcolo.

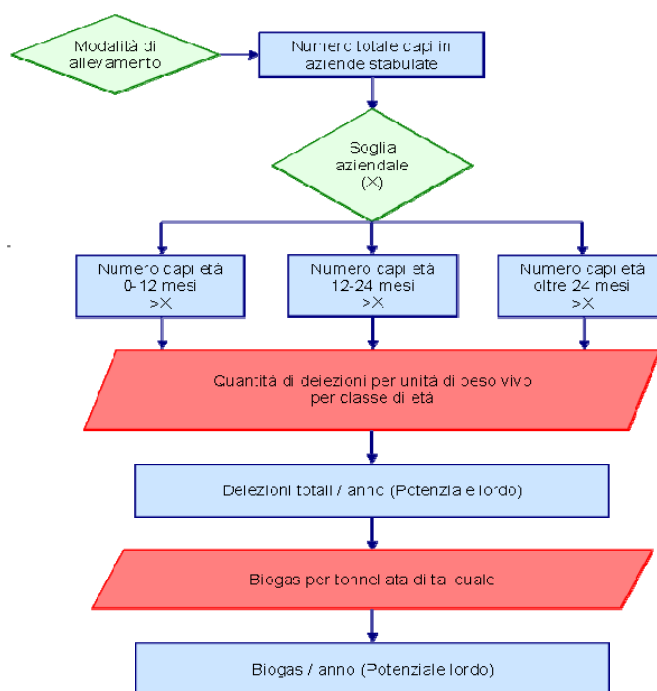


Figura 83. Schema di flusso per la stima del potenziale (lordo) da reflui bovini valorizzabile energeticamente

Per il calcolo delle deiezioni si è fatto riferimento ai parametri utilizzati in uno studio prodotto dall'ISTAT nel 2006 dal titolo "Waste statistics on agriculture, forestry and fishing sectors". Nello studio sono indicate le quantità di deiezioni liquide e solide generate per unità di peso vivo per specie e categoria animale.

Parallelamente alla costruzione della metodologia per il calcolo con i migliori parametri oggi disponibili, si è proceduto ad avviare un percorso di analisi e valutazione della possibile "regionalizzazione" degli stessi tramite il coinvolgimento del CRPA di Reggio Emilia che ha realizzato in alcune regioni italiane indagini specifiche tese a identificare le caratteristiche strutturali ed organizzative delle aziende zootecniche.

La fase successiva è consistita nella ricerca e selezione di soglie dimensionali minime aziendali al fine di eliminare quelle aziende che per dimensioni, organizzazione e conduzione non possono essere considerate idonee alla introduzione di sistemi di DA. Si è proceduto quindi al calcolo del potenziale per molte soglie differenti da un minimo di 50 capi ad un massimo di 1000, organizzando il database di conseguenza.

Una rappresentazione semplificata del database è proposta nella figura seguente.

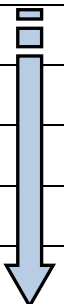
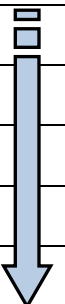
| Cod Prov                                                                           | Prov                                                                               | Soglia numero capi azienda > 0 |                           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                                                                                |                                  |                                                    | Soglia numero capi azienda > 20 |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
|                                                                                    |                                                                                    | Numero aziende                 | Numero capi bovini totali | Numero capi bufalini totali                                                       | Numero capi totali                                                                | Deiezioni liquide totali [m <sup>3</sup> /a]                                                                                                   | Deiezioni solide totali [t/anno] | Biogas totale [10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> /a] | Numero aziende > 20 capi        | Capi bovini totali |
| 001                                                                                | Torino                                                                             | 5.373                          | 240.826                   | 517                                                                               | 241.343                                                                           | 3.041.209                                                                                                                                      | 384.064                          | 55,49                                              | 2.517                           | ...                |
|  |  |                                |                           |  |  | <br><b>Soglie aziendali:<br/>20, 50, 100, 250, 500, 1000</b> |                                  |                                                    |                                 |                    |
|                                                                                    |                                                                                    |                                |                           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                                                                                |                                  |                                                    |                                 |                    |
|                                                                                    |                                                                                    |                                |                           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                                                                                |                                  |                                                    |                                 |                    |
|                                                                                    |                                                                                    |                                |                           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                                                                                |                                  |                                                    |                                 |                    |
|                                                                                    |                                                                                    |                                |                           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                                                                                |                                  |                                                    |                                 |                    |
| 092                                                                                | Cagliari                                                                           | 1.015                          | 28.950                    | 793                                                                               | 29.743                                                                            | 423.360                                                                                                                                        | 53.751                           | 14,78                                              | 363                             | ...                |

Figura 84. Rappresentazione semplificata del database per il settore bovino

Al variare della soglia impiegata i valori del potenziale variano ampiamente.

Tabella 37. Numero aziende, capi, quantità di reflui e producibilità di biogas al variare della soglia aziendale (valori nazionali)

|                                                | Potenziale fisico | Potenziale fisico con soglie |                    |                    |                    |                     |
|------------------------------------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|                                                | Tutte le aziende  | Aziende > 50 capi            | Aziende > 100 capi | Aziende > 250 capi | Aziende > 500 capi | Aziende > 1000 capi |
| Numero aziende                                 | 162.733           | 29.918                       | 14.947             | 4374               | 1.149              | 238                 |
| Numero capi                                    | 6.359.587         | 4.777.709                    | 3.717.408          | 2.084.870          | 986.904            | 371.313             |
| Letame (10 <sup>3</sup> t/anno)                | 10.205            | 7.486                        | 5.639              | 2.909              | 1.212              | 398                 |
| Liquame (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /anno) | 80.638            | 59.195                       | 44.640             | 23.088             | 9.667              | 3.195               |
| Biogas (10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> /anno) | 1.472             | 1.080                        | 815                | 421                | 176                | 58                  |

Sono in corso miglioramenti e controlli di qualità del dato per arrivare ad una versione validata del database.

Per il settore suino la situazione e le attività sono state del tutto congruenti con quelle del settore suino se si escludono dettagli dovuti alle specificità del settore per cui i parametri e le soglie utilizzati nel calcolo sono differenti.

Per il settore della macellazione sono state svolte indagini ad hoc in quanto il settore dal punto di vista delle finalità energetiche degli scarti è praticamente inesplorato.

Il settore della macellazione delle carni genera una quantità e una gamma rilevante di residui e sottoprodotti che possono essere variamente valorizzati mediante processi di recupero e/o di ulteriore trasformazione, anziché essere semplicemente smaltiti come rifiuti.

**Tabella 38. Capi macellati e scarti della macellazione in Italia (Fonte: ISTAT, 2006)**

| Categorie         | Numero capi macellati | Peso vivo (t) | Peso medio a capo (kg) | Resa media (%) | Peso morto (t) | Scarto totale (t) |
|-------------------|-----------------------|---------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Bovini e Bufalini | 3.176.635             | 1.515.599     | 486                    | 54,6           | 889.917        | 739.968           |
| Ovini e Caprini   | 6.898.885             | 110.846       | 16                     | 55,4           | 61.437         | 49.409            |
| Suini             | 13.380.004            | 1.947.872     | 146                    | 80,0           | 1.559.243      | 388.629           |
| Equini            | 167.139               | 74.960        | 450                    | 54,9           | 41.181         | 33.779            |
| Avicoli           | 407.282.947           | 1.311.094     | 3,22                   | 69,8           | 914.989        | 396.104           |

La produzione di residui e sottoprodotti, in linea indicativa, rappresenta circa il 20-50% del peso vivo dell'animale di partenza.

Dalla tabella si evince come la massa di residui disponibili a livello nazionale sia dell'ordine di 1,7 milioni di tonnellate ai macelli.

Obiettivo dell'approfondimento settoriale è stato quello di arrivare ad una stima delle quantità, su base provinciale, di scarti di macellazione che possano essere avviati a digestione anaerobica esplicitando gli assunti di base e la metodologia scelta per la stima.

I principali aspetti considerati nella stima del potenziale energetico associato al settore sono:

- Analisi e identificazione delle fonti idonee dei dati preliminari;
- Elaborazione della metodologia di calcolo;
- Scelta di parametri appropriati per quantificare il potenziale;
- Elaborazione e calcolo di livelli di potenziale significativi;
- Affinamento e consolidamento dei risultati.

Preliminarmente è stata svolta una analisi di dettaglio sul settore della macellazione a livello regionale e provinciale.

Per giungere ad una corretta e accettabile stima degli scarti di macellazione è stato importante capire quali di questi Sottoprodotti siano effettivamente utilizzabili nella digestione anaerobica, perché non tutti i sottoprodotti animali possono essere digeriti per la loro natura.

Analizzando il processo e le differenti tipologia di SOA prodotte per ciascuna fase sono state individuate le matrici organiche di scarto e sottoprodotti con caratteristiche qualitative adatte all'impiego in processi di DA.

Dopo un'attenta analisi delle banche dati esistenti e utili riferite all'intero anno 2006 si è fatto riferimento all'ISTAT e all'IZS (Istituto di Zooprofilassi Sperimentale) per quanto riguarda gli scarti della macellazione bovina e bufalina e soltanto all'ISTAT per tutte le altre tipologie di macellazione.

Non sono state prese in considerazione altre fonti, come quelle delle associazioni di categoria, in quanto, pur rappresentative del settore, non rispondono alle esigenze di completezza ed ufficialità dei dati richieste dall'indagine.

L'anagrafe zootecnica fornisce una delle banche dati più importanti del settore perché consente la conoscenza più fedele alla realtà dell'entità e delle peculiarità del patrimonio zootecnico.

Le tipologie di dati reperibili nella banca dati IZS sono:

- numero di capi mensili macellati per provincia;
- classi d'età e sesso dei capi macellati;
- peso Vivo e peso morto dei capi (dati parziali, incompleti).

Le tipologie di dati reperibili presso ISTAT sono:

- numero di capi macellati annualmente per regione;
- classi d'età e sesso dei capi macellati;
- peso Vivo e peso morto dei capi;
- rese al macello per classi d'età.

Nel realizzare la stima del potenziale si è utilizzata la seguente metodologia:

- individuazione delle tipologie di scarto e sottoprodotto
- stima della quantità della materia prima lavorata a livello provinciale e/o regionale
- rilievo e stima dei coefficienti di scarto e delle quantità unitarie per tipologia di materia prima trattata,
- calcolo della producibilità di biogas.

A causa dell'eterogeneità dei dati a disposizione sono state individuati due tipologie di approccio metodologico nel trattare da un lato la macellazione bovina e bufalina, dall'altro la macellazione delle restanti specie.

Un modello di stima simile è stato utilizzato per il settore suinicolo e ovino e caprino.

Per il calcolo del quantitativo lordo di sottoprodotti di origine animale si è fatto riferimento a parametri forniti dal CRPA considerando però tra questi soltanto gli scarti avviabili alla digestione anaerobica.

Nello studio del quantitativo di biomassa utile da scarti di macellazione sono state trascurate le aliquote derivanti dalle frattaglie edibili bovine (cuore, milza, polmoni) che non vengono commercializzate con continuità o in maniera uniforme in tutto il territorio nazionale (variazioni stagionali, consuetudini locali di consumo) e sono quindi di difficile stima, in questo senso la stima degli scarti di macellazione avviabili a DA è cautelativa in quanto non ne tiene conto.

I dati di base e le funzioni di calcolo sono state implementate in un foglio di un file Excel con architettura simile ai database bovini e suini.

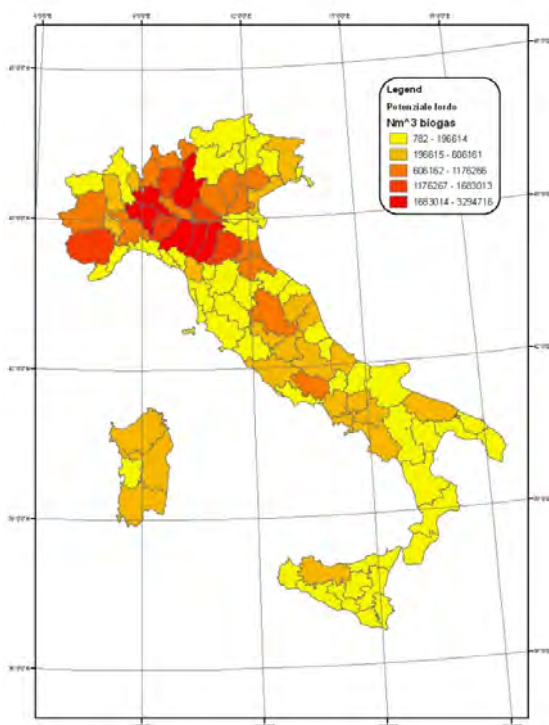


**Figura 85. Potenziale lordo biogas sul totale degli scarti di macellazione, dettaglio provinciale**

A livello nazionale, è stato stimato un potenziale annuo complessivo di circa mezzo milione di tonnellate di scarto per una produzione di circa 51 milioni di m<sup>3</sup> di biogas dal settore della macellazione. Tale potenziale è da considerarsi *lordo*, poiché non tiene conto degli altri utilizzi dei Sottoprodotti di Origine Animale (ad es: fertilizzanti, farine animali, saponi) che li sottraggono alla destinazione energetica ed assume una connotazione *teorica* in quanto ipotizza il recupero in ogni macello degli scarti suddivisi in cat. 2 e 3 mentre nella realtà i piccoli macelli preferiscono accorpare i vari tipi di scarto alla categoria 1 e mandare tutto ad incenerimento.

Dalla Figura 85 emerge chiaramente il quadro della potenzialità di produzione di biogas da scarti di macellazione in Italia a livello provinciale con una concentrazione marcata nelle province di tre regioni: Lombardia, Emilia Romagna e Piemonte.

Per comprendere meglio il significato dei risultati ottenuti sono stati inoltre realizzati degli indici provinciali in relazione al numero di macelli

Da ultimo interpretando la necessità che la stima venga aggiornata e migliorata nel tempo

Si è provveduto ad identificare ed analizzare i limiti della stima stessa ed i margini operativi per il suo miglioramento.

## B1. Indagini di mercato sulle biomasse

L'analisi del mercato per le biomasse residuali di origine agroalimentare nella prospettiva della valutazione del loro impiego nella produzione di energia, va affrontata tenendo presente che attualmente l'utilizzazione di tali biomasse è molto diversificata e che cambia a seconda dei luoghi in relazione ai diversi fattori. Il primo punto da considerare è che le biomasse residuali possono essere:

- utilizzate nella produzione di energia;
- impiegate per utilizzazioni diverse da quelle energetiche;
- un rifiuto.

Ciascuna destinazione tende a non essere esclusiva ma dipende strettamente dalle condizioni relative di domanda e offerta, ovvero, dal livello della domanda esistente per l'impiego di quella particolare biomassa residuale in un certo uso e dalla disponibilità di tale sottoprodotto. Quando non costituiscono un rifiuto, le biomasse residuali possono essere oggetto di scambi di mercato per i quali si formano prezzi ai diversi stadi della filiera. I livelli di questi prezzi sono determinati dalle condizioni del mercato delle produzioni per le quali sono impiegati: prezzi dell'energia quando vengono usati a questo scopo; prezzi delle prodotti finali quando usati in produzioni alternative.

In ogni caso, è necessario tenere presente che le biomasse residuali impiegate ai fini della produzione di energia, indipendentemente dalla loro natura, hanno un costo franco impianto di produzione che dipende dal loro valore, se c'è, e dall'insieme di costi sostenuti per le operazioni di raccolta, movimentazione e trasporto.

In linea generale le diverse categorie di biomasse prese in considerazione dall'analisi di mercato del progetto sono distribuite tra le tre utilizzazioni individuate sopra nella maniera seguente.

1. *Produzione di energia* - Potature; Oli vegetali; Gusci di frutta secca; Sanse; Lolla di riso
2. *Usi diversi dalla produzione di energia* - Paglia; Oli vegetali; Lolla di riso; Potature (limitato); Vinacce
3. *Rifiuto*.

In merito al trattamento quale rifiuto, c'è da considerare che nel caso di paglie e potature, essendo sottoprodotti dell'attività agricola, sono distribuite nello spazio di coltivazione e vengono smaltite attraverso l'interramento con le lavorazioni del terreno, previa trinciatura con apposite macchine. Invece, i noccioli di frutta sono da considerare come una sorta di rifiuto industriale. In tutti questi casi, la loro rimozione dà origine a un costo di smaltimento. Tuttavia, per le paglie, quando viene concessa l'autorizzazione alla loro bruciatura, il costo di smaltimento si riduce considerevolmente.

L'impiego delle potature per la produzione di energia, a parità di altre condizioni, è maggiore quando il loro contenuto in umidità è minore. La domanda per questo tipo di utilizzazione è ovviamente condizionata dall'andamento dei prezzi dell'energia, crescendo quando questi aumentano. Tuttavia, con prezzi dell'energia crescenti tendono ad aumentare anche i costi per la raccolta e movimentazione delle potature, così come delle altre biomasse residuali.

In generale, si osserva un impiego delle potature più diffuso per specie quali l'olivo, soprattutto quando le forme di allevamento delle piantagioni sono a cono con una densità degli impianti minore e i turni di potatura tendono ad allungarsi. Per questa tipologia di potature si osserva anche un sia pure limitato impiego quale legno nella falegnameria.

L'utilizzazione pressoché unica della paglia di cereali è nella zootecnia bovina, e in misura inferiore ovina, dove viene impiegata sia nell'alimentazione che nelle lettiere. Tuttavia, quest'ultimo impiego è in continua diminuzione nel tentativo di ridurre i costi di allevamento. Anche l'impiego nell'alimentazione è molto variabile e collegato all'andamento dei prezzi. Il mercato della paglia di frumento è attivo e regolare con transazioni oggetto di rilevazione da parte di varie istituzioni quali le Camere di Commercio e l'Ismea. Tra i cereali un caso a parte è rappresentato dagli stocchi di mais residuo della coltivazione del cereale quando è destinato alla produzione di granella. Gli stocchi di mais da granella non sono utilizzabili in zootecnia e creano non pochi problemi di gestione, tipici di un rifiuto.

Di seguito vengono riportate le analisi di mercato riferite a due casi studio sviluppati nell'ambito della ricerca relativi alla regioni Campania e Sicilia.

### *Modalità e costi di approvvigionamento*

I residui agricoli sono caratterizzati da una produzione stagionale e da un'elevata dispersione sul territorio. L'utilizzo energetico di questi materiali deve prevedere la raccolta, il concentramento e la conservazione fino alla

valorizzazione energetica finale, operazioni non sempre agevoli a causa della ridotta massa volumica e della elevata umidità, che rendono necessari interventi di condizionamento.

Il contenuto di umidità dei sottoprodotti dipende sostanzialmente dalle caratteristiche della coltura, dal periodo di raccolta e dalle tecniche adottate per il condizionamento.

Nel caso dei residui erbacei, l'umidità varia in funzione del tipo di coltura e del periodo di raccolta. Nello specifico, le colture autunno-vernine, raccolte in giugno-luglio, consentono di usufruire di una essiccazione naturale in campo, con contenuti di umidità particolarmente bassi alla raccolta. Ciò non accade, invece, per le colture primaverili-estive, raccolte a fine estate o inizio autunno.

Nel caso di residui arborei, raccolti in genere tra febbraio ed aprile, il contenuto di umidità raggiunge valori dell'ordine del 20-30%, dopo una parziale essiccazione naturale del materiale di alcune settimane in campo. In generale, si osserva che a gradi di umidità elevati si può determinare un aumento della temperatura con inevitabili perdite in sostanza secca e deterioramento del materiale.

Di seguito, si è tentato di delineare criteri e la stima di calcolo dei costi di approvvigionamento e condizionamento dei residui erbacei ed arborei.

### *Residui erbacei*

La paglia dei cereali rappresenta il principale sottoprodotto colturale; viene raccolta dopo la mietitrebbiatura in giugno e luglio. Il periodo utile per la raccolta è in genere di 15 - 45 giorni, in funzione del periodo di trebbiatura, dell'andamento climatico ed ordinamento colturale. Tale periodo si riduce a pochi giorni quando il cereale precede una coltura di secondo raccolto. Quando è previsto il loro utilizzo, le paglie vengono lasciate in andane dalla mietitrebbiatrice, e poi confezionate in balle cilindriche (densità apparente di 100 - 120 kg/m<sup>3</sup>) o in balle prismatiche ad elevata densità (120 - 150 kg/m<sup>3</sup>). In questo caso, la paglia viene generalmente venduta dal proprietario del terreno ad un prezzo variabile tra 12 - 20 €/ha (in funzione della quantità di sottoprodotto disponibile e del mercato locale).

Nello scenario di imballaggio in balle da 570 kg/balla qui considerato, i costi complessivi di approvvigionamento sono illustrati in Tabella 39. I costi di lavorazione agromeccanica sono dedotti a partire dai prezzi ufficiali UNIMA per la Regione Campania scontati del 20% e riferiti all'annata 2007-2008. Per il calcolo dei costi di conferimento, sono state considerate le tariffe medie applicate dai trasportatori specializzati, pari a 30 €/h per la movimentazione del materiale e 40 €/h per il trasporto. Si sono considerati mezzi di trasporto con capacità di carico di circa 18 t, e lo scenario della cosiddetta "filiera media". Ne derivano costi di carico e trasporto di circa 8 €/t, per distanze di 40 - 60 km.

A fronte di tali costi, si evidenzia che una analisi preliminare del mercato della paglia in balle ha riportato prezzi di vendita franco impianto (in funzione della stagione e del luogo di circa 50 - 60 €/t, ovvero il 20-30% in più rispetto ai costi, oltre a non considerare i costi di trasporto, non considerano l'utile per il terzista che effettua l'approvvigionamento.

Il trattamento della biomassa potrebbe comprendere un ulteriore condizionamento per ottenere, come prodotto finale, un trinciato oppure un pellet più facilmente utilizzabili per il riscaldamento domestico o altro tipo di valorizzazione energetica.

**Tabella 39. Caratteristiche e costi di approvvigionamento della paglia**

| Parametro                                           | Valore |
|-----------------------------------------------------|--------|
| Umidità (riferita alla massa t.q.), %               | 12     |
| Prezzo di vendita (da agricoltore), €/ha            | 15     |
| Produttività paglia, t/ha                           | 1,5    |
| Prezzo di vendita specifico (da agricoltore), €/t   | 10     |
| Costo lavorazioni agromeccaniche <sup>1</sup> , €/t | 24     |
| Costo raccolta e trasporto, €/t                     | 8      |
| Costo balla franco centrale, €/t                    | 42     |

N.B. Costi riferiti alla biomassa tal quale.

1. Costo ranghinatura di 15 €/ha e di imballatura di 10 €/balla

2. Distanza di 40 - 60 km; valori ottenuti considerando costi di 30 €/h per movimentazione del materiale e 40 €/h per il trasporto

## Residui arborei

I residui arborei sono costituiti essenzialmente da residui di potatura di oliveti, vigneti e frutteti. Le operazioni di raccolta e recupero prevedono tutte una prima fase di accatastamento in andane, generalmente realizzato, in impianti specializzati, a filari alterni. L'andanatura viene eseguita contestualmente alla potatura o può essere effettuata in un secondo momento su materiale parzialmente essiccato. In generale, esistono due metodologie per la raccolta di residui di potatura: la compattazione o lo sminuzzamento in campo. Nel primo caso, si utilizzano macchine che provvedono alla raccolta, pressatura (in rotoballe o balle parallelepipediche, di piccola o grossa taglia) ed eventualmente carico del materiale, e si utilizzano tecnologie derivate dall'imballatura del foraggio. Nel secondo caso, si utilizzano cantieri di raccolta meccanizzati che provvedono alla raccolta, trinciatura e carico del materiale in rimorchi agricoli o in appositi cassoni; le macchine di sminuzzatura derivano da trincia-sarmenti ai quali sono state apportate modifiche, anche sostanziali, per provvedere alla movimentazione in campo del prodotto. Uno dei criteri di scelta della macchina operatrice è dato dall'ingombro in relazione all'impianto in cui effettuare la raccolta, e questo è un problema in particolare per l'utilizzo di macchine imballatrici in vigneti a tendone (in questo caso da preferire sistemi con rotoimballatrici di piccole dimensioni o piccole balle prismatiche). Un altro criterio è dettato dalla qualità e pezzatura del materiale; in particolare, nel caso di residui di potatura con diametro superiore ai 4 cm e lunghezza piuttosto elevata, si potrebbero avere dei problemi nella compattazione del materiale (può essere il caso di oliveti o frutteti, qualora non venga asportata tutta la legna). Un altro criterio è dettato dall'umidità del materiale, dato che la sminuzzatura non è praticabile con materiale allo stato fresco. La tecnica di imballatura, inoltre, facilita la movimentazione e lo stoccaggio mentre, la sminuzzatura, favorisce la fermentazione e non consente uno stoccaggio prolungato. La scelta tra le due tecnologie dipende dalla tipologia di terreno, dal sesto e regolarità di impianto, dalla dispersione della risorsa sul territorio e dalla stessa affidabilità dei macchinari. In genere, le operazioni di recupero, effettuate dai terzisti, si avvalgono di piccole imballatrici quadre, che sono derivate dalle tradizionali presse da foraggio e producono ballette da 30 - 40 kg. Questa tecnologia di raccolta, relativamente rapida e semplice, presenta costi specifici di produzione delle balle piuttosto contenuti, nell'ordine di 15 - 20 €/t, ma costi di raccolta e trasporto molto elevati, a causa della bassa densità del materiale e delle difficoltà nel formare il carico. Inoltre, la stessa modalità di funzionamento sembra avere un potenziale inferiore alla rotoimballatrice rispetto alle grosse ramaglie, giacché la pressa quadra deve tranciarle, mentre la rotoimballatrice può piegarle. Il sistema di lavorazione determina spesso problemi di avarie, determinate dalla rottura delle spine di sicurezza. Questi sistemi di raccolta sono interessanti pressoché esclusivamente in ambiti territoriali ristretti, per un utilizzo all'interno dell'azienda agricola, o laddove l'accidentalità del territorio e gli spazi a disposizione non consentano il movimento di altri macchinari di maggiore ingombro.

Tra le diverse alternative tecnologiche per la raccolta, le più diffuse e potenzialmente applicabili negli ambienti agricoli campani sono la rotoimballatura con carico, trasporto e successiva cippatura presso l'impianto di utilizzazione, e la raccolta e trinciatura in campo, con carico automatico e trasporto del prodotto cippato. Di seguito vengono riportate le stime delle principali voci di costo relativamente a dei sistemi di raccolta.

**Tabella 40. Principali parametri tecnico-economici nel caso di raccolta con rotoimballatrice**

| Parametro                                                  | Valore |
|------------------------------------------------------------|--------|
| Massa rotoballa (kg)                                       | 450    |
| Capacità reale di lavorazione (rotoballe/h)                | 5      |
| Umidità media rotoballa (%)                                | 35     |
| Costo di ranghinatura e rotoimballatura (€/t) <sup>1</sup> | 26     |
| Costo medio per carico e trasporto (entro 50 km distanza)  | 8      |
| Costo franco centrale rotoballa (€/t)                      | 34     |
| Costo cippatura (€/t)                                      | 5      |
| Totale costo cippato (€/t)                                 | 39     |
| Costo evitato di smaltimento (€/t) <sup>2</sup>            | 15     |

N.B. Costi riferiti alla biomassa tal quale.

1. Con opportuni interventi di ottimizzazione del processo, si possono ottenere costi fino a 20 €/t.
2. Valore ottenuto considerando un costo evitato di smaltimento di circa 60 €/ha e produttività di 4 t/ha. Tale costo evitato potrebbe determinare l'utile per il terzista che effettua la raccolta.



**Tabella 41. Principali parametri tecnico-economici nel caso di approvvigionamento dei residui di potatura con raccogli-macina-caricatrice. Elaborazione di dati Agriconsulting**

| Parametro                                                          | Valore |
|--------------------------------------------------------------------|--------|
| Umidità media cippato (%)                                          | 30     |
| Costo di andatura, raccolta, cippatura e scarico del cippato (€/t) | 25     |
| Costo trasporto a piazzale di lavorazione (5 – 10 km) (€/t)        | 8      |
| Costo trattamento e stoccaggio (€/t)                               | 8      |
| Costo trasporto a caldaia (entro 60 km) (€/t)                      | 10     |
| Totale costo cippato al 30 % umidità (€/t)                         | 51     |
| Costo evitato di smaltimento (€/t) <sup>1</sup>                    | 15     |

1. Valore ottenuto considerando un costo evitato di smaltimento di circa 60 €/ha e produttività di 4 t/ha

Per l'analisi dei costi di approvvigionamento, è stata utilizzata la metodologia di calcolo dell'AIIA. Tenendo conto del costo del ranghinatore, della rotoimballatrice, del tempo necessario per la lavorazione e dell'impiego di manodopera (3 persone), si ottengono i costi riportati in Tabella 42, riferiti allo scenario della Campania ed al caso specifico della frasca di ulivo. Per il calcolo dei costi di trasporto, si è fatto riferimento allo scenario della "filiera media", con un costo di carico e trasporto delle rotoballe, entro 50 - 60 km, di 8 €/t. Il prezzo di vendita di una rotoballa, parzialmente essiccata, con una massa orientativa di 450 kg/ballone, varia dai 27 ai 35 €/t per cui, con una produzione giornaliera di 40 balloni, si otterrebbe per l'eventuale terzista, un ricavo lordo dell'ordine dei 500 €/giorno. A tale costo si deve poi aggiungere quello di trasporto, che dipende dal mezzo utilizzato e, ovviamente, dalla distanza. Uno dei vantaggi delle rotoballe è che il trasporto può essere eseguito in un secondo momento in quanto la presenza in campo delle balle non determina problemi ad eventuali operazioni colturali.

Nella tabella seguente vengono riportate le stime delle principali voci di costo di trasporto e condizionamento dei residui agro-industriali in tre ipotesi di filiera.

**Tabella 42. Costi di trasporto e condizionamento di residui agro-forestali**

|                                             | Residui<br>Erbacei | Frasca olivo -<br>Potature<br>Frutteti | Sarmenti<br>Vite <sup>1</sup> |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| Costo in campo (€/t)                        | 34                 | 26                                     | 20                            |
| Costo franco impianto Filiera Corta (€/t)   | 39                 | 31                                     | 30                            |
| Costo franco impianto - Filiera Media (€/t) | 42                 | 34                                     | 35 - 45                       |
| Costo franco impianto - Filiera Lunga (€/t) | 49                 | 41                                     | 40 - 50                       |
| Costo trinciatura (€/t) <sup>4</sup>        | 5                  | 5                                      | 5                             |
| Costo pellettatura (€/t)                    | 50                 | 55                                     | 50                            |

N.B. Tutti i costi sono riferiti alla biomassa tal quale.

1. In questo caso i costi di carico e trasporto delle balle prismatiche da 50 kg/balla sono significativamente più alti rispetto al caso delle balle di grosse dimensioni, essenzialmente per gli alti costi di carico del materiale.

2. Ipotesi di cippatura in campo di cimeli, ramaglie e interi tronchi (valido solo per conifere).

3. Recupero solo di ramaglie e cimeli con concentramento già eseguito nelle operazioni di esbosco.

4. Non è stato considerato il costo di stoccaggio, ampiamente variabile in funzione del tipo di filiera e delle modalità di essiccazione. I valori minimi si registrano quando è possibile lasciare in campo il materiale per essiccazione naturale (rotoballe), quando la risorsa non è caratterizzata da elevata stagionalità e quando si realizza un unico stoccaggio presso l'utilizzatore finale.

## B2. Stima della produttività potenziale netta del legno forestale

### Limitazioni stagionali

La produttività potenziale sostenibile esprime il campo di variazione del potenziale di biomassa legnosa attribuibile ai singoli poligoni di bosco mappati nell'unità territoriale di riferimento; di fatto, limitazioni stagionali comportano una riduzione, più o meno rilevante, della biomassa prelevabile rispetto alla produttività potenziale sostenibile. I più recenti orientamenti in materia a livello Europeo (EEA, 2006) raccomandano, anche nelle condizioni stagionali

più favorevoli, di non prelevare dal bosco l'intero potenziale disponibile e di utilizzarne una frazione decrescente all'aumentare delle limitazioni stazionali. Questo approccio cautelativo è dettato dalla necessità di prevenire un impoverimento della fertilità del suolo connesso all'asportazione integrale della biomassa legnosa e degli scarti delle utilizzazioni forestali e, al contempo, di proteggere il suolo da processi di erosione. Ciò, a prescindere dalle condizioni di esboscabilità, che condizionano le possibilità e i limiti di convenienza economica dell'utilizzazione delle superfici forestali.

Questo criterio cautelativo è stato recepito nel modello di stima della produttività potenziale al netto delle limitazioni introducendo un fattore di riduzione della stima della produttività annua potenziale sostenibile dipendente dalla pendenza e quota delle superfici forestali, derivate da un Modello Digitale del Terreno con passo di 100 m.

**Tabella 43. Fattore riduzione della stima della produttività annua potenziale sostenibile connesso alle limitazioni stazionali (Fonte: EEA, 2006)**

| Fattore di riduzione | 0,75     | 0,50     | 0,15     | 0        |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Pendenza             | < 9%     | 9-18%    | 18-47%   | > 47%    |
| Quota                | < 1500 m | < 1500 m | < 1500 m | > 1500 m |

#### Limitazioni connesse all'accessibilità

Le limitazioni dovute all'accessibilità di fatto riducono l'offerta di biomasse destinabili alla produzione di energia a residui di utilizzazioni delle fustaie e legna da ardere prelevabili in boschi ubicati al di sotto di 1500 m di quota e con pendenze inferiori al 47%; entro tale soglia di pendenza la meccanizzazione delle utilizzazioni forestali è sempre tecnicamente possibile, per quanto la sua convenienza diminuisca sensibilmente per pendenze superiori al 35%, acclività che richiede il ricorso a strumenti di esbosco via cavo. Di fatto, studi recentemente condotti indicano che per boschi ubicati a distanze superiori a 2500 m dall'imposto, i costi di taglio e esbosco connessi alle utilizzazioni forestali diventano proibitivi e la funzione produttiva può considerarsi nulla, indipendentemente dalla pendenza delle superfici interessate (CIANCIO *et al.*, 2007). Pertanto la distanza dalla viabilità, intesa come variabile *proxy* della distanza dall'imposto, può essere considerata il fattore che più condiziona la convenienza economica dell'utilizzazione a fini produttivi delle superfici forestali.

Sulla base di tali assunzioni, oltre alle limitazioni connesse all'accessibilità, è stato applicato un secondo fattore di riduzione della stima della produttività annua potenziale sostenibile basato sulla distanza dalla viabilità, così come cartografata dalla base dati cartografica d'Italia in scala 1:100.000 dell'Istituto Geografico De Agostini, contenente complessivamente 168.499 km di viabilità su diversi livelli. Operativamente si è proceduto derivando una mappa raster con cella di 100 m della distanza euclidea dal tratto di strada più prossimo nell'intervallo [0, 2500 m], successivamente normalizzata nell'intervallo [1, 0] secondo una funzione lineare.

Da notare che l'accessibilità in tal modo calcolata risulta un modello adatto per applicazioni di modesto dettaglio geografico su ampie aree d'indagine. La viabilità considerata nel modello è relativa solo a una parte della rete viabile principale utile a fini forestali (HIPPOLITI e PIEGAI, 2000). Il modello sviluppato si basa sull'ipotesi che la densità della rete viabile considerata sia proporzionale alla densità complessiva della rete viabile utile.

#### Stima della produttività potenziale al netto delle limitazioni

Il layer vettoriale avente la geometria della cartografia CLC2000 contenente i valori di produttività potenziale annua sostenibile (minima, media e massima) è stata rasterizzata con risoluzione di 100 m.

A livello raster la produttività potenziale lorda è stata moltiplicata per le mappe raster delle limitazioni ottenute secondo le modalità di cui ai paragrafi precedenti. Il risultato di questo processo sono mappe raster contenenti la stima della produttività potenziale netta (minima, media e massima), espressa in t/ha/anno di sostanza secca.

#### Validazione delle stime sulla produttività

Non esistono dati indipendenti con copertura nazionale utili a corroborare la stima della produttività potenziale al netto delle limitazioni prodotta dal modello applicato. Per ottenere tuttavia un'indicazione di massima circa l'affidabilità dei risultati conseguiti si è operato un confronto con stime sull'offerta di biomasse forestali destinabili alla produzione di energia derivanti da un'esperienza di modellizzazione su base GIS condotta in Toscana (BERNETTI e FAGARAZZI, 2003, Tabella 44). Tale studio si basa sull'impiego di dati dell'Inventario forestale della Regione

Toscana per la stima della superficie e della produttività dei soprassuoli forestali e considera biomassa destinabile a scopi energetici la quantità di residui forestali ritraibili dagli scarti delle utilizzazioni forestali delle fustaie e dei boschi cedui. Dunque, a differenza del modello qui applicato, non viene compresa nella produttività potenziale la biomassa combustibile derivabile dai boschi cedui. Anche nel modello di stima applicato in Toscana sono imposte una serie di limitazioni alla produttività sostenibile connesse ai vincoli (pendenza del terreno e distanza del soprassuolo dalle più vicine strade forestali) che condizionano la convenienza economica delle utilizzazioni delle superfici forestali. Pertanto la grandezza “Produzione di residui economicamente sostenibile” riportata in Tabella 44 rappresenta una stima realistica dei residui forestali ritraibili dai boschi in condizioni di redditività positiva delle utilizzazioni forestali.

Poste tali differenze tra i due modelli, il confronto tra i risultati indica ordini di grandezza simili delle stime; come era prevedibile, il modello qui applicato fornisce valori di produttività mediamente superiori a quelli ottenuti nel modello regionale, attribuibili alla frazione di biomassa ritraibile da un'utilizzazione sostenibile e cautelativa dei boschi cedui.

**Tabella 44. Confronto tra stime sulla disponibilità di biomasse forestali per scopi energetici nelle Province della Toscana derivanti dal modello applicato e da un modello regionale**

| Provincia | Produttività annua sostenibile accessibile (1)<br>Media (t/anno s.s.) | Produttività economicamente sostenibile, modello regionale (2)<br>(t/anno s.s.) | Confronto stime<br>[(2/1)%] |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Arezzo    | 52924                                                                 | 45032                                                                           | 85                          |
| Firenze   | 57541                                                                 | 52309                                                                           | 91                          |
| Grosseto  | 64171                                                                 | 28176                                                                           | 44                          |
| Livorno   | 15215                                                                 | 8449                                                                            | 56                          |
| Lucca     | 27071                                                                 | 36764                                                                           | 136                         |
| Massa     | 24057                                                                 | 25689                                                                           | 107                         |
| Pisa      | 29989                                                                 | 21856                                                                           | 73                          |
| Pistoia   | 22910                                                                 | 21053                                                                           | 92                          |
| Prato     | 6331                                                                  | 4118                                                                            | 65                          |
| Siena     | 64857                                                                 | 48020                                                                           | 74                          |

Nelle Province di Lucca e, in misura minore, di Massa, il modello qui applicato fornisce addirittura una stima più conservativa della produttività rispetto al modello regionale.

La validazione indica pertanto che il modello di stima qui applicato fornisce a scala provinciale dati sulla disponibilità di biomasse forestali destinabili a scopi energetici congruenti con stime prodotte da modelli regionali, basati sull'impiego di dati inventariali e di modelli geograficamente dettagliati di stima delle limitazioni di maggior dettaglio.

### B3. Mercato Colture energetiche

Per quanto riguarda l'aspetto economico, non esiste ancora un mercato di riferimento per le biomasse erbacee. Il loro sviluppo presuppone la capacità di competere con le alternative colturali, rappresentate principalmente dai cereali. Il prezzo dei cereali ha mostrato una sostanziale volatilità negli ultimi due anni, raddoppiando e quindi ritornando ai valori di origine. In tali condizioni, soprattutto per le poliennali che vincolano il terreno per almeno un decennio, occorrerà pensare a sistemi di indicizzazione dei prezzi e a sedi di discussione interprofessionali tra produttori e trasformatori, onde evitare prevalenze ora dell'uno, ora dell'altro attore della filiera.

Le oleaginose a destinazione no-food ed in particolare il colza sono già attualmente oggetto di contratti di coltivazione. I prezzi più ricorrenti per merce standard (semi con umidità 9%, impurità 2%) franco azienda sono dell'ordine dei 350 e dei 400 €/t, rispettivamente per girasole e colza. Le quotazioni del prodotto a destinazione non-food sono inevitabilmente legate ai corsi mondiali dei semi oleosi per usi alimentari, a loro volta legati ai prezzi delle materie prime (olio di colza e di girasole) e dei sottoprodotti (panelli proteici). In quanto tali, il loro andamento appare di difficile previsione. Nel medio periodo, sono comunque destinati a convergere verso un rapporto di equilibrio con i prezzi dei cereali, in funzione della produttività relativa; infatti, prezzi squilibrati a favore dell'uno o dell'altro gruppo automaticamente determinano compensazioni delle superfici e quindi dell'offerta in queste colture a ciclo annuale.

### C1. Geodatabase, sistema informativo, WEBGIS

1. Sono stati **eseguiti dei test GIS** con i geodatabase (biomassa forestale e biomassa agricola) realizzati al punto A, le prove hanno testato funzionalità tipo:

- costruire query di elementi spaziali attraverso condizioni logiche;
- costruire query usando le relazioni spaziali;
- editare dati spaziali;
- importare elementi in un Geodatabase;
- creare nuove feature classes;
- produrre mappe, reports e grafici.

Il vettoriale di riferimento utilizzato è stato il poligonale delle province italiane WGS 84, formato shapefile. Sono state quindi elaborate le mappe tematiche nei formati immagine più diffusi (jpeg, tiff .....): di seguito si riportano, a titolo di esempio, alcune delle mappe elaborate.

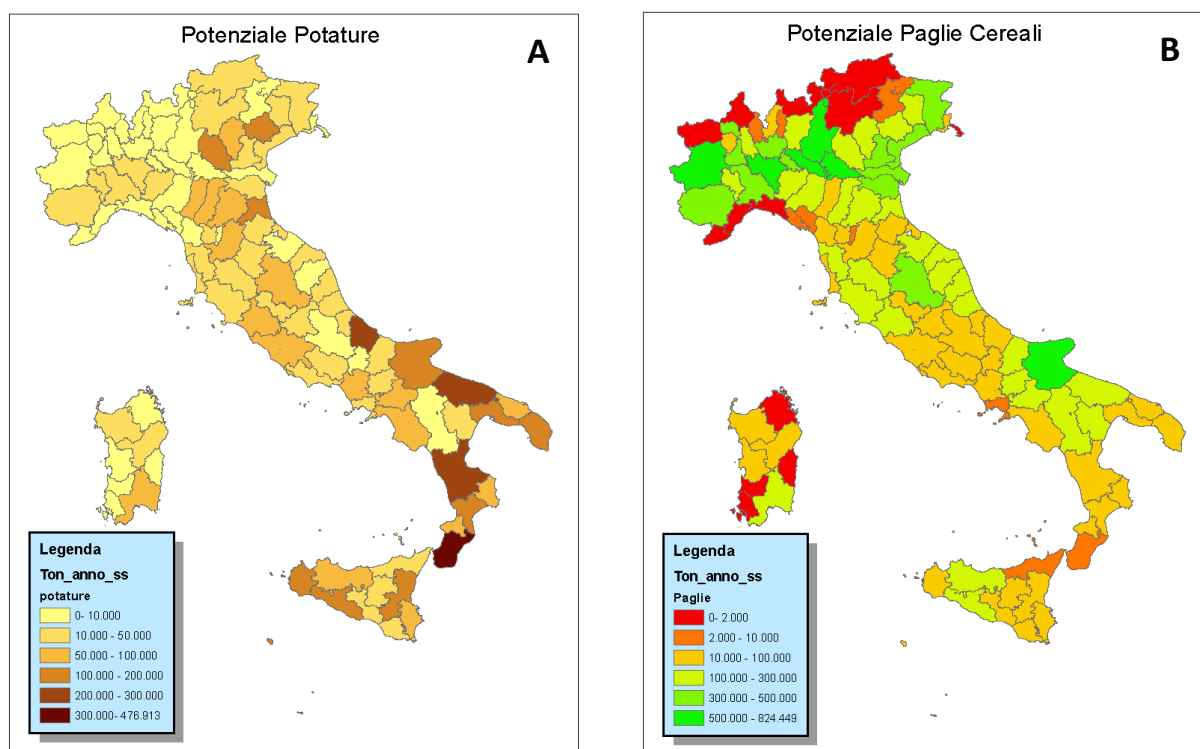


Figura 86. Mappe tematiche potenziali annue: (A) potature, (B) paglie cereali

2. Sono stati scelti e acquistati geodatabase shapefile e il DEM (grid 20 metri). La banca dati cartografica acquisita è strutturata a componente spaziale (raster e vettoriale), descrittiva delle caratteristiche planoaltimetriche del territorio, e contenere una componente alfanumerica ad essa associata. La cartografia elettronica digitale dell'Italia contiene circa 250.000 punti quotati di cui, oltre 120.000 elementi, puntuali ed areali.

Entrambe le componenti sono gestite all'interno di un unico geodatabase relazionale in ambiente ORACLE SDE mediante l'utilizzo di ArcGis. Tale modalità di gestione consente la realizzazione di un continuo cartografico dell'intero territorio nazionale in un unico sistema di riferimento (coordinate geografiche UTM-WGS84). Il sistema consente:

- realizzazione del continuo territoriale;
- gestione della multidimensionalità temporale e spaziale (versioning);
- flessibilità della banca dati (proiezione on-the-fly, simbolizzazione, integrabilità);
- predisposizione della banca dati per attività di publishing;
- gestione topologica dei dati;
- definizione di un set di regole di interrelazione tra i diversi layers;
- definizione di range e domini per l'applicazione di valori corretti per ogni attributo.

Il geodato "ITALIA 100" geonext contiene :

- orografia (curve di livello, punti quotati; caratteristiche fisiche quotate); idrografia (idrografia lineare, idrografia areale, linea di costa); planimetria elementi naturali; aree boschive; caratteristiche fisiche puntuali; caratteristiche fisiche estese; limiti amministrativi ed elementi antropici; località abitate puntuali; limite delle aree urbane; complemento abitato puntuale; complemento abitato areale, complemento abitato lineare; limite di regione; limite di provincia; limite di comune; parchi ed aree protette);
- trasporti (strade e Ferrovie lineari; complemento strada puntuale; complemento ferrovia; puntuale; complemento ferrovia areale).

### 3. I test effettuati sui geodati:

- applicare il modello dei dati basato sui GRID;
- entrare nell'estensione Spatial Analyst;
- convertire i dati in formato GRID;
- manipolare GRID;
- Implementare funzioni algebriche di mappa;
- utilizzare Spatial Analyst per analisi di prossimità;
- creare superfici omogenee;
- applicare i concetti di base per la modellazione del territorio;
- implementare modelli.

### 4. Analisi tecnologie WEB GIS, scelta piattaforma tecnologica e test funzionalità

Lo sviluppo delle tecnologie legate a Internet e l'avvento delle applicazioni Client-Server, hanno permesso la diffusione delle applicazioni per la gestione della cartografia sul web offrendo i seguenti vantaggi:

- gestione centralizzata
- distribuzione e diffusione immediata
- possibilità di interazione in tempo reale
- gestione di diverse tipologie di accesso (profili utente, password, ..)
- consultazione con PC standard
- non necessitano di software specialistico
- la consultazione non richiede competenze specialistiche
- generazione e la visualizzazione di una mappa come esito ad una interrogazione del database.

I sistemi WebGIS estendono all'ambiente internet/intranet molte delle funzionalità proprie dei GIS. Consentono di accedere a database territoriali remoti attraverso le funzioni offerte da un normale browser Internet, senza la necessità di acquisire un software dedicato.

Le applicazioni e i portali tradizionali si possono così arricchire di nuovi servizi basati sulla gestione e sull'elaborazione di informazioni territoriali e cartografiche favorendo, in tal modo, lo sviluppo di una rete di informazioni territoriali distribuite attraverso Internet (DGI, distributed geographic information).

I criteri di scelta si sono stati indirizzati verso prodotti che presentassero le seguenti caratteristiche:

- accessibili attraverso i tradizionali browser su piattaforma Microsoft Windows e in generale su qualsiasi macchina dotata di una Java Virtual Machine.
- diffusione integrata di cartografia raster associata a cartografia vettoriale, senza alcun limite di dimensione dei file immagine e la velocità di accesso alla banca dati indipendente dalla dimensione dei file.
- visualizzazione delle immagini "al volo", senza attese dovute alla dimensione dei file
- utilizzo delle mappe all'interno di applicazioni GIS e CAD
- compatibilità Internet Map Server (IMS) e differenti sistemi di proiezione
- sicurezza e protezione dei dati
- aggiornamento facile e veloce dell'archivio dei dati.

## C2. WEB GIS su piattaforma APOLLO ERDAS, criteri scelta e caratteristiche

*Piattaforma tecnologica per catalogare e distribuire dati vettoriali, raster, terrain e cartografici*

La piattaforma permette di applicare i servizi web compatibili OGC/ISO, ERDAS APOLLO Server cataloga e distribuisce tutti i dati geospaziali sul web, tramite una interfaccia user-friendly. Consentendo la catalogazione e distribuzione di dati geospaziali, ERDAS APOLLO Server implementa le funzionalità di base di una infrastruttura di dati spaziali.

Il modulo principale di ERDAS APOLLO 2009, ERDAS APOLLO Server, soddisfa le esigenze di gestione dati che possono modificarsi nel tempo, come appunto sono le biomasse. Basato su standard aperti Open Geospatial Consortium (OGC) e International Standardization Organization (ISO), ERDAS APOLLO Server è una piattaforma interoperabile che consente di condividere i dati internamente e con soggetti terzi, funzione particolarmente utile per la questione aggiornamento dati in remoto da parte di gruppi di lavoro multidisciplinari, come è il caso delle biomasse, che essendo per tipologia, derivazione, e chimico fisica molto diverse fra loro, sono studiate da istituti diversi, dislocati in varie parti di Italia, e che grazie alla piattaforma tecnologica possono aggiornare i dati direttamente dalle loro sedi

ERDAS APOLLO Server supporta nativamente numerosi formati di dati vettoriali e raster. Inoltre il modulo opzionale ERDAS APOLLO Solution Toolkit può estendere tali capacità di supporto a formati nuovi, personalizzati o classificati in funzione dei vostri flussi di lavoro. ERDAS APOLLO Solution Toolkit consente anche la creazione di client Web personalizzati, completando ulteriori necessità dei vostri flussi di lavoro.

ERDAS APOLLO Server implementa due flussi di lavoro molto completi per i dati vettoriali e le immagini raster. Il primo consente di impostare gli stili, la visualizzazione, l'esportazione, il filtraggio e la modifica di dati vettoriali. Il flusso di lavoro raster, che può essere notevolmente potenziato con ERDAS APOLLO Image Manager, include l'impostazione degli stili di visualizzazione e modalità di elaborazione delle immagini.

### Sintesi dei risultati del progetto

*Determinazioni delle tipologie di biomasse residuali agricole, rilievo su base provinciale del rapporto ponderale tra prodotto agricolo principale e residuo associato*

**Tabella 45. Riepilogo regionale dei potenziali della biomassa**

| REGIONI           | Paglie (kton)    | Potature (kton) | Sanse + Vinaccia (kton) | Totale Foreste (kton) | Biogas (milioni Nm <sup>3</sup> ) |
|-------------------|------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Piemonte          | 2.478,63         | 110,21          | 48,47                   | 256,57                | 337,87                            |
| Valle D'Aosta     | 0,20             | 1,70            | 0,30                    | 1,09                  | 12,16                             |
| Lombardia         | 3.616,85         | 40,01           | 16,98                   | 242,13                | 723,31                            |
| Veneto            | 1.744,74         | 367,09          | 74,73                   | 90,99                 | 272,61                            |
| Trentino A. Adige | 1,52             | 64,63           | 12,95                   | 34,99                 | 67,66                             |
| F.V. Giulia       | 592,80           | 56,40           | 11,15                   | 65,13                 | 48,80                             |
| Liguria           | 4,23             | 19,36           | 5,38                    | 96,47                 | 43,91                             |
| Emilia Romagna    | 1.556,55         | 398,46          | 62,62                   | 236,54                | 318,05                            |
| Toscana           | 724,08           | 237,67          | 63,76                   | 365,07                | 127,68                            |
| Marche            | 539,23           | 57,86           | 16,96                   | 32,32                 | 56,47                             |
| Lazio             | 436,80           | 247,85          | 56,70                   | 112,33                | 229,43                            |
| Umbria            | 430,10           | 101,89          | 13,73                   | 67,15                 | 43,78                             |
| Abruzzo           | 229,23           | 290,35          | 54,99                   | 60,13                 | 55,05                             |
| Molise            | 163,45           | 31,48           | 29,04                   | 43,75                 | 18,83                             |
| Campania          | 316,88           | 286,58          | 65,85                   | 119,83                | 260,19                            |
| Basilicata        | 452,10           | 49,96           | 11,58                   | 65,28                 | 35,95                             |
| Puglia            | 1.219,42         | 813,88          | 369,64                  | 46,43                 | 136,87                            |
| Calabria          | 212,11           | 1.012,21        | 189,92                  | 153,80                | 85,23                             |
| Sicilia           | 731,97           | 597,92          | 186,35                  | 25,58                 | 210,50                            |
| Sardegna          | 260,00           | 120,90          | 28,78                   | 65,01                 | 122,43                            |
| <b>TOTALE</b>     | <b>15.710,90</b> | <b>4.906,40</b> | <b>1.319,90</b>         | <b>2.180,58</b>       | <b>3.206,77</b>                   |

**Tabella 46. Potenziale annuo BIOGAS nelle regioni, in tep**

| <b>REGIONI</b>    | <b>Biogas<br/>FORSU</b> | <b>Biogas<br/>REFLUI</b> | <b>Biogas<br/>MACELLI</b> | <b>TOTALI da BIOGAS</b> |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Piemonte          | 40.378                  | 120.393                  | 2.290                     | <b>163.062</b>          |
| Valle D'Aosta     | 1.070                   | 4.827                    | 18                        | <b>5.914</b>            |
| Lombardia         | 78.545                  | 262.894                  | 8.568                     | <b>350.006</b>          |
| Veneto            | 43.087                  | 85.214                   | 97                        | <b>128.398</b>          |
| Trentino A. Adige | 8.394                   | 24.209                   | 1.905                     | <b>34.508</b>           |
| F.V. Giulia       | 9.124                   | 13.990                   | 189                       | <b>23.304</b>           |
| Liguria           | 18.044                  | 2.025                    | 17                        | <b>20.086</b>           |
| Emilia Romagna    | 46.485                  | 99.622                   | 6.438                     | <b>152.545</b>          |
| Toscana           | 46.372                  | 11.987                   | 541                       | <b>58.901</b>           |
| Marche            | 16.665                  | 9.346                    | 600                       | <b>26.611</b>           |
| Lazio             | 65.042                  | 41.452                   | 373                       | <b>106.867</b>          |
| Umbria            | 10.833                  | 9.210                    | 1.077                     | <b>21.121</b>           |
| Abruzzo           | 14.527                  | 10.704                   | 669                       | <b>25.900</b>           |
| Molise            | 2.708                   | 6.269                    | 80                        | <b>9.057</b>            |
| Campania          | 62.246                  | 59.818                   | 855                       | <b>122.918</b>          |
| Basilicata        | 4.761                   | 12.471                   | 339                       | <b>17.570</b>           |
| Puglia            | 41.032                  | 22.589                   | 110                       | <b>63.731</b>           |
| Calabria          | 18.863                  | 21.257                   | 282                       | <b>40.401</b>           |
| Sicilia           | 55.812                  | 42.711                   | 446                       | <b>98.969</b>           |
| Sardegna          | 19.502                  | 38.703                   | 569                       | <b>58.773</b>           |
| <b>Totale</b>     | <b>603.491</b>          | <b>899.689</b>           | <b>25.463</b>             | <b>1.528.643</b>        |

**Tabella 47. Potenziale annuo Biomasse Solide nelle regioni, in ktep**

| <b>REGIONI</b>    | <b>Paglie</b>   | <b>Potature</b> | <b>Sanse + Vinacci</b> | <b>Foreste</b> |
|-------------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------|
| Piemonte          | 949,67          | 47,71           | 26,93                  | 111,07         |
| Valle D'Aosta     | 0,08            | 0,74            | 0,17                   | 0,47           |
| Lombardia         | 1.385,77        | 17,32           | 9,43                   | 104,82         |
| Veneto            | 668,48          | 158,91          | 41,52                  | 39,39          |
| Trentino A. Adige | 0,58            | 27,98           | 7,19                   | 15,15          |
| F.V. Giulia       | 227,13          | 24,41           | 6,20                   | 28,19          |
| Liguria           | 1,62            | 8,38            | 2,99                   | 41,76          |
| Emilia Romagna    | 596,38          | 172,49          | 34,79                  | 102,40         |
| Toscana           | 277,43          | 102,89          | 35,42                  | 158,04         |
| Marche            | 206,60          | 25,05           | 9,42                   | 13,99          |
| Lazio             | 167,36          | 107,29          | 31,50                  | 48,63          |
| Umbria            | 164,79          | 44,11           | 7,63                   | 29,07          |
| Abruzzo           | 87,83           | 125,69          | 30,55                  | 26,03          |
| Molise            | 62,62           | 13,63           | 16,13                  | 18,94          |
| Campania          | 121,41          | 124,06          | 36,59                  | 51,87          |
| Basilicata        | 173,22          | 21,63           | 6,43                   | 28,26          |
| Puglia            | 467,21          | 352,33          | 205,36                 | 20,10          |
| Calabria          | 81,27           | 438,19          | 105,51                 | 66,58          |
| Sicilia           | 280,45          | 258,84          | 103,53                 | 11,07          |
| Sardegna          | 99,62           | 52,34           | 15,99                  | 28,14          |
| <b>Totale</b>     | <b>6.019,50</b> | <b>2.123,98</b> | <b>733,28</b>          | <b>943,97</b>  |



Implementazione degli algoritmi di calcolo e costruzione di 7 database geografici rappresentativi delle biomasse censite, costruzione del sistema informativo territoriale operante in modalità GIS, messa in opera del server dedicato e software APOLLO ERDAS per la consultazione interattiva dei dati in modalità WEB GIS, struttura in Figura 87.

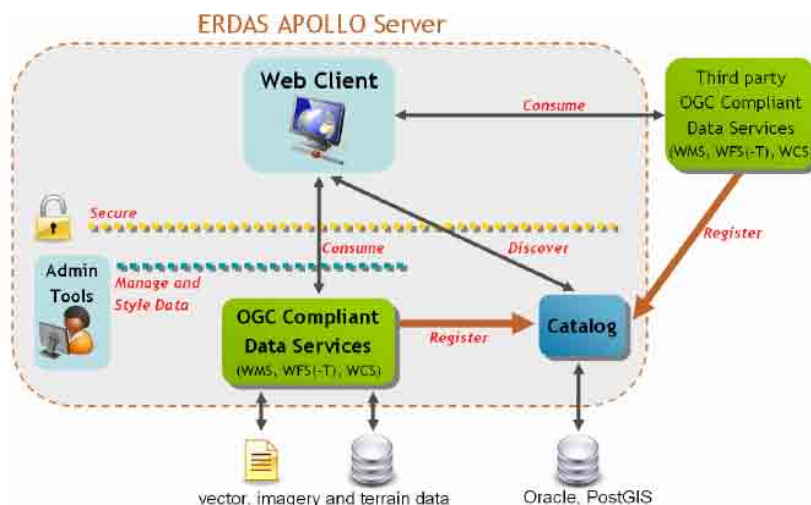


Figura 87. Struttura della piattaforma tecnologica ERDAS

Caratteristiche principali della piattaforma tecnologica:

- Pubblicazione dati vettoriali, immagini e uso suolo, compatibilità OGC- web services
- Definizione di scale e stili, possibilità dell'utente finale di procedere con analisi numeriche personalizzate attraverso filtri, e costruzione di mappe tematiche.
- Applicazione di sicurezza e protezione dei dati geospaziali
- Catalogo dei servizi ERDAS APOLLO e possibilità di ricerca di servizi cartografici WEB OGC- importabili
- Possibilità di creare ed esportare in locale dati vettoriali create dal sistema.

L'interfaccia creata che è customizzata, sarà aggiornata in remoto dai partner di progetto, e in accoglimento dei suggerimenti degli utenti migliorata negli aspetti grafici e funzionali, si presenta allo stato attuale con interfaccia come da Figura 88 ed è consultabile sul WEB all'indirizzo <http://www.atlantebiomasse.enea.it/>



Figura 88. Interfaccia del WEBGIS



## PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Vista la complessità e le diverse tipologie che rappresentano la biomassa, si è ritenuto opportuno affidare il compito di indagine delle produttività biomasse e loro mercato territoriale, a strutture dipartimentali specialistiche delle Università, privilegiando anche l'aspetto di localizzazione territoriale in ambito agricoltura, ben consci, come poi si è verificato, della estrema difficoltà a reperire sul territorio i dati di produttività ma soprattutto quelli di mercato.

L'indagine è suddivisa in quattro aree principali, colture energetiche, foreste, agricoltura, biomasse fermentescibili, e sono stato selezionati Istituti con larga esperienza nel settore ed in particolare:

- le università coinvolte sono tutte indirizzate al conseguimento degli obiettivi A e B, quello relativo alle produttività specifica della biomassa e dei mercati ad essa associata, ognuna con dei compiti specifici assegnati in base alle competenze
- il rilievo delle produttività delle colture energetiche e loro impiego di mercato, che viene condotto su tutto il territorio nazionale, è stato affidato **all'Istituto per le colture industriali dell'Università degli Studi di Bologna**;
- il rilievo degli indici di relazione tra produzioni forestali e biomassa residuale associata, e l'analisi del mercato della biomassa forestale, che viene condotto su tutto il territorio nazionale, è stato affidato al Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse dell'Università degli Studi della Toscana;
- il rilievo degli indici di relazione tra produzioni agricole e biomassa residuale associata, e l'analisi del mercato della biomassa residuale, che – data la vastità dell'indagine - viene condotto:
  - dal Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Energie Alternative e Rinnovabili (CREAR) dell'**Università degli Studi di Firenze** nelle province delle regioni Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Trentino Alto Adige, Liguria, Toscana, Lazio;
  - dal **Centro di Ricerca sulle Biomasse** (CRB) dell'Università degli Studi di Perugia nelle province delle regioni Friuli Venezia Giulia, Veneto, Marche, Emilia Romagna, Umbria, Abruzzo;
  - dal Dipartimento di Ingegneria Agraria e Agronomia del Territorio dell'**Università degli Studi di Napoli Federico II** nelle province delle regioni Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria, Sicilia, Sardegna.

Per le attività di indirizzo e contenuti tipologia biomasse nei database, divulgazione e disseminazione dei risultati è stata coinvolta **ITABIA** (Italian Biomass Association), che ha stampato e distribuito materiale informativo, presentato l'attività a convegni specialistici, mandato info con newsletter ai soci.

Per le attività inerenti il settore zootecnico e le biomasse fermentescibili è stato coinvolto il **CRPA di Reggio Emilia** ed in specifico per:

- l'identificazione degli elementi tecnico-economici e normativi rilevanti al fine della definizione di soglie dimensionali da utilizzare nel calcolo del potenziale;
- l'identificazione e selezione dei parametri nazionali/regionali e/o provinciali per il calcolo del quantità di biomasse fermentescibili e del biogas producibile da biomasse di origine animale e non;
- la valutazione dell'attuale livello d'uso di sfruttamento del potenziale esistente in impianti alimentati con deiezioni e altri materiale suddivisi per provincia;
- la valutazione del potenziale nazionale dal settore avicolo sia in relazione alla lettiera/pollina che agli scarti di macellazione.

## Nuovo nucleare da fissione

Le necessità di ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche estere e di “gestire” la tendenza dei prezzi al rialzo, unitamente al rispetto dei vincoli del protocollo di Kyoto sulle emissioni dei gas serra, impongono un cambiamento nel sistema energetico nazionale.

Le recenti dichiarazioni e determinazioni del Governo e l’ampio dibattito pubblico degli *stakeholder* in tema di energia nucleare, hanno creato alcune delle premesse necessarie per il rientro graduale del nostro Paese in una nuova filiera nucleare da fissione.

La fonte nucleare ha tutti i requisiti per fornire risposte efficaci alla problematica energetica ed il Governo ha pertanto avviato, anche con specifici interventi legislativi, il processo di ricostituzione di una rete di conoscenze tecniche, scientifiche ed industriali in materia nucleare e di un quadro normativo e regolamentare adeguato.

La sfida lanciata dal Governo può essere raccolta e vinta se tutte le Entità attive nel settore nucleare, Organismi regolatori e di controllo, Enti di ricerca e di formazione (in primis il Sistema Universitario), Industria ed Utilities energetiche, ma anche Finanza e Parti Sociali, avranno la capacità di mettere in atto una fattiva capacità di interrelazione, adottando un giusto equilibrio tra cooperazione e competizione. Oggi quindi, più che mai, in questo settore si sente la necessità di unire le risorse intellettuali e produttive e di convergere tutti sull’obiettivo di fornire al Paese il proprio contributo.

Il sistema della ricerca gioca un ruolo chiave nel rilancio del nucleare, in termini sia di valutazione e miglioramento delle tecnologie esistenti, che di sviluppo di nuove tecnologie.

In questo quadro, fondamentale è il contributo alla valutazione tecnico-economica dei reattori già in fase di commercializzazione (terza generazione) ed allo sviluppo di sistemi nucleari di nuova generazione (III+ e IV) – incluso il relativo ciclo del combustibile, con particolare riferimento alla gestione dei rifiuti radioattivi - su cui si concentrano notevoli sforzi a livello internazionale e comunitario.

I 439 reattori nucleari di potenza, per una potenza installata di circa 373 GWe, attualmente in servizio 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 già in funzione in Giappone, come l’Advanced Boiling Water Reactor (ABWR da 1400 MWe progettato da General Electric e Hitachi), altri - come i ben noti European (o Evolutionary) Pressurized-Water Reactor (EPR da 1.600 MWe fornito da AREVA) e l’Advanced Passive AP1000 della Westinghouse - in fase di costruzione in Europa e in Asia e, nei prossimi anni, in USA, Gran Bretagna, Italia, ecc.. Industrie italiane (ad es. ENEL, Ansaldo Nucleare, Mangiarotti Nuclear, ecc.) stanno già partecipando alla loro progettazione e realizzazione. L’ENEL ha siglato un Memorandum of Understanding e ha costituito con l’EdF francese una joint venture, Sviluppo Nucleare Italia, per la realizzazione di almeno quattro EPR nel nostro Paese.

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. Per tale motivo gli SMR sono oggetto dell’International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC, ex GNEP - Global Nuclear Energy Partnership), della quale anche l’Italia fa parte, in quanto reattori da realizzare in quei paesi emergenti ed in via di sviluppo che hanno espresso all’IAEA l’interesse a ricorrere, per la prima volta, all’energia nucleare. E’ rilevante osservare che anche l’amministrazione americana ha annunciato il lancio, entro il 2010, di un programma di R&S finanziato dal Department of Energy specificamente rivolto al rapido sviluppo di tali reattori. Va infine ricordato che vari Paesi stanno studiando l’applicabilità dei reattori evolutivi di piccola taglia ad un uso combinato, prevalentemente mirato alla contemporanea produzione di energia elettrica e dissalazione dell’acqua.

I reattori di quarta generazione, invece, sono ancora allo stadio concettuale. Essi sono oggetto di un’iniziativa avviata dal Department of Energy (DOE) USA 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. I sistemi nucleari di quarta generazione dovranno rispettare i seguenti requisiti:

- *Sostenibilità*, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- *Economicità*, ovvero basso costo del ciclo di vita dell'impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- *Sicurezza e affidabilità*; in particolare i sistemi di quarta generazione dovranno avere una bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e tollerare anche gravi errori umani; non dovranno, inoltre, richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito;
- *Resistenza alla proliferazione e protezione fisica* tali da rendere non conveniente il furto o la produzione non dichiarata di materiale nucleare o l'uso illecito della tecnologia e da assicurare un'aumentata protezione contro attacchi terroristici.

I paesi costituenti il GIF sono: Argentina, Brasile, Canada, Cina, Federazione Russa, Francia, Giappone, Gran Bretagna, Repubblica di Corea (Sud), Repubblica del Sud Africa, Svizzera, e Stati Uniti; anche l'Euratom, per l'Unione Europea, aderisce al Forum. L'Italia – grazie all'impegno su buona parte dei progetti europei del VI e VII Programma Quadro indirizzati allo sviluppo dei reattori di IV generazione e delle relative tecnologie, alle attività portate avanti nell'ambito del presente Accordo di Programma ed alla partecipazione, per conto Euratom, di singoli ricercatori ad alcune strutture organizzative di GIF - partecipa a Generation IV tramite l'Euratom.

Oltre 100 esperti dei 10 paesi aderenti a GIF hanno lavorato per due anni all'esame di un centinaio di alternative tecnologiche, e – con l'emissione nel dicembre 2002 di una Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems - sono pervenuti alla selezione dei sei concetti più promettenti per la IV generazione di reattori nucleari, intorno a cui organizzare il successivo programma di ricerca e sviluppo. I sei sistemi nucleari selezionati da GIF sono:

- *Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)* – reattori a spettro veloce, refrigerati a elio e con ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell'uranio fertile e la gestione degli attinidi;
- *Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)* - reattori a spettro veloce, refrigerati a piombo o eutettico piombo-bismuto e con ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell'uranio fertile e la gestione degli attinidi;
- *Molten Salt Reactor (MSR)* – reattori a fissione prodotta in una miscela circolante di sali fusi, con spettro epitermico e possibilità di gestione degli attinidi;
- *Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)* - reattori a spettro veloce, refrigerati a sodio e con ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell'uranio fertile e la gestione degli attinidi;
- *Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)* – reattore refrigerato ad acqua a temperatura e pressione oltre il punto critico, a spettro termico o veloce;
- *Very-High-Temperature Reactor (VHTR)* – reattore moderato a grafite e refrigerato ad elio, con ciclo del combustibile ad un solo passaggio (once-through). Questo reattore è ottimizzato per la produzione termochimica di idrogeno, oltre che di elettricità.

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.

Per quanto riguarda lo smaltimento dei rifiuti radioattivi, sono state maturate nel tempo notevoli esperienze e sono state sviluppate ed adottate una vasta gamma di procedure e di soluzioni tecniche. Oggi, abbandonate definitivamente altre tipologie di smaltimento, come l'affondamento a mare, i sistemi ed i metodi di smaltimento applicati nel mondo convergono nella sistemazione dei rifiuti di basso e medio livello di radioattività in apposite infrastrutture ingegneristiche superficiali, nella sistemazione di particolari classi di rifiuti a media-lunga vita in infrastrutture ingegneristiche situate più in profondità in particolari strati morfologici e, per i rifiuti ad alta attività e lunga vita, nell'impiego di particolari formazioni geologiche profonde (depositi geologici). L'esperienza che è stata maturata proviene dall'esercizio di circa un centinaio di depositi per lo smaltimento dei rifiuti di medio-bassa attività (in parte già chiusi) e dalle fasi di sviluppo o realizzazione di alcune decine di nuove installazioni (circa 40-50; fonte IAEA).

Un notevole contributo tecnico ai Paesi che hanno avviato o perseguono lo smaltimento dei rifiuti radioattivi e che si sono trovati ad affrontare diverse problematiche, da quelle più tecniche a quelle gestionali, economiche o sociali, deriva dalle Organizzazioni Internazionali delle quali anche l'Italia è membro, quali IAEA, EURATOM e OECD-NEA, dalle quali è possibile avere assistenza tecnica, informazioni e ritorni di esperienza maturata dai vari Operatori.

Le esperienze e gli studi a livello internazionale hanno mostrato che la scelta del sito e le relative procedure di selezione necessitano di diverse discipline tecnico-scientifiche e politico-amministrative. I fattori tecnici riguardano: la geologia, l'idrogeologia, la geochimica, la tettonica e la sismica, i processi di superficie, la meteorologia, gli eventi e le attività antropiche, i trasporti e la viabilità, l'uso del territorio, la distribuzione della popolazione, la radioprotezione e, più in generale, la protezione dell'ambiente.

Gli studi effettuati e le esperienze maturate in campo internazionale, infine, hanno dimostrato che la scelta dei siti di smaltimento dei rifiuti radioattivi è strettamente correlata con le condizioni geologiche di ciascun paese ed influenzata dai requisiti specifici di smaltimento ed inventari radiologici, dalle tipologie principali dei rifiuti da smaltire, dai criteri di conferimento adottati e dall'approccio regolatorio. Tutti questi fattori si ripercuotono sul progetto dell'installazione, sebbene, in generale, il progetto sia sviluppato con l'obiettivo di limitare la migrazione ed il rilascio dei radionuclidi nella biosfera, minimizzare l'esposizione degli operatori e del pubblico, minimizzare gli interventi, la manutenzione e la sorveglianza nella fase post-chiusura. Detto obiettivo è normalmente raggiunto attraverso soluzioni tecniche, quale l'adozione di barriere di confinamento, la realizzazione di strutture ingegneristiche, lo sfruttamento dei fattori ambientali e le caratteristiche geomorfologiche del territorio (concetto di sistema multibarriera).

In prospettiva sarà possibile adottare cicli del combustibile innovati, in particolare basati sulle tecnologie di separazione, riciclo e trasmutazione dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita, attualmente in fase di R&S, che permetteranno di ridurre drasticamente i requisiti del deposito geologico.

## DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto prevede.

- Attività di R&S e studi nel campo dei nuovi reattori nucleari da fissione di tipo evolutivo (INTD) ed innovativo (Generation IV), incluso il relativo ciclo del combustibile, sviluppati nell'ambito di programmi internazionali.
- Attività correlate e di supporto all'individuazione del sito e alla successiva realizzazione del deposito definitivo dei rifiuti radioattivi di II categoria e del deposito temporaneo dei rifiuti di III categoria.

Il prodotto finale dell'attività è costituito da una serie di attrezzature e prove sperimentali, programmi di calcolo, analisi di sistema e di sicurezza, progettazioni concettuali di sistemi nucleari evolutivi/innovativi ecc., al fine di contribuire a ricreare le competenze del sistema Italia e le capacità industriali per partecipare pienamente alla ripresa del settore nucleare in ambito internazionale. Le medesime competenze e capacità sviluppate a livello internazionale costituiscono anche l'indispensabile base culturale tecnico-scientifica a supporto delle politiche governative nel campo del nucleare da fissione, per le annunciate realizzazioni in Italia.

In particolare, il programma intende qualificare il sistema Italia in modo tale che sia in grado di partecipare alla progettazione e realizzazione degli impianti di generazione III+ (cosiddetti reattori INTD International Near Term Deployment) e di Generation IV nel caso essi soddisfino, coerentemente con la tipologia evolutiva ed innovativa, i criteri di sostenibilità, economia, sicurezza e affidabilità, resistenza alla proliferazione e protezione fisica. Il programma deve anche consentire agli operatori nazionali di avere un ruolo più incisivo nelle azioni di carattere industriale in corso. Per il raggiungimento di tale obiettivo il programma supporta solamente progetti proposti e portati avanti nell'ambito di grandi accordi internazionali – in corso o in via di definizione - e/o di progetti dei programmi quadro europei (Euratom). Sono infine stati effettuati studi di inquadramento generale dell'energia nucleare e studi di scenario relativi a cicli del combustibile avanzati che permettano di minimizzare i rifiuti radioattivi e di ridurre i requisiti del deposito definitivo.

Per quanto riguarda le attività di supporto all'individuazione del sito e successiva realizzazione del deposito definitivo dei rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo dei rifiuti di III categoria, il prodotto dell'attività è costituito, nella prima fase prevista nel primo anno, dalla raccolta di informazioni tecnico-scientifiche di base e delle caratteristiche tecniche tipiche dei siti e degli impianti di smaltimento e di stoccaggio dei rifiuti radioattivi, da studi ed analisi preliminari di supporto, nonché dalla raccolta di documentazione su esperienze analoghe

comunitarie ed eventualmente internazionali, che sono stati messi a disposizione del Gruppo di Lavoro – costituito da rappresentanti del Governo, delle Regioni e degli Enti Esperti - nel processo di definizione delle caratteristiche dell'insediamento e dei criteri di selezione. Le competenze impiegate su questo tema costituiranno, nella seconda fase, un gruppo di competenze multidisciplinari che, in collaborazione e sinergia con altri soggetti pubblici e privati di settore, potranno essere impiegate nella fase progettuale e realizzativa dell'insediamento, nonché nella funzione di advisor alle Istituzioni ed alle Pubbliche Amministrazioni.

Le attività previste per il primo sono organizzate in 4 linee progettuali:

- LP1: Linea Progettuale 1 - Studi su nuovo nucleare, scenari, ciclo del combustibile e minimizzazione rifiuti radioattivi; Segreteria tecnica a supporto delle Istituzioni (Advisor)
- LP2 - Linea progettuale 2 - Reattori evolutivi INTD - *International Near Term Deployment*
- LP3 - Linea progettuale 3: Reattori innovativi di quarta generazione - Generation IV
- LP4: Linea progettuale 4 - Attività a supporto della individuazione e scelta di un sito e per la successiva realizzazione di un deposito definitivo) dei rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo dei rifiuti di III categoria.

## **RISULTATI**

### **Linea Progettuale 1: Studi sul nuovo nucleare, scenari, ciclo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi, segreteria tecnica a supporto delle istituzioni (advisor)**

Nell'ambito della linea sono state svolte attività che spaziano dalle metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi innovativi (reattori di IV generazione) alle analisi di differenti scenari energetici che comprendono sistemi nucleari, con particolare riferimento alle valutazioni economico-finanziarie di reattori di piccola/media taglia.

Scopo dell'attività è quello di fornire al Governo elementi e valutazioni necessari a supportare il processo decisionale alla base di una ripresa dell'opzione "nucleare da fissione" in Italia.

I temi trattati nella prima annualità, oggetto di studi anche negli anni successivi, riguardano:

- Ricognizione/valutazione iniziative ed accordi internazionali
- Studi di scenario
- Metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione
- Studi economici su reattori di medio/piccola taglia
- Metodologie per la separazione dei rifiuti al fine di consentire la loro minimizzazione
- Partecipazione a comitati internazionali (NEA, IAEA, EURATOM, ecc.)
- Supporto al Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali

#### **LP1.A Ricognizione/valutazione iniziative ed accordi internazionali**

La partecipazione ENEA ai programmi internazionali di ricerca e sviluppo sul nuovo nucleare da fissione ha permesso di acquisire elementi necessari per una approfondita ricognizione e valutazione tecnico-economica delle varie iniziative ed accordi di collaborazione internazionali ed europei in corso o in via di definizione (GENIV, GNEP, INPRO, SNETP, ecc.) nel campo dei sistemi nucleari innovativi e dei relativi cicli del combustibile avanzati. Ha consentito altresì di condurre un'approfondita analisi della situazione internazionale su cui innestare un programma nazionale funzionale alla riapertura dell'opzione nucleare in Italia.

Il documento "Nucleare da fissione: stato e prospettive", disponibile sul sito ENEA, fornisce lo stato dell'arte sull'argomento ed analizza le prospettive di sviluppo del nucleare da fissione nel mondo, in Europa ed in Italia, costituendo una buona base di partenza sulla quale sviluppare i necessari approfondimenti tematici per un supporto più puntuale all'azione del Governo per il ritorno all'energia nucleare in Italia.

#### **LP1.B Studi di scenario**

Sono stati eseguiti studi di benchmarking con il codice di scenario francese COSI 6, nell'ambito della partecipazione all'Expert Group "Fuel Cycles Transition Scenarios Studies - FCTS" del Working Party on Scientific

Issues of the Fuel Cycle della NEA e della collaborazione ENEA-CEA, riferendosi ad alcuni scenari europei e nazionali; dopo aver messo a punto il metodo sono stati analizzati 3 scenari di transizione:

- ciclo aperto per un parco reattori di tipo PWR;
- “monoriciclo” del Pu per un parco reattori di tipo PWR;
- “monoriciclo” del Pu per un parco reattori di tipo PWR con successivo impiego di reattori veloci di quarta generazione in grado di riciclare Pu ed attinidi minori.

#### **LP1.C Applicazione di metodologie per valutare la resistenza alla proliferazione e la protezione fisica dei sistemi innovativi**

Il lavoro svolto ha avuto come scopo quello di fare il punto sullo sviluppo e sull'applicazione delle metodologie internazionali attualmente in atto per valutare la resistenza alla proliferazione di sistemi innovativi, ovvero le metodologie in ambito INPRO (iniziativa IAEA) e quelle sviluppate dal Proliferation Resistance & Physical Protection Working Group del Generation IV International Forum (GIF). Sono state indagate le due linee di attività su cui è attualmente impegnato il gruppo GIF PR&PP: la finalizzazione di un caso studio su un ipotetico sistema innovativo usato per testare la metodologia e la futura applicazione della metodologia a sistemi GenIV. Il sistema utilizzato come caso studio è un ipotetico reattore veloce raffreddato a sodio (ESFR: European Sodium Fast Reactor), assieme ad una porzione di ciclo del combustibile. La resistenza alla proliferazione è stata valutata a fronte di quattro scenari: diversione, uso improprio degli impianti e processi, furto di materiale e infine dichiarata volontà di uno Stato di dotarsi di armi nucleari. Sono state considerate varie configurazioni del nocciolo dell'ESFR per valutare la sensibilità della metodologia.

La metodologia, una volta che questa si sia dimostrata affidabile e robusta, potrà rappresentare per i progettisti dei vari sistemi di quarta generazione un efficace tool che permetterà di inserire, già nelle primissime fasi di progetto, quegli elementi che ne aumenteranno le caratteristiche di non proliferazione nel modo più efficiente e meno costoso. Per facilitare questo processo, si sono creati recentemente dei team tra i membri del gruppo di lavoro PR&PP e i membri degli steering committees GIF dei vari sistemi: il primo compito sarà la caratterizzazione dei sistemi in termini di non proliferazione e protezione fisica. L'ENEA fa parte del team che si occupa del Lead Fast Reactor e l'attività caratterizzerà tutto il 2009.

#### **LP1.D Costo del kWh nucleare e studi economici su reattori di medio/piccola taglia**

E' stato messo a punto un primo strumento di analisi, che include tanto una *mass flow analysis* quanto una stima delle grandezze economico-finanziarie, relativo a diversi scenari di *deployment* di un parco di generazione di energia nucleare nel nostro Paese. Per ogni scenario è stato stimato il profilo temporale del fabbisogno dei materiali critici e del fabbisogno finanziario per coprire l'investimento. Questo lavoro di analisi offre altresì una metodologia di confronto delle due categorie di reattori considerate: il procedimento di analisi considera dapprima scenari ipotizzanti unicamente la tipologia EPR, quindi casistiche comprendenti un mix di impianti costituito da reattori EPR e moduli IRIS, e offre un'analisi comparata dei parametri chiave nei diversi scenari alternativi.

L'analisi svolta evidenzia come i consumi di uranio naturale e zirconio, entrambi legati alla fabbricazione di combustibile nucleare, aumentino quando reattori di tipologia IRIS vengano inclusi in un parco-reattori nazionale, rispetto all'utilizzo di soli reattori di grande taglia come l'EPR. Allo stesso modo, il maggiore fabbisogno specifico di acciaio di IRIS comporta una richiesta maggiore di questo elemento strutturale nel periodo di *commissioning* di un parco-reattori “misto”, che include cioè anche reattori IRIS. Al contrario, il fabbisogno di rame, presente solamente nella tipologia EPR, si riduce quando alcuni EPR nel parco-reattori vengano sostituiti da moduli IRIS.

A livello economico, gli scenari “misti” appaiono penalizzati da un'ipotesi di costo specifico (\$/kWe) maggiore per IRIS rispetto all'EPR, peraltro legata alla perdita di economie di scala nei costi overnight di costruzione. Gli scenari “misti” registrano un investimento totale maggiore degli scenari relativi a soli EPR. Tuttavia, occorre ricordare che l'analisi offerta dal codice DESAE non può considerare i vantaggi legati alla flessibilità intrinseca degli investimenti modulari, che si manifesta maggiormente negli scenari “misti”. Maggiore è il numero di unità-reattore, maggiore è il grado di modularità dell'investimento, con la possibilità di differire o arrestare la costruzione dei moduli-reattore nel caso di condizioni al contorno sfavorevoli. In un investimento modulare il capitale-medio a rischio è minore. Queste considerazioni legate al rischio finanziario devono necessariamente far parte di un'analisi economico-finanziaria, insieme a considerazioni sulla redditività e sull'efficienza della struttura di costo, espressa per esempio dal costo unitario di generazione (“LUEC”).

I risultati ottenuti rappresentano quindi un primo tentativo di analisi, che meriterebbe un ulteriore affinamento, da cui potrebbero inoltre emergere interessanti dinamiche legate ai modi di finanziamento dei programmi nucleari.

#### LP1.E Metodologie per la separazione dei rifiuti al fine di consentire la loro minimizzazione

Utilizzando un impianto di elettrorefinazione (Figura 89) costruito nell'ambito di progetti comunitari di ricerca e sviluppo sulla separazione e recupero degli attinidi minori dal combustibile, sono state condotte importanti campagne sperimentali complementari e sinergiche con quelle svolte in precedenza. Tali attività hanno riguardato lo studio dei meccanismi che regolano il trasferimento delle terre rare da un bagno di bismuto fuso operante come anodo, al catodo solido immerso nel bagno di sale. La finalità era quella di ripulire il metallo fuso mediante il trasferimento dei lantanidi in esso disciolti, al bagno di eutettico, nel quale possono essere successivamente separati mediante scambio ionico su colonna contenente zeolite 4°. I risultati delle campagne sperimentali sono di grande interesse ed hanno dimostrato che, una volta messi a punto i parametri di processo, è possibile rimuovere la maggior parte dei metalli inquinanti simulanti gli attinidi minori.

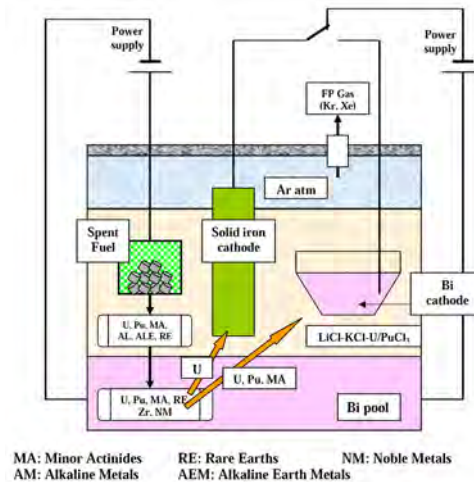


Figura 89. Diagramma schematico del processo di elettrorefinazione

#### LP1.F Partecipazione a comitati internazionali (NEA, IAEA, EURATOM, ecc.)

In questo ambito ENEA 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, ecc.). 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 Technical Working Groups (TWG) permanenti dell'IAEA.

#### LP1.G Supporto al Ministero dello Sviluppo Economico-DGERM per coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali

Come previsto dall'articolo 4 dell'Accordo di Programma, l'ENEA ha garantito il necessario supporto al MSE-DGERM per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali nel campo del nuovo nucleare da fissione.

#### Linea Progettuale 2 - Reattori evolutivi INTD – International Near Term Deployment

Il programma internazionale selezionato nell'ambito di questa linea progettuale è l'IRIS Project in corso di sviluppo nell'ambito del programma americano GNEP (Global Nuclear Energy Partnership).

Le attività previste per il primo anno sono articolate nei seguenti macro-obiettivi:

- Prova integrale: progettazione, realizzazione ed operazione di un circuito sperimentale da realizzarsi presso l'area sperimentale della SIET S.p.A., che simula il circuito primario e secondario e il contenimento del reattore IRIS (Obiettivi da LP2-A a LP2-L1);
- Progettazione e prove di qualifica di componenti critici del reattore IRIS (obiettivi da LP2-M a LP2-Q);
- Progettazione dell'isolamento sismico ed analisi sismiche del reattore IRIS (obiettivi da LP2-R a LP2-T);
- Progettazione di noccioli innovativi per reattori di tipo evolutivo (obiettivo LP2-U).



I risultati delle attività svolte nell'ambito di questa linea sono ampiamente descritti in una quarantina fra rapporti di calcolo, disegni e documenti di progetto. In particolare si segnala il set documentale relativo alla progettazione dell'impianto sperimentale SPES-3 destinato all'effettuazione di prove integrali di sistema e di sicurezza per la certificazione del reattore di generazione III+ (IRIS). Relativamente allo sviluppo di questo reattore sono state anche effettuate varie analisi termoidrauliche di sistemi e componenti chiave dell'impianto quali il generatore di vapore ed il sistema di rimozione del calore in condizioni di emergenza. Altri studi hanno riguardato le analisi sismiche e lo sviluppo di noccioli innovativi con lungo tempo di residenza in reattore.

#### LP2.A Prova integrale IRIS, specifica di prova e matrice sperimentale

L'attività, che costituisce l'input per le attività di progettazione, ha riguardato la definizione dei requisiti e vincoli dei componenti e sistemi dell'impianto sperimentale SPES-3 (figura 90) e della matrice di prova sperimentale da eseguirsi per la simulazione delle sequenze incidentali, ritenute più significative per la validazione di codici.

#### LP2.B Prova integrale IRIS, Manuale di GQ

La realizzazione dell'impianto sperimentale SPES3 e della relativa campagna sperimentale in Garanzia di qualità è un requisito richiesto dall'USNRC per le prove in appoggio alla certificazione del reattore IRIS. Sono stati emessi, quindi, due documenti che definiscono il piano di qualità dell'ENEA e della SIET. Tali documenti specializzano le procedure di Garanzia della Qualità dei Manuali di GQ delle due organizzazioni per la realizzazione dell'impianto SPES-3 e per l'esecuzione della campagna sperimentale.

#### LP2.C Prova integrale IRIS, analisi di pre-test

L'analisi di pre-test, eseguita dopo la fase di progettazione concettuale, ha permesso di valutare la capacità dell'impianto SPES-3 di simulare il comportamento termoidraulico del reattore IRIS durante una sequenza incidentale, e di individuare le modifiche da apportare all'impianto durante la successiva fase di progettazione esecutiva. E' stato sviluppato il modello dell'impianto (input deck per il codice RELAP5) e sono stati analizzati cinque transitori, ritenuti più significativi per le tipologie di incidenti da simulare.

Il prodotto di questa attività sono due rapporti tecnici, uno relativo alla definizione del modello dell'impianto e l'altro riguardante i risultati delle relative analisi di pre-test.

L'esecuzione dei calcoli a supporto della progettazione è sicuramente l'attività che ha richiesto un maggior impegno per le diverse modifiche apportate al progetto del simulatore sperimentale.

#### LP2.D Prova integrale IRIS, progettazione concettuale impianto SPES-3

Sulla base dei requisiti, criteri e vincoli riportati nella specifica di prova, è stato sviluppato il progetto concettuale dell'impianto SPES-3. Le dimensioni dei vari componenti sono state definite in funzione dei fattori di scala e delle condizioni di progetto (temperatura e pressione). La sistemazione impiantistica dei vari componenti sulla struttura di supporto è stata effettuata in modo da rispettare le posizioni relative. E' stata definita la strumentazione necessaria per l'acquisizione delle informazioni sperimentali e per il controllo/comando e le relative frequenze di acquisizione.

Inoltre, a supporto della progettazione concettuale, è stata effettuata un'attività finalizzata a verificare la capacità di simulazione dell'impianto sperimentale dei fenomeni che intervengono durante un transitorio incidentale nell'impianto reale. A tal fine è stato sviluppato un programma di calcolo, basato sulla metodologia FSA (Fractional Scaling Analysis), che permette di valutare e quantificare le distorsioni nel processo. L'applicazione dello strumento di calcolo ai risultati provenienti dalla simulazione del transitorio DVI-LOCA, eseguita con RELAP5 per SPES-3 e con RELAP5-GOTHIC per l'impianto IRIS, ha evidenziato che i volumi del canale centrale erano sovrastimati rispetto ai valori scalati dell'impianto reale e che il componente, che simula il Dry-Well del contenimento, non è scalato correttamente e che è necessario investigare le cause delle distorsioni evidenziate dai calcoli nell'evoluzione della pressione rispetto al reattore IRIS. Si sottolinea che tale attività non era originariamente prevista nel piano annuale di realizzazione ed è stata effettuata dal CIRTEN.

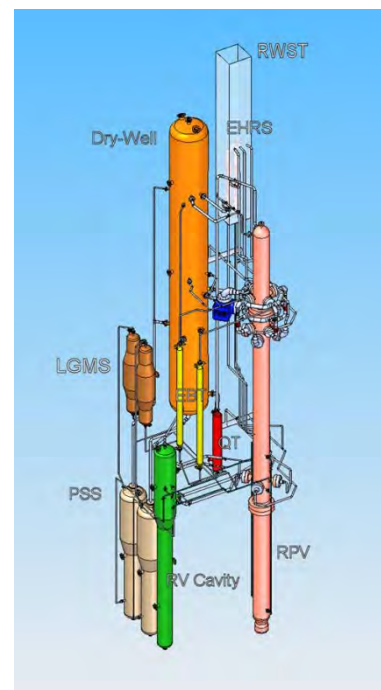


Figura 90. Schema dell'impianto SPES-3



### **LP2.E Prova integrale IRIS, progettazione esecutiva impianto SPES-3.**

Analogamente all'esecuzione dei calcoli a supporto della progettazione (Ob. LP2.C), anche la progettazione esecutiva della facility ha richiesto un notevole impegno per le diverse modifiche fatte al progetto del simulatore sperimentale.

Sulla base dei documenti elaborati nella progettazione concettuale, è stata definita la configurazione complessiva dell'impianto SPES3, incluso il sistema di controllo e rilevazione dati, sviluppando i disegni di dettaglio dei componenti ed i calcoli preliminari di dimensionamento meccanico, termico e idraulico dei componenti. In particolare è stata effettuata:

- a. la progettazione meccanica dei singoli componenti e delle linee di interconnessione (piping);
- b. la progettazione dei dispositivi di regolazione (valvole ed accessori);
- c. la progettazione del sistema di controllo e supervisione dell'impianto;
- d. la progettazione del sistema di acquisizione ed elaborazione dati (hardware e software);
- e. l'elaborazione dei disegni di progettazione esecutiva e dei data-sheet di ciascun componente.

### **LP2.F Prova integrale IRIS, fornitura del canale centrale impianto SPES-3**

L'attività relativa è stata spostata ad un successivo piano di realizzazione.

### **LP2.G Prova integrale IRIS, rimozione impianti esistenti e predisposizione aree**

Sono stati emessi tre documenti. Il primo riguardante il piano di progettazione, che definisce le attività necessarie per l'installazione della nuova struttura portante, oltre alle modifiche da effettuare ai sistemi ausiliari esistenti dell'impianto SPES-2 (acqua alimento, scarico vapore, alimentazione elettrica del canale centrale) per rendere operativo anche l'impianto SPES-3.

Tale documento descrive, inoltre, l'attività di rimozione di alcuni componenti esistenti, effettuata per predisporre l'area all'installazione della struttura di supporto dell'impianto SPES-3. Il secondo documento riguarda la progettazione esecutiva della nuova struttura portante da installare nelle immediate vicinanze dell'impianto SPES-2. Il terzo documento costituisce la specifica tecnica da utilizzare per l'emissione dell'ordine per la realizzazione della struttura.

### **LP2.H Prova integrale IRIS, realizzazione impianti ausiliari ed emissione specifiche tecniche d'ordine componenti impianto SPES-3**

L'attività di emissione delle specifiche tecniche d'ordine dei componenti dell'impianto SPES-3 è inclusa nell'obiettivo LP2.E, essendo tali documenti un prodotto della progettazione esecutiva.

La realizzazione degli impianti ausiliari ha riguardato la sostituzione di alcuni componenti critici della sottostazione di alta/media potenza di alimentazione degli impianti SPES-2 e SPES-3, cioè dell'interruttore 130 kV e relativi sistemi accessori. Per emettere l'ordine per l'approvvigionamento dei componenti e procedere all'esecuzione dei lavori, è stato necessario eseguire dapprima la progettazione esecutiva delle modifiche e fare approvare il progetto ai vari soggetti coinvolti: EDIPOWER, che è proprietaria dell'area e delle apparecchiature concesse in uso a SIET, e ENEL/TERNA, che è proprietaria della rete nazionale AT. L'installazione dei componenti sarà possibile solo ad ottobre, quando la rete sarà senza tensione per permettere le operazioni di manutenzione.

### **LP2.I Prova integrale IRIS, sviluppo strumentazione - progetto e realizzazione della sonda a termocoppia riscaldata per misure di velocità**

Al fine disporre di un impianto sperimentale per la qualifica e la calibrazione delle sonde a termocoppia/termoresistenza riscaldata da utilizzare per le misure di portata in zone particolari del canale centrale, è stato modificato l'impianto sperimentale VASIB, disponibile presso il Centro Ricerche dell'ENEA in Casaccia.

Per la realizzazione dei sensori è stata emessa la specifica tecnica, che riporta le condizioni di funzionamento, le modalità di installazione e le prove di qualifica.

L'attività di sviluppo delle sonde a termocoppia riscaldata e della relativa elettronica non ha dato i risultati attesi, per cui si è proceduto con la realizzazione di un nuovo sensore, basato su una termoresistenza, e la

riprogettazione dell'elettronica associata. Lo strumento di misura (sensore e elettronica associata) è stato messo a disposizione degli sperimentatori per la verifica di fattibilità della misura solo a fine piano di realizzazione.

L'attività del CIRTEN, prevista per questo obiettivo, è stata, invece, riorientata alla verifica dello scaling del contenimento (Ob. LP2-D), sia per le difficoltà incontrate nello sviluppo delle sonde a termocoppia riscaldata, sia per la necessità di completare al più presto la verifica della capacità dell'impianto SPES-3 di simulare il comportamento incidentale del reattore IRIS.

#### LP2.L Prova integrale IRIS, sviluppo strumentazione – selezione e qualifica strumentazione per misure termiche e fluidodinamiche in fluido bifase

Lo studio ha affrontato le problematiche della scelta e qualificazione delle metodiche di misura nelle condizioni operative di pressione e temperatura per le grandezze di interesse (portata, densità, grado di vuoto, flow pattern). In particolare, sono state valutate le potenzialità e le prestazioni degli strumenti commerciali o sviluppati da laboratori internazionali.

#### LP2.M Analisi dinamica EHRS e progettazione condensatore EHRS di IRIS

Le esperienze PERSEO effettuate precedentemente all'AdP MSE-ENEA e messe a disposizione da ENEA ed eseguite da SIET sul prototipo in scala reale di un condensatore a tubi verticali, hanno evidenziato l'incapacità del codice RELAP5 di valutare correttamente il coefficiente di scambio termico di condensatori verticali. L'attività ha, quindi, riguardato dapprima un'analisi critica delle correlazioni di scambio termico sviluppate per tubi orizzontali e verticali, al fine di dimostrare i vantaggi presentati dagli scambiatori verticali dal punto di vista termoidraulico, e successivamente lo sviluppo di una correlazione per tubi verticali, basata sulla teoria della condensazione a film su parete che è stata validata con le esperienze PERSEO. Tale correlazione è stata implementata nel codice RELAP5 per la simulazione del condensatore EHRS del reattore IRIS e dell'impianto SPES-3.

Un metodo alternativo, che modifica il coefficiente di scambio termico per mezzo del parametro di "fouling", è stato sviluppato da ENEA.

#### LP2.N Simulazione del miscelamento e pre test sul Downcomer di IRIS

L'attività è stata finalizzata alle simulazioni statiche del campo di moto e alle simulazioni dinamiche del miscelamento di temperatura e boro nel downcomer di IRIS. Sono inoltre state effettuate: l'analisi critica di modelli di turbolenza implementati nei codici CFD, l'analisi di scalatura e la progettazione dell'apparecchiatura sperimentale (fattore di scala 1:5) che simula il downcomer e la parte bassa del vessel.

#### LP2.O Esperienze per la caratterizzazione di tubi elicoidali per GV IRIS

L'attività ha riguardato le analisi meccaniche e termoidrauliche, anche in piena scala, per la valutazione del carico di collasso e la misura delle perdite di carico bifase per i tubi elicoidali del GV di IRIS. I risultati delle analisi meccaniche hanno supportato la preparazione di un nuovo code case ASME per la progettazione di tubi sottoposti a pressione esterna maggiore di quella interna. La misura delle perdite di carico è stata eseguita su un impianto realizzato presso l'area sperimentale della SIET.

#### LP2.P Studio di termofluidodinamica per GV di IRIS

Lo studio del deflusso monofase e bifase di acqua e di vapore surriscaldato in tubi elicoidali è di importanza fondamentale nel progetto del reattore IRIS. In particolare occorre conoscere le perdite di carico lato primario e secondario, lo scambio termico primario e secondario, la stabilità del deflusso in canali paralleli e le vibrazioni fluido indotte.

L'attività svolta si riferisce sia all'esecuzione di prove di

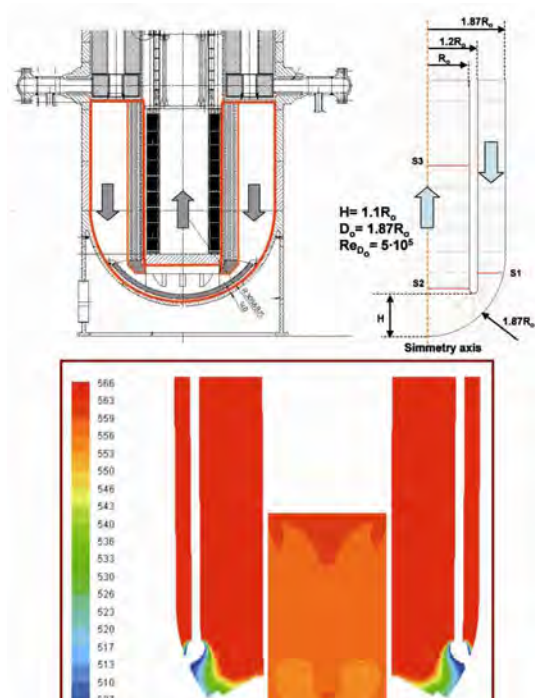


Figura 91. Miscelamento del boro. Risultati della simulazione

termoidraulica a bassa pressione ed a piena pressione e temperatura su sezioni e modelli di tratti di tubazioni elicoidali, sia alla ricerca di informazioni reperibili in letteratura aperta per valutare le perdite di carico e le correlazioni di scambio termico in condizioni di crisi termica (dryout) e post-dryout. Correlazioni e modelli atti a simulare le fenomenologie termofluidodinamiche relative ai flussi monofase e bifase nei tubi elicoidali del secondario di generatori di vapore sono state inoltre implementate nel codice RELAP5 Mod.3.2b.

#### **LP2.R Procedure per il calcolo di fragility curves di IRIS**

L'attività è stata finalizzata allo sviluppo di una nuova procedura per il calcolo della probabilità di rottura al sisma (fragility curves), basata su tecniche numeriche consolidate, come il metodo FEM, Montecarlo, ecc., e capace di eliminare/ridurre le incertezze e il grado di conservatività dei metodi tradizionali. Al fine di applicare la procedura ai componenti critici del reattore IRIS, è stato sviluppato un modello semplificato a elementi finiti.

#### **LP2.S e T Analisi sismica preliminare dell'edificio reattore di IRIS e isolamento sismico IRIS**

L'analisi sismica dell'edificio degli ausiliari ha richiesto dapprima la scelta di una strategia di calcolo, basata sulla modellazione FEM del sistema allo studio con l'approccio delle sottostrutture e sulla definizione degli "inputs" mediante le "time histories" dell'accelerazione dei sismi di riferimento, e successivamente lo sviluppo di un modello per ogni codice utilizzato per le analisi: MSC Marc (CIRTEN-Unipi), ANSYS (WEC e CIRTEN-Polimi), ABAQUS (ENEA). Per l'elevato dettaglio delle strutture, il modello di MSC Marc è stato scelto come riferimento per i calcoli futuri ed è stato reso disponibile ed operativo anche sul codice ANSYS mediante un'adeguata procedura di traduzione/trasporto dal codice originale. E' stato valutato il comportamento dell'edificio non isolato simicamente al terremoto di progetto. Sono state analizzate diverse configurazioni del sistema di isolamento sismico, al fine di ottimizzare la risposta dell'edificio al terremoto di progetto. Sono state definite le dimensioni geometriche degli isolatori, il fattore di forma, il tipo di miscela, il loro numero e la disposizione, che deve prevedere anche l'accessibilità per l'ispezione e l'eventuale sostituzione degli isolatori. E' stata anche effettuata una valutazione preliminare dei costi connessi all'utilizzo di questa tecnologia. Infine, è stata svolta una ricerca, a livello europeo e mondiale, per definire la normativa sismica da utilizzare nella progettazione della struttura isolata e degli isolatori.

#### **LP2.U Progettazione di nocciolo innovativo di reattore INTD**

La progettazione di noccioli innovativi per reattori di tipo evolutivo è stata focalizzata sullo studio di noccioli che consentano sia un incremento del tasso di irraggiamento rispetto ai reattori di seconda generazione, sia la possibilità di estendere il periodo di irraggiamento tra successive ricariche. Lo studio di un nocciolo di un reattore pressurizzato ad acqua leggera, idoneo a produrre una potenza termica dell'ordine dei 600 MW (circa 220MWe) e capace di raggiungere tassi di bruciamento dell'ordine dei 60 GWD/t, ha evidenziato che la configurazione selezionata richiede cicli di irraggiamento di durata inferiore rispetto al periodo totale di permanenza del combustibile nel reattore (4 cicli). L'analisi dello stesso nocciolo con uno schema di ricarica del combustibile a ciclo unico (once-through), ha evidenziato che si ottengono tassi di bruciamento inferiori (37 GWD/t) e valori più alti della concentrazione di boro ad inizio vita per il controllo della reattività, ma tale strategia offre la possibilità di gestire reattori nucleari con contratti di "leasing" del combustibile, con importantissimi risvolti per quel che riguarda la difesa dalla proliferazione delle armi nucleari.

#### **Linea Progettuale 3: Reattori innovativi di quarta generazione – Generation IV**

La linea progettuale LP3 si è focalizzata sullo sviluppo di sistemi e componenti di reattori di IV generazione relativamente ai quali il sistema italiano sta acquisendo un rilevante posizionamento a livello europeo ed internazionale. Le attività riguardano, in particolare, il progetto e le analisi di pre-test del sistema di rimozione del calore di decadimento (DHR) del *Lead cooled Fast Reactor* (LFR), nonché lo sviluppo di un codice di termo fluidodinamica per noccioli aperti raffreddati a metallo liquido pesante. Sono anche stati effettuati alcuni test sperimentali presso l'impianto He-FUS3 del Centro ENEA del Brasimone (Figura 92) che hanno permesso una qualifica parziale di codici di sistema per l'analisi del comportamento termo-fluidodinamico del *Very High Temperature Reactor* (VHTR) di IV generazione. Per entrambi i reattori sono stati sviluppati modelli di calcolo per la progettazione neutronica del nocciolo.



**Figura 92. Impianto He-FUS3 (ENEA, Brasimone)**

### Attività di supporto allo sviluppo di reattori LFR

Le attività sono state dedicate alla progettazione e sviluppo di componenti e sistemi da utilizzarsi in reattori refrigerati a piombo tipo LFR, così come alla caratterizzazione di materiali strutturali in ambiente rappresentativo.

#### LP3.A Specifica di prova e progettazione sezione di prova DHR e matrice test

E' stata effettuata la progettazione di un sistema prototipico di rimozione del calore residuo (Decay Heat Removal System – DHR) e della relativa sezione di prova da installare nella facility a metallo liquido pesante CIRCE del centro ENEA del Brasimone (Figura 93).

La progettazione è stata realizzata in collaborazione con l'operatore industriale Del Fungo Giera Energia, che ha fornito il disegno concettuale ed il disegno meccanico preliminare del componente.

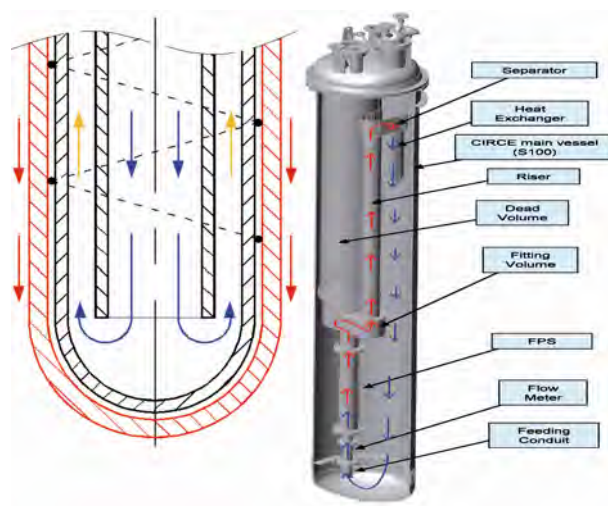


Figura 93. Schema di un elemento scambiante a tre pareti del DHR e sezione di prova

#### LP3.B Realizzazione sezione di prova DHR e analisi di pre-test

E' stata effettuata un'analisi di pre-test per la caratterizzazione del DHR quando installato nella sezione di prova ICE dell'impianto CIRCE, adottando rispettivamente il codice di sistema termoidraulico RELAP, ed il codice SIMMER per lo studio dell'interazione metallo liquido acqua.

L'obiettivo si è concluso con la consegna da parte della Ditta costruttrice del prototipo di scambiatore DHR.

#### LP3.C Realizzazione girante pompa e test in piombo

Uno screening preliminare ha permesso di evidenziare il composito MAXTHAL (Ti3SiC2) quale possibile materiale adatto a resistere a corrosione-erosione per impiego nelle giranti delle pompe da utilizzarsi in metallo liquido.

E' stata quindi selezionata una tipologia di girante aperta con una geometria attinente a quella della girante della pompa del reattore. Successivamente è stato effettuato l'acquisto di un blocco di materiale in MAXTHAL dall'azienda americana 3one2 e, dopo una ricerca di mercato, si è selezionata la ditta "Stamplast" per la realizzazione del manufatto mediante l'utilizzo combinato di una macchina utensile a 3 assi CNC e lavorazione per elettroerosione. Per eseguire una prima verifica sperimentale del comportamento a corrosione del Ti3SiC2 in tale ambiente, è stata condotta una campagna sperimentale esponendo campioni del materiale in piombo fluente a 1m/s a 500 °C all'interno della facility CHEOPE III del Centro ENEA del Brasimone.

I risultati hanno confermato il comportamento inerte del composto ternario in suddette condizioni; non si sono riscontrate né formazioni di ossidi superficiali né dissoluzione del materiale nel metallo liquido.

Da ultimo è stata prodotta la girante che dovrà essere testata, nel corso della II annualità, in un'opportuna facility, attualmente in fase di progettazione presso il centro ENEA del Brasimone.

### LP3.D Sviluppo sistemi di purificazione e controllo ossigeno in piombo

I risultati delle attività di ricerca e sviluppo sul controllo della chimica del refrigerante ottenuti su impianti a loop, in ambiente Pb-Bi e in Pb, sono stati analizzati criticamente. Diversi tipi di sensori sono stati testati e validati, sia in Pb-Bi che in Pb, a differenti temperature. Questa esperienza è stata trasferita sull'impianto a piscina CIRCE dove si sta svolgendo un esperimento volto ad implementare tali tecnologie dalla configurazione a loop a quella a piscina. L'impianto sta effettuando studi di concentrazione e diffusione dell'ossigeno nel metallo liquido tramite sensori di profondità. L'esperienza derivante dal suddetto esperimento verrà utilizzata per completare la definizione delle caratteristiche base dei sistemi per la purificazione ed il controllo dell'ossigeno in Pb, in sistemi a piscina rappresentativi del LFR.

Gli esperimenti in corso sopra citati non erano inclusi nel piano realizzativo del primo anno di attività dell'AdP ma riguardano un ulteriore sviluppo delle prove, propedeutiche al grande esperimento ICE inquadrato in un progetto europeo del VI programma quadro Euratom, con modifica del sistema di riscaldamento di CIRCE e la prova di sensori di profondità a diverse temperature e portate di gas gorgogliato.

### LP3.E Specifica di prova e progettazione sezione di prova per l'irraggiamento materiali a contatto col piombo

La geometria della capsula per le prove di thermal annealing è stata definita con maggiore dettaglio, portando ad una variazione del programma sperimentale conseguente alla definizione dei volumi disponibili.

Pertanto, nella configurazione finale saranno esaminati quattro materiali: T 91 anche ricoperto; AISI 316 anche ricoperto; 15-15 Ti e ODS 9Cr.

Le attività dell'obiettivo si sono concluse con la progettazione della sezione di prova e la definizione dettagliata della matrice di prova.

### LP3.F Sviluppo codice di termo fluidodinamica per noccioli a piombo

Nel corso del 2008 è stato sviluppato un modello 3D per la simulazione termofluidodinamica del nocciolo a reticolo aperto di un reattore raffreddato a piombo. In parallelo sono state effettuate simulazioni CFD della termofluidodinamica di metalli liquidi. L'attività è stata completata con la realizzazione di un modello di calcolo specializzato per il reattore LFR di IV generazione e con la sua validazione preliminare a fronte di una simulazione del nocciolo monodimensionale ed a canali indipendenti.

### LP3.G Definizione concettuale nocciolo DEMO LFR e sua integrazione nel sistema primario

Sulla base di differenti ipotesi relative ai limiti tecnologici da assumere, in particolare rispetto alle temperature massime ammissibili per la guaina dell'elemento di combustibile (500, 550 e 600 °C), sono state sviluppate diverse configurazioni di nocciolo di impianto dimostrativo di LFR di IV generazione. Per ciascuna di esse sono stati indicati diametro della pin, passo, altezza attiva, potenza del core e stima del flusso massimo e picco di densità di potenza.

### LP3.H Specifica prova vessel su isolatori sismici e analisi sismiche

L'attività che prevedeva lo sviluppo di analisi sismiche su un modello numerico semplificato relativo ad un sistema del tipo LFR non è stata completata in quanto i dati di ingresso necessari per il suo svolgimento non sono stati resi disponibili. I risultati conseguiti riguardano quindi solamente la seconda parte del programma, ovvero l'effettuazione di analisi sismiche semplificate.

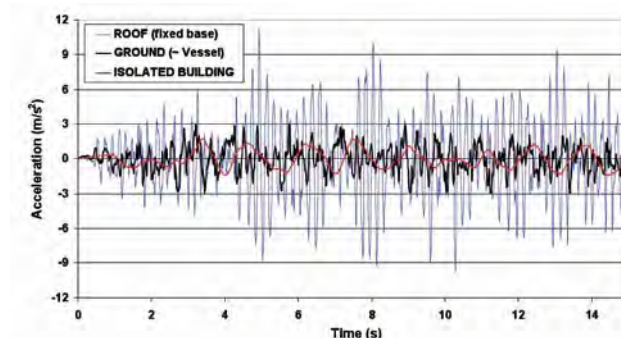


Figura 94. Analisi sismiche. Sistema isolato e non isolato sismicamente



### Attività di supporto allo sviluppo di reattori VHTR

#### LP3.I Calcoli di pre-test e definizione specifiche per prove sull'impianto He-FUS3 per VHTR

Il risultato di questa attività è stato lo sviluppo di un modello numerico dell'impianto He-FUS3 dell'ENEA-Brasimone con il codice termo-idraulico di sistema RELAP5, sulla base di dati sperimentali disponibili. Il modello è stato successivamente utilizzato per l'effettuazione di calcoli di pre-test di alcune prove in regime transitorio, significative per la validazione di codici di calcolo. Sulla base di questi calcoli sono state definite alcune prove possibili. Le analisi di pre-test e le specifiche dei test.

#### LP3.L Effettuazione di prove in regime transitorio su He-FUS3 per VHTR

Scopo della campagna sperimentale era di fornire una base di dati sperimentali attendibili per la validazione dei codici di calcolo termo-idraulici utilizzati per la progettazione e l'analisi di sicurezza dei reattori ad alta temperatura refrigerati a gas (VHTR). Al fine di realizzare le prove previste, sono state progettate e realizzate le necessarie modifiche meccaniche ed elettro-strumentali all'impianto ad elio He-FUS3, sviluppando un sistema di controllo ed acquisizione dati dedicato.

Sono state effettuate prove sia in regime stazionario (procedura di avvio dell'impianto step by step) sia in regime transitorio (simulazione di eventi incidentali). Le prove sperimentali sono state completate nel mese di Marzo 2009, in accordo con i calcoli di pre-test effettuati nel corso del 2008.

#### LP3.M Interpretazione prove per validazione codici per VHTR

L'attività di interpretazione delle prove, effettuata con l'obiettivo di identificare gli sviluppi necessari nel codice da apportare durante il secondo anno dell'AdP e le esigenze di interventi sull'impianto per future campagne sperimentali, è stata completata sulla base delle indicazioni emerse dalla campagna sperimentale oggetto dell'obiettivo LP3-L.

#### LP3.N Simulazioni neutroniche e progettazione set-up TAPIRO per interfaccia coreriflettore VHTR

Nel primo anno di attività sono state portate pienamente a termine le attività progettuali programmate di seguito riassunte:

- Modello Monte Carlo del reattore TAPIRO (Figura 95): costruzione geometria, definizione dei materiali, analisi di criticità, preparazione di un modello equivalente ridotto al vano colonna termica;
- Dimensionamento dei componenti neutronici del sistema: identificazione dei criteri per la transizione da spettro neutronico di fissione a spettro neutronico HTGR, dimensionamento delle scatole di grafite (HTGR termico) e stima dello spettro all'interfaccia uranio/grafite, vuoto/grafite, stima dell'attivazione di foglioline metalliche con reazione a soglia, unfolding dello spettro neutronico al centro di sezioni di prova mediante i dati simulati di attivazione.
- Progettazione sistema di irraggiamento: progettazione e istruzioni assemblaggio dei blocchi per la costruzione della scatola di grafite, progettazione e istruzioni di assemblaggio della sezione di prova in uranio, progettazione e istruzioni di assemblaggio del sistema per l'irraggiamento dei dischi metallici per la misura dello spettro neutronico.

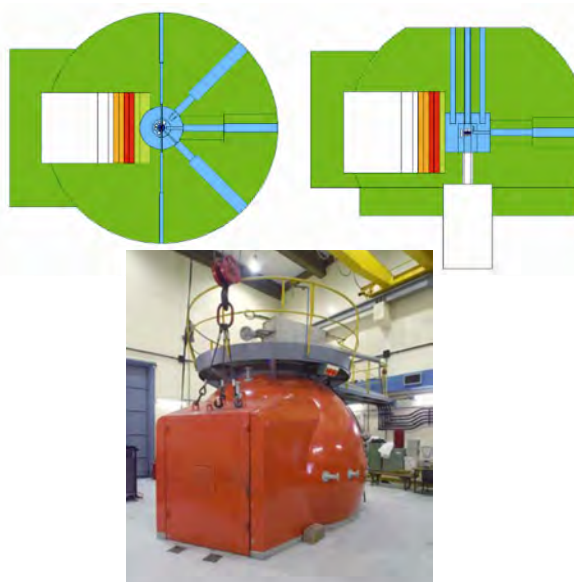


Figura 95. Viste piana e laterale del modello MCNPX del reattore TAPIRO e confronto con il sistema reale

#### **Linea progettuale 4 - 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)**

Gli obiettivi programmatici sul tema dell'individuazione del sito di realizzazione dell'impianto di smaltimento dei rifiuti radioattivi di II categoria e di deposito temporaneo dei rifiuti radioattivi di III categoria, non sono del tutto definiti in quanto fortemente correlati con le scelte di Governo. Gli obiettivi generali della linea sono stati pertanto definiti in generale e su un arco temporale abbastanza lungo, di breve, medio e lungo termine:

- A **breve termine** (0-1 anno): definire la reale ed oggettiva situazione italiana attraverso una revisione dell'ingente lavoro svolto in passato dai vari soggetti interessati (in particolare l'ENEA); eseguire studi e ricerche preliminari ed avviare alcune attività propedeutiche alla progettazione, realizzazione ed esercizio del deposito, con il grado di approfondimento possibile in questo stadio.
- A **medio termine** (1-3 anni): fornire, sulla base delle attività avviate o definite nel breve termine, i servizi scientifici e tecnologici volti, in generale, a Performance Assessment, Valutazione di Impatto Ambientale, allo studio di scenari ed alle analisi territoriali, 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 Emergenze, alla Comunicazione, alla Formazione, ecc..
- Nel **lungo termine** (oltre 3 anni): completamento delle attività avviate nel breve e medio termine, messa a disposizione delle competenze sviluppate per la definizione, in collaborazione con le Autorità Competenti, dei criteri di progetto, del "Progetto di Massima" ed il "Rapporto preliminare di Sicurezza", la normativa tecnica, le 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, la gestione dell'inventario radiologico, l'elaborazione dei piani di conferimento, l'elaborazione di piani di security e risposta alle emergenze, l'elaborazione delle procedure chiusura, di sorveglianza a lungo termine e di rilascio del sito, ecc.

Le tematiche principali individuate in via preliminare sono state:

- 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, ecc.);
- Trasporto e deposito dei rifiuti;
- Problematiche di Security;
- Comunicazione e Informazione.

##### **LP4.A Supporto al processo decisionale**

Per quanto riguarda il supporto tecnico al Gruppo di Lavoro D.M. 25 Febbraio 2008 del MSE, occorre osservare che non c'è stato un coinvolgimento dell'ENEA nella dimensione prevista e quindi una parte delle risorse previste per questo obiettivo è stata spostata in altri obiettivi. Il GdL Stato-Regioni ha in sostanza chiesto solo la collaborazione di due esperti ENEA per due sottogruppi a cui ha affidato lo studio di tematiche specifiche:

- Sottogruppo 1: "Centro Servizi" – individuazione della natura e tipologia delle infrastrutture da realizzare nel Centro, sia quelle relative al deposito sia quelle in grado di conferirgli il carattere di un Parco Tecnologico, sede di attività tecnico-scientifiche multidisciplinari.
- Sottogruppo 3: "Legislazione e Normativa" - Individuazione del regime di responsabilità nella varie fasi previste, stima economica dei costi di realizzazione, suggerimenti di riordino della normativa sui rifiuti nucleari.

##### **LP4.B Stato dell'arte su studi e ricerche svolti in Italia**

Grande rilevanza ha avuto l'esame delle esperienze messe in atto a livello europeo ed internazionale e la raccolta e l'analisi delle informazioni e della documentazione relative agli studi e ricerche fino ad oggi effettuate in Italia dai vari soggetti interessati (MSE, Conferenze Nazionali, Gruppi di Lavoro, ENEA, SOGIN, APAT ecc.). La raccolta delle



informazioni e della documentazione ha presentato molto più impegno del previsto sia per la grande mole di materiale disponibile, in gran parte prodotto dall'ENEA, sia perché il materiale non sempre era archiviato adeguatamente. E' stato comunque ricostruito un elenco della documentazione prodotta e si è provveduto a raccogliere i documenti più significativi in un archivio sia cartaceo sia (laddove possibile e ritenuto utile) informatico. In parallelo è stata effettuata un'analisi critica di una parte della documentazione ritenuta più significativa al fine di valutare le eventuali necessità di aggiornamento.

In particolare:

- E' stata fatta una disamina, sia dal punto di vista normativo sia operativo, della situazione internazionale e italiana in relazione a decommissioning degli impianti nucleari dismessi e relativa gestione dei rifiuti radioattivi. Sono state individuate le problematiche connesse allo smaltimento dei rifiuti radioattivi, le scelte operate a livello internazionale ed europeo ed il percorso attualmente in atto in Italia per la scelta di un sito per la localizzazione di un deposito di smaltimento di rifiuti radioattivi a bassa e media attività e per lo stoccaggio temporaneo dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita.
- Anche se lo smaltimento geologico delle scorie radioattive a lunga vita non rappresenta strettamente l'oggetto della presente linea progettuale, si è ritenuto opportuno ricordare le attività svolte dall'ENEA in tale ambito, tra il 1976 ed il 1991. I risultati di tali ricerche rappresentano, infatti, un vasto patrimonio di conoscenze che altrimenti potrebbero risultare disperse nel tempo; in tal modo saranno, comunque, fruibili qualora il nostro Paese dovesse optare per una soluzione di questo tipo nel prossimo futuro per i rifiuti ad alta attività e lunga vita per i quali, nel sito nazionale, si prevede solo il deposito temporaneo.
- E' stata effettuata un'analisi critica del Rapporto del Gruppo di Lavoro sulle Condizioni per la Gestione in Sicurezza dei Rifiuti Radioattivi (Accordo Stato-Regioni del 4 Novembre 1999), noto agli addetti ai lavori come "Commissione Cenerini", notando che per molti aspetti è ancora straordinariamente attuale.
- E' stata effettuata una disamina delle attività effettuate tra il 1996 e il 2003 dalla Task Force ENEA e dal Grande Servizio Paese Sito ENEA, individuando e analizzando anche i documenti tecnico-scientifici e le iniziative più significative prodotti nel periodo.

#### **LP4.C Aggiornamento dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi e modalità di gestione futura**

L'ultimo "Inventario Nazionale dei Materiali Radioattivi" prodotto dall'ENEA risale all'anno 2000; da allora l'unico inventario disponibile è quello effettuato istituzionalmente dall'ISPRA (ex APAT) a fini di sicurezza. L'ISPRA raccoglie le informazioni fornite dagli esercenti in un apposito data base in grado di presentare i dati in termini di volumi, di massa, di attività e di stato fisico. Tuttavia l'ISPRA non effettua, in quanto non è di sua competenza, l'elaborazione dei dati ai fini dello stoccaggio definitivo, ma tiene solo aggiornata una "fotografia" dell'esistente. Non essendo ancora stato individuato, a livello nazionale, l'attore responsabile della elaborazione e gestione dell'inventario ai fini della progettazione del deposito, è stato raggiunto un accordo di reciproco interesse tra ISPRA ed ENEA per l'elaborazione da parte ENEA dei dati a tale scopo, così come richiesto dal MSE nell'ambito dell'Accordo di Programma. Nell'ambito di questo accordo i dati di inventario dei rifiuti radioattivi esistenti raccolti da ISPRA sono stati messi a disposizione dell'ENEA. Partendo da questi dati, l'ENEA ha provveduto ad elaborarli, sulla base di ipotesi di condizionamento (laddove non già condizionati), al fine di pervenire all'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 provenienti dagli esercenti sia su stime fatte in proprio.

#### **LP4.D Attività relative alla caratterizzazione dei rifiuti da conferire al deposito**

Si è provveduto all'elaborazione di procedure di massima per la caratterizzazione radiologica e chimico-fisica dei rifiuti radioattivi e di criteri operativi preliminari per l'accettabilità al deposito, identificando anche le tecniche distruttive e non distruttive più idonee e la migliore strumentazione attualmente disponibile sul mercato. Inoltre è stata effettuata una definizione concettuale dell'insieme integrato di infrastrutture, tecnologie e servizi necessari per la caratterizzazione dei rifiuti radioattivi ai fini del conferimento al deposito.

#### **LP4.E Analisi propedeutiche alla progettazione del deposito**

Sono state definite e analizzate le azioni propedeutiche alla progettazione dell'impianto di smaltimento, del quale sono stati individuati, in via preliminare, i criteri di progetto derivati dai requisiti di sicurezza stabiliti dalla IAEA. Sono stati anche identificati gli studi da effettuare (e parzialmente già effettuati in passato) relativi a scenari, analisi territoriali, performance assessment, specifiche di accettabilità dei rifiuti nel deposito, elementi socio-

economici, sicurezza dell'installazione, quadro normativo e di radioprotezione, migrazione dei nuclidi, livelli di sicurezza da garantire nel medio e lungo termine, implicazioni territoriali ed ambientali.

In tale ambito è stato fortemente coinvolto il Politecnico di Milano, nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione tra ENEA e CIRTEN, per l'avvio di studi per la modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive del deposito e di una metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso.

Un ulteriore contributo di approfondimento è stato fornito dall'Università la Sapienza di Roma in relazione alle problematiche di caratterizzazione dei siti e relativi criteri di progettazione dei depositi, con analisi dei principali processi di rilascio e migrazione dei radionuclidi.

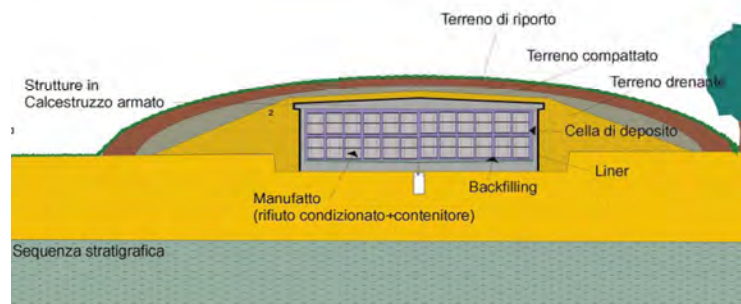


**Figura 96. Configurazione di un deposito superficiale**

#### **LP4.F Linee guida per il trasporto e il deposito dei rifiuti**

Obiettivo di questa task era uno studio preliminare relativo alle problematiche inerenti il trasporto dei rifiuti condizionati dai siti di produzione al deposito nazionale. Sono state identificate le soluzioni tecniche per il trasporto dei rifiuti radioattivi a “bassa attività” (I e II Categoria) al deposito definitivo e per il trasporto dei rifiuti ad “alta attività” e “lunga vita” (III Categoria) allo stoccaggio temporaneo. Si segnalano l’acquisizione e le prove preliminari di un software della IAEA per la valutazione degli indici di rischio relativi ad un trasporto nucleare.

#### **LP4.G Linee guida per la security**

Sulla base dell’esperienza internazionale e con riferimento a documenti di indirizzo emessi da organismi internazionali qualificati (IAEA, OECD-NEA, UE) sono state identificate, in via preliminare, le problematiche di “Security” correlate con il deposito dei rifiuti radioattivi e le relative soluzioni tecniche e procedurali da sviluppare.

#### **LP4.H Linee guida per comunicazione, informazione e formazione**

Sulla base dell’esperienza internazionale e con riferimento a documenti di indirizzo emessi da organismi internazionali qualificati (IAEA, OECD-NEA, UE) sono proposte le linee guida per la definizione di un piano di azioni per informare, coinvolgere ed ottenere il consenso del pubblico.

L'obiettivo non è stato quello di esaurire l’argomento o definire un piano di dettaglio, ma piuttosto di evidenziare la complessità del problema e la necessità di pianificare e attuare strategie adeguate coinvolgendo varie tipologie di esperti e tutti i portatori di interesse in qualche modo coinvolti nella scelta del sito e nella realizzazione del deposito.

L'argomento è stato sviluppato anche dal CIRTEN ed esteso anche alla problematica della formazione necessaria per gli addetti ai lavori.

### **PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI**

L’impegno del **Consorzio CIRTEN** per lo sviluppo del programma di ricerca concordato e coordinato con quello dell’ENEA, comprende tutta l’attività svolta presso le seguenti Università consorziate: Politecnici di Milano e Torino e le Università di Palermo, Pisa, Roma I (La Sapienza) e Bologna. Le attività svolte nell’ambito di differenti obiettivi afferente alle diverse linee sono sintetizzate nel seguito.

Relativamente alla *Linea progettuale 1*, contestualmente e ad integrazione degli studi condotti da ENEA, sono state eseguite delle analisi riferendosi ad un modello semplificato di scenario assumendo come riferimento il Belgio. Lo scopo era quello di testare le metodologie ed acquisire la consapevolezza dell'importanza di tali analisi soprattutto nella fase di studio per l'impiego di reattori di nuova generazione. Le analisi effettuate hanno fornito gli elementi necessari per un successivo studio che abbia come riferimento uno scenario nazionale.

Il CIRTEN ha inoltre messo a punto un modello per l'analisi degli schemi di investimento per il deployment di reattori nucleari. Il modello realizzato risulta utile per la comparazione tra reattori di piccola-media taglia (SMRs) e reattori di grossa taglia (LRs) e permette di simulare la profitabilità differenziale dei SMRs in riferimento a varie condizioni sia del mercato che di tipo operativo.

Nella *linea progettuale 2* il CIRTEN si è concentrato su attività di R&S a supporto della prova integrale e dello sviluppo di componenti (GV, downcomer e condensatore immerso di EHRS) del reattore IRIS. L'Università La Sapienza ha condotto analisi neutroniche su reattori PWR avanzati con lunghi cicli di irraggiamento.

Nel quadro della linea progettuale 3 ha contribuito allo sviluppo di entrambi i reattori di IV generazione, ovvero l'LFR e il VHTR e per finire nella linea progettuale 4 ha svolto attività nell'ambito dell'obiettivo relativo "Analisi propedeutiche alla progettazione del deposito" che comprendeva in generale l'identificazione e l'avvio degli studi da effettuare relativamente a scenari, analisi territoriali e performance assessment; valutazione di elementi socio-economici, di sicurezza dell'installazione, di quadro normativo e di radioprotezione, di migrazione dei nuclidi, di implicazioni territoriali ed ambientali.

Il lavoro di **SIET** ha riguardato un'attività di ricerca relativa alla linea progettuale 2 "Reattori evolutivi INTD-International Near Term Deployment- Prova Integrale IRIS", avente per oggetto la progettazione ed esecuzione di lavori preparatori per la realizzazione di un simulatore sperimentale del reattore IRIS. Le azioni svolte hanno riguardato nello specifico:

- Progettazione concettuale facility SPES-3

La progettazione concettuale della facility SPES-3 è stata completata con l'emissione del documento "Conceptual design of SPES3-IRIS Facility". L'attività ha condotto alla definizione preliminare delle dimensioni dei componenti dell'impianto SPES3 e della loro configurazione impiantistica, oltre all'individuazione della strumentazione necessaria per la conduzione delle prove e l'acquisizione dei dati sperimentali.

- Piano della Qualità

L'attività in oggetto è stata completata con l'emissione del relativo documento "Quality Plan of IRIS SPES-3 Project". L'attività è consistita nella definizione del Piano della Qualità, ovvero le procedure della Garanzia della Qualità specifiche per l'esecuzione delle prove integrali sull'impianto sperimentale SPES-3 con riferimento a: organizzazione del Progetto, modalità di gestione della documentazione, modalità di controllo delle varie fasi del Progetto.

- Analisi di pre-test

L'attività ha riguardato lo sviluppo del modello numerico dell'impianto SPES-3 per il codice RELAP5 e l'esecuzione di n. 5 simulazioni su transitori di riferimento. I lavori hanno richiesto tempi più lunghi di quanto inizialmente previsto a causa delle variazioni delle specifiche di progetto intervenute in corso d'opera. Tali variazioni hanno riguardato sia la geometria dei componenti (volumi del contenimento e del sistema primario, elevazioni dei vari componenti) sia le procedure di regolazione e controllo del prototipo di riferimento ed hanno comportato diverse revisioni del modello numerico e rifacimenti dei calcoli

- Progettazione esecutiva facility SPES3 con esclusione del canale centrale

L'attività aveva lo scopo di definire la configurazione complessiva dell'impianto SPES-3 sviluppando il progetto esecutivo ed il dimensionamento dei componenti, incluso il sistema di controllo e rilevazione dati. I lavori sono iniziati nell'aprile 2008 e si sono conclusi a marzo 2009.

L'attività in oggetto, alla pari di quella dell'obiettivo n. 3, ha richiesto tempi più lunghi del previsto causa la necessità di iterate revisioni del progetto conseguenti alle già citate variazioni delle specifiche di input. Le attività hanno riguardato i seguenti specifici temi:

- progettazione dei serbatoi di simulazione del contenimento e definizione delle specifiche tecniche per la costruzione;
- calcoli per la definizione delle specifiche tecniche per l'acquisto delle valvole (di regolazione, sicurezza, isolamento, ecc.);

- valutazioni per la definizione delle specifiche tecniche della strumentazione di prova, del sistema di regolazione/controllo dell'impianto e del sistema di acquisizione dati della strumentazione di prova.
- conduzione di verifiche e valutazioni tecnico-economiche con i vari fornitori dei materiali meccanici ed elettrostrumentali.
- Elaborazione di disegni di dettaglio e data sheet.

▪ Rimozione impianti esistenti e predisposizione aree

Per questo obiettivo, concernente la progettazione e predisposizione del sito per la realizzazione dell'impianto SPES-3, la SIET ha effettuato le seguenti principali attività:

- studio dell'installazione dell'impianto SPES-3 sulla struttura esistente dell'impianto SPES-2;
- definizione delle specifiche tecniche per la rimozione della coibentazione e lo smantellamento dell'impianto SPES-2;
- valutazioni relative alla sistemazione dell'impianto SPES-3 su una nuova struttura portante;
- progettazione esecutiva della struttura portante ed elaborazione della specifica tecnica;
- definizione dei sistemi e componenti da rimuovere;
- verifiche varie con i potenziali fornitori delle prestazioni d'opera richieste.

▪ Realizzazione impianti ausiliari: prima fase

Il lavoro eseguito ha riguardato principalmente attività propedeutiche all'installazione di un interruttore elettrico da 130 kV e relativi accessori per potenze fino a 10 MW, da utilizzarsi per le prove sull'impianto SPES-3, in particolare:

progettazione preliminare della nuova sottostazione elettrica ad alta tensione;

- verifica della fattibilità con le varie organizzazioni coinvolte: ENEL/TERNA per la fornitura di energia elettrica e Edipower (proprietario del sito e gestore di una parte delle attrezzature);
- verifiche tecniche e valutazioni economiche con i diversi potenziali fornitori;
- progettazione delle modifiche alla sottostazione elettrica;
- emissione degli ordini dei componenti.

▪ Progettazione canale centrale

L'attività commissionata riguarda la progettazione meccanica di tutti i componenti del canale centrale secondo le PED (*Pressure Equipment Directive*), la verifica di fattibilità costruttiva delle parti più critiche, l'elaborazione dei disegni del vessel con particolari costruttivi dei bocchelli e delle flange e della specifica tecnica e la definizione della sequenza di montaggio dei componenti.

Le attività LP3.A e LP3.B, riguardanti la progettazione concettuale di un sistema prototipico per la rimozione del calore residuo (DHR) del LFR, si sono sviluppate avvalendosi del contributo della **DEL FUNGO GIERA ENERGIA S.p.A**, in quanto detentrici del know-how sullo scambiatore DHR da cui verrà derivato il simulacro da sottoporre alla sperimentazione prevista nell'impianto CIRCE dell'ENEA Brasimone. In particolare la DEL FUNGO ha definito le prove necessarie per la qualifica del componente, attraverso la specifica di prova e la matrice dei test, e ha progettato il simulacro di scambiatore DHR. In definitiva la DEL FUNGO GIERA ENERGIA S.p.A ha predisposto:

1. Il disegno meccanico preliminare del DHR;
2. I calcoli di dimensionamento meccanico del DHR;
3. I calcoli di dimensionamento funzionale del DHR;
4. La specifica di prova del DHR prototipico.

## Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative

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 40.000 ore, dai valori attuali di 10.000-20.000) e la riduzione di costi (obiettivo 1.000-2.000 €/kW, rispetto ai 5.000-10.000 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.

Le celle a combustibile rappresentano, nel medio-lungo termine, una delle tecnologie avanzate 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'Italia ha una presenza importante in questo settore, sia a livello di ricerca e sviluppo che a livello industriale. In particolare, per quanto riguarda le aziende italiane:

- Ansaldo Fuel Cells sta sperimentando sistemi con celle a carbonati fusi da 125-500 kW e prevede di realizzare nei prossimi anni impianti da alcuni MW per cogenerazione in ambito industriale, con diverse tipologie di combustibili;
- Exergy Fuel Cells sta sviluppando, anche in collaborazione con altre aziende (ad es. ICI Caldaie), sistemi con celle ad elettrolita polimerico da qualche kW a qualche decina di kW per generazione distribuita/cogenerazione, alimentati a gas naturale o idrogeno;
- SOFCPower sviluppa stack e sistemi da qualche kW con celle ad ossidi solidi, alimentati a gas naturale (anche in collaborazione con aziende come MTS).

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.

### DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività condotte per 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, sia per le celle a carbonati fusi (MCFC) che per quelle ad elettrolita polimerico (PEFC), la riduzione del costo di produzione dei componenti, l'aumento della flessibilità nell'uso dei combustibili (con l'impiego del biogas) e l'aumento dell'efficienza dei sistemi. Sono inserite inoltre nel programma alcune attività di supporto ai Ministeri per le collaborazioni internazionali nei settori dell'idrogeno e delle celle a combustibile e la partecipazione dell'ENEA alle stesse.

Gli obiettivi previsti per il primo anno per le tre linee sono riportati sinteticamente nel seguito:

#### **Sistemi con celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC)**

##### **A. Studio, sviluppo e realizzazione di matrici per MCFC con la tecnologia di formatura in plastico e allestimento di una linea di produzione industriale**

L'obiettivo prevede lo sviluppo di un processo di produzione delle matrici dell'elettrolita per celle MCFC basato su tecnologie di formatura utilizzate nel campo delle materie plastiche, come alternativa più economica e a minore impatto ambientale della colatura su nastro, impiegata attualmente. Il processo sviluppato va utilizzato, dopo le opportune verifiche, per la progettazione e realizzazione di una linea di fabbricazione dei componenti.

##### **B. Studio, sviluppo e realizzazione di un dispositivo innovativo, da utilizzare per prove di condizionamento dei componenti prodotti, e prova dei componenti stessi in cella**

L'attività è finalizzata alla progettazione e realizzazione di un dispositivo elettrochimico dedicato alla caratterizzazione delle matrici prodotte con la tecnologia di formatura delle materie plastiche, al fine di individuare i parametri ottimali del ciclo di condizionamento al quale le matrici vengono sottoposte in cella per eliminare gli additivi organici impiegati e conferire alle stesse le caratteristiche fisico-dimensionali necessarie. Il dispositivo sarà adeguatamente strumentato e attrezzato per la raccolta ed elaborazione dei dati sperimentali e potrà lavorare in diverse condizioni di compressione, variabili in funzione dei parametri termofisici del processo. Analisi termogravimetriche, chimico-fisiche e microstrutturali verranno utilizzate per progettare le prove di condizionamento e controllare i risultati ottenuti.

##### **C. Ottimizzazione del processo di digestione anaerobica di reflui zootecnici e studi preliminari per la produzione di idrogeno dagli stessi; studio di nuove formulazioni dei componenti di cella MCFC più resistenti alle impurezze a base di zolfo e prova in monocella di gas simulante quello prodotto da digestione anaerobica**

La tematica dell'alimentazione delle celle a carbonati con gas derivante da digestione anaerobica comprende attività finalizzate alla ottimizzazione del processo di digestione anaerobica a metano di reflui zootecnici (aumento della resa energetica e diminuzione delle impurezze) e allo studio di sistemi di clean up del biogas e di processi per la produzione diretta di idrogeno dai reflui stessi; comprende inoltre lo studio dei meccanismi di avvelenamento della cella da parte delle impurezze a base di zolfo, attraverso prove in monocella, e lo sviluppo di nuovi componenti di cella più tolleranti allo zolfo.

##### **D. Progettazione e realizzazione del potenziamento dell'impianto per la simulazione del comportamento del sistema cella MCFC/turbina**

L'obiettivo prevede il potenziamento di una postazione di testing per la messa a punto di turbine da integrare in impianti a celle combustibile a carbonati fusi (sistemi ibridi) che, nell'ambito di un progetto FISIR finanziato dal MUR, si sta realizzando nel centro ENEA della Casaccia, con l'obiettivo di studiare e mettere a punto turbine per sistemi ibridi da qualche centinaio di kW. L'evoluzione del prodotto al momento attuale sta spingendo verso sistemi a maggiore potenza, dell'ordine di qualche MW. Si è quindi manifestata l'esigenza di poter ampliare la gamma di potenze delle turbine da poter testare nella detta postazione (da 100 a 500 kW).

#### **Sistemi con celle a combustibile ad elettrolita polimerico (PEM)**

##### **E. Progettazione e realizzazione di una stazione di prova e installazione di un sistema da 5 kW, valutazione di tecnologie diverse per la realizzazione dei componenti di cella e caratterizzazione di diverse tipologie di catalizzatori per la riforma di vari combustibili**

Nel settore delle celle ad elettrolita polimerico l'obiettivo dell'industria in questa fase è quello di mettere sul mercato prodotti "preserie", per arrivare solo successivamente ad una ottimizzazione completa in circa tre-quattro anni. In questo quadro si collocano le attività proposte, che verranno svolte in prevalenza dall'ENEA, a cui l'industria metterà a disposizione dei prototipi di sistemi di cogenerazione di taglie diverse (5-30 kW).

In particolare l'obiettivo prevede la progettazione e realizzazione della postazione di prova per un sistema di cogenerazione da 5 kW<sub>el</sub> e l'acquisizione e installazione dello stesso; la valutazione, con prove e caratterizzazioni in laboratorio, di tecnologie diverse, di impiego corrente in ambito industriale, per la realizzazione dei componenti di cella (elettrodi, catalizzatori, assemblati membrana/elettrodi (MEA), piatti bipolari); la caratterizzazione di diverse tipologie di catalizzatori per la riforma di vari combustibili e la purificazione dei gas prodotti, mediante un sistema di reattori da laboratorio.

### Supporto ai Ministeri e collaborazioni internazionali

**F. Supporto a MSE e MATT per la partecipazione a progetti internazionali e per la realizzazione di una road map italiana per idrogeno e celle a combustibile; partecipazione dell'ENEA alle collaborazioni internazionali nel settore.**

In questo ambito è previsto che l'ENEA fornisca ai Ministeri il supporto tecnico-scientifico necessario sia per la definizione di una roadmap nazionale nel settore dell'idrogeno e delle celle a combustibile che per le collaborazioni internazionali che coinvolgono i Ministeri stessi (come la International Partnership for Hydrogen Economy, IPHE, promossa dall'US DOE). E' previsto inoltre un rafforzamento della presenza dell'ENEA, e di altre strutture nazionali, nell'ambito degli Implementing Agreements dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) riguardanti le tematiche delle celle a combustibile e dell'idrogeno.

### **RISULTATI DELL'ATTIVITÀ**

*Sistemi con celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC)*

#### **A. Studio, sviluppo e realizzazione di matrici per MCFC con la tecnologia di formatura in plastico e allestimento di una linea di produzione industriale**

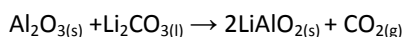
Il processo di formatura in plastico che si intende sviluppare comprende le fasi seguenti:

- Individuazione dei componenti della ricetta di partenza (tipo e percentuali delle polveri ceramiche e dei polimeri);
- Miscelazione in turbo miscelatore (con definizione dei parametri quali velocità, temperatura, tempo, sequenza di aggiunta dei componenti);
- Passaggi in estrusore per la realizzazione del compound (granulato plasto-ceramico altamente caricato di polimero);
- Stampaggio del compound con pressa a iniezione per produrre semilavorati da sottoporre a pressatura a caldo per ottenere matrici prototipali.

La fase finale di stampaggio e pressatura, utilizzata nello sviluppo del processo, dovrà essere sostituita da opportune attrezzature per la estrusione su lastra nella linea di produzione industriale. Le attività svolte, e i risultati ottenuti, vengono descritti nel seguito.

#### Messa a punto del processo di sintesi di polvere di Litio Alluminato in fase gamma

Il materiale impiegato per la fabbricazione delle matrici è il gamma alluminato di litio ( $\gamma$ -LiAlO<sub>2</sub>). Nell'ambito delle attività era previsto che, accanto all'impiego come materiale di partenza di polveri commerciali di  $\gamma$ -LiAlO<sub>2</sub>, venisse studiato e messo a punto un processo per la produzione delle stesse polveri in Italia. A tal fine è stato individuato e sviluppato un processo di sintesi in scala laboratorio (1,5 kg/settimana), prestando particolare attenzione alla economicità, scalabilità e più in generale alla sostenibilità dello stesso, nell'ottica di una successiva industrializzazione. Il processo è basato sulla seguente reazione, che avviene a circa 900 °C:



Le caratteristiche delle polveri ottenute, in termini di purezza (>95% di fase  $\gamma$ ) e granulometria, sono in linea con quelle richieste per la produzione di matrici (miscela di polveri di  $\gamma$ -LiAlO<sub>2</sub> a granulometria fine - HSA, circa 2 micron, e grossolana - LSA) (Figura 97).

Il costo delle materie prime è dell'ordine di 10 €/kg, a fronte di un costo commerciale del prodotto di 60 €/kg; tali valori sono raggiungibili solo realizzando, sulla base del processo sviluppato, una linea di produzione industriale.



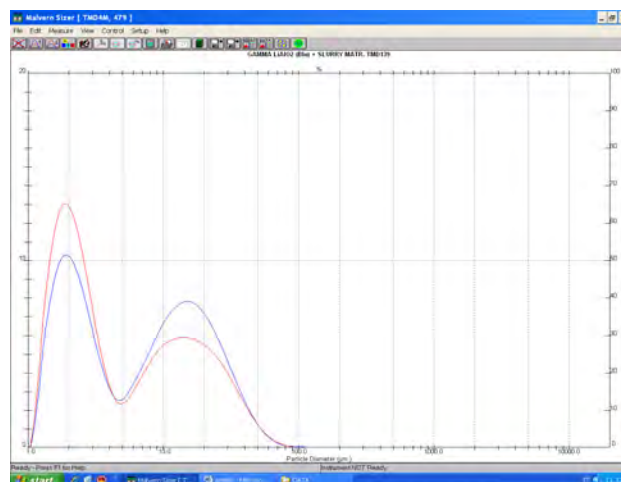


**Figura 97. Analisi di granulometria laser su polvere USA miscela HSA+LSA per slurry matrice tradizionale (in rosso) e confronto con polvere FN tipo miscela HSA+LSA (in blu)**

#### Adeguamento delle attrezzature esistenti

Sulla base di prove preliminari del processo sono state individuate alcune modifiche da apportare alle attrezzature disponibili presso FN per la realizzazione del granulato plasto-ceramico e per la produzione con lo stesso di matrici prototipali da sottoporre a caratterizzazione. In particolare, la necessità di operare a temperature più elevate del previsto (150-230 °C) per assicurare una maggiore omogeneità e fluidità del granulato, ha richiesto la realizzazione di un sistema di riscaldamento/ raffreddamento della linea di estrusione del compound e l'impiego di componenti compatibili con le dilatazioni termiche (Figura 98).



**Figura 98. Impianto di estrusione per compound collegato al nuovo sistema di raffreddamento**

Sono state inoltre modificate e rimesse in funzione una pressa ad iniezione per realizzare i semilavorati in plasto-alluminato di litio ed una pressa uniaassiale per la realizzazione di campioni di matrici, a partire dai semilavorati stessi; in particolare, gli interventi su quest'ultima (circuiti di condizionamento termico dello stampo, configurazione dello stesso, sistema idraulico) hanno consentito di migliorare sensibilmente la ripetibilità delle caratteristiche dei prodotti ottenuti.

#### Messa a punto del processo di formatura in plastico

Sono state studiate e messe a punto, con successive modifiche ed affinamenti, le diverse fasi del processo, dalla realizzazione del compound (parte molto critica per la carica ceramica molto elevata, 55-70% in peso), alla sua estrusione e alla realizzazione di matrici prototipali. Dopo alcune prove preliminari con diverse composizioni del compound, sono state individuate e realizzate le modifiche da fare alle attrezzature (di cui al punto precedente) e realizzate nuove mescole ceramico-polimero, che sono state anche utilizzate per prove su un impianto industriale

di estrusione su lastra, producendo lastre di dimensioni 700x1.000 mm, con spessori variabili da 0,40 a 0,50 mm (Figura 99). Le caratterizzazioni e le prove effettuate in forno hanno fatto emergere la necessità di un'ulteriore



**Figura 99. Estrusione delle lastre a base di plasto-ceramico (su base PE)**

revisione della mescola, portando a nuove ricette, realizzate variando sia le percentuali che la tipologia del polimero e tenendo conto dell'influenza dello stesso sulla manipolabilità e integrità delle matrici, sul comportamento durante il condizionamento e sulle caratteristiche finali di densità del verde e di porosità dopo il burn-out del polimero.

Con le nuove mescole sono stati prodotti lotti di matrici, utilizzando le attrezzature disponibili presso FN (stampa a iniezione con successiva pressatura uniassiale a caldo) e giungendo della definizione della mescola ottimale (in termini di percentuale di carica ceramica, tipologia e granulometria della polvere, percentuale e tipologia dei componenti organici, modalità di miscelazione ed estrusione). Con tale mescola (>70% di carica ceramica con miscela di organici - polipropilene, lubrificante, elastomero poliolefinico - in diverse proporzioni) sono stati prodotti lotti da decine di kg al fine di verificare la ripetibilità del processo nelle varie fasi e sono state ottenute matrici di dimensioni pari a 170 mm di diametro e spessori variabili tra 0,25 e 0,50 mm, impiegate per le caratterizzazioni fisico strutturali. Completata la definizione dei parametri di processo, sono state realizzate le matrici (stesso diametro, spessore 0,25 mm) da utilizzare per le caratterizzazioni funzionali in monocella e stack (obiettivo B).

#### Caratterizzazione delle polveri, dei prodotti intermedi e delle matrici

Le polveri di  $\gamma\text{-LiAlO}_2$  sintetizzate in FN sono state sottoposte, anche con il supporto dell'Università degli Studi di Genova, alle caratterizzazioni seguenti: diffrazione a raggi X (anche a cella calda), morfologia SEM e microanalisi EDS, densità ad elio e porosità (intrusione di mercurio), area superficiale specifica (B.E.T.), granulometria laser.

In parallelo si è proceduto alla caratterizzazione dei compound e delle matrici realizzate al punto precedente e al confronto delle caratteristiche di queste ultime con quelle delle matrici prodotte per colatura su nastro.

Per i vari lotti di compound sono stati determinati, oltre alle caratteristiche dei prodotti di partenza, la densità, la percentuale di perdita in peso (al fine di verificare il residuo dopo bruciamento della parte organica) e il contenuto di umidità. Inoltre, particolare attenzione è stata dedicata alle caratteristiche reologiche, che rivestono grande importanza per il processo e che sono critiche, vista l'elevata carica ceramica del compound; in collaborazione con il CESAL è stato determinato l'indice di fluidità sia del polimero di base che del compound sviluppato e sono state poi valutate le curve reologiche del compound finale.

Le caratterizzazioni effettuate sulle matrici prodotte nelle varie fasi di sviluppo del processo (indagini visive e al microscopio per verificarne integrità e difettologia, rilievi dimensionali, determinazione della densità geometrica e

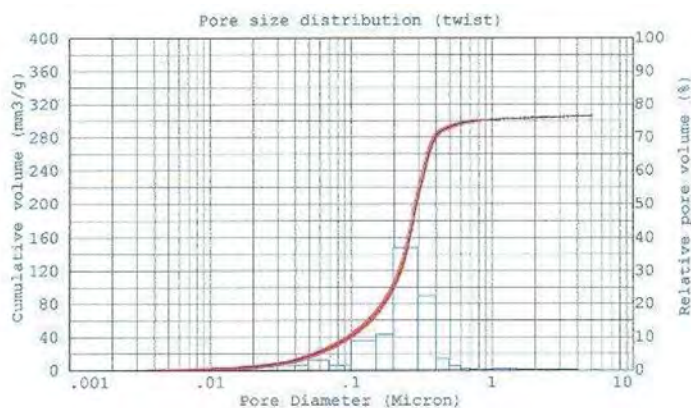


**Figura 100. Porogramma relativo a matrice ottenuta via estrusione: diametro medio dei pori 0.25 mm e percentuale di porosità attorno al 52%**

sua distribuzione, porosimetria dopo cicli di burn-out, analisi morfologiche al microscopio elettronico a scansione e analisi EDAX per eventuali inquinanti) hanno consentito, attraverso il confronto con le caratteristiche delle matrici ottenute per colatura su nastro, di indirizzare le prove sperimentali e procedere nella messa a punto del processo stesso. Le matrici prodotte nella fase finale della attività presentano valori della percentuale di porosità aperta e di diametro dei pori in linea con quelli delle matrici colate (porosità prossima al 60% e diametro medio dei pori inferiore a 0,5 micron) (Figura 100).

Inoltre le matrici a base plastica risultano più resistenti di quelle colate, sia in fase di verde che dopo burn-out.

### Realizzazione di matrici di taglia industriale

Sulla base dei risultati ottenuti nello sviluppo del processo, si è effettuata una prima valutazione delle attrezzature necessarie per la realizzazione delle matrici in plastico con la tecnologia dell'estrusione, contattando diversi fornitori per una prima valutazione della fattibilità e degli investimenti necessari. L'elevata originalità del prodotto da ottenere (estremamente caricato e dalle specifiche molto restrittive in termini di spessore e porosità) ha reso necessaria la progettazione di attrezzature ad hoc e/o di modifiche da apportare ad altre di tipo commerciale, sulla base dell'esperienza fatta, anche con impianti industriali di estrusione su lastra per materiali termoplastici tradizionali, durante la messa a punto del processo. Le principali componenti della linea individuate e acquisite/modificate sono le seguenti:

- estrusore monovite Toscana con vite da 80 cm e lunghezza pari a 26 diametri;
- testa piana di estrusione LP 1200/1500 con labbro flessibile regolabile da 0,3 a 3 mm, con resistenze elettriche di riscaldamento suddivise in 5+2 zone;
- calandra a tre cilindri verticale con cilindri di diametro 200 mm;
- traino a due cilindri gommati (diametro 250 mm);
- taglierina manuale.

Per il completamento della linea sono state progettate e realizzate, direttamente in officina FN, attrezzature accessorie (manicotto di collegamento estrusore/testa piana, sistema di supporto della testa, guide a pavimento); inoltre, sono stati effettuati interventi di adeguamento degli impianti elettrico, idraulico e dell'aria compressa. Le attrezzature sono state collaudate.

Lo schema della linea e le attrezzature principali sono riportate nella Figura 101.

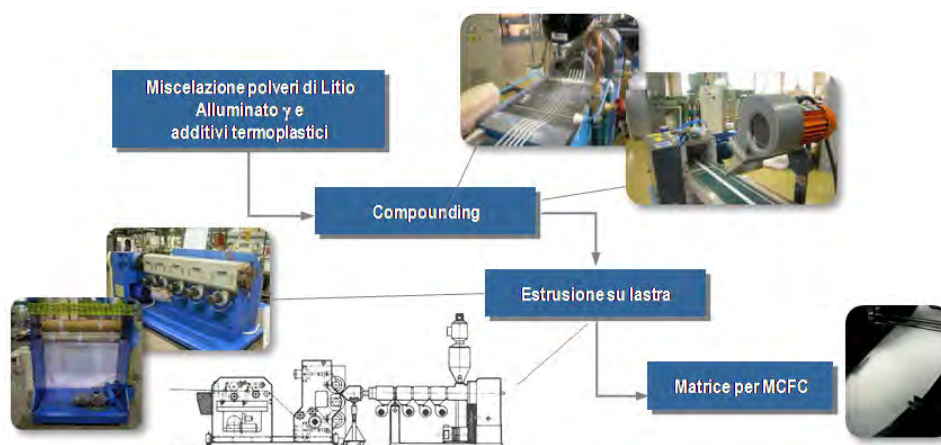


**Figura 101. Processo di formatura in plastico sviluppato da FN**

La maggiore criticità emersa durante gli studi effettuati per la progettazione della linea è dovuta alla stessa natura reologica del compound plasto-ceramico sviluppato. Quest'ultimo rappresenta da un lato il miglior compromesso per avere un'elevata carica ceramica, un buon comportamento nella fase di condizionamento e caratteristiche conformi in termini di porosità e dimensionali, ma dall'altro possiede una scarsa "melt strenght", che potrebbe richiedere ulteriori modifiche e ottimizzazioni in corso d'opera alla linea di estrusione su lastra realizzata.

### **B. Studio, sviluppo e realizzazione di un dispositivo innovativo, da utilizzare per prove di condizionamento dei componenti prodotti, e prova dei componenti stessi in cella**

Prima di procedere alla progettazione del dispositivo elettrochimico da utilizzare per definire il ciclo di condizionamento delle matrici in plastico, FN ha effettuato delle prove preliminari in condizioni simulate in forno, al fine di verificare l'influenza dei diversi parametri (temperatura, gradiente di temperatura, atmosfera gassosa) sulla componente polimerica, sull'integrità delle matrici e sulle caratteristiche porosimetriche delle stesse. Sono state anche effettuati esami termo-gravimetrici, sia presso ENEA e CESAL che successivamente presso FN (dopo l'acquisizione della strumentazione necessaria), per valutare il comportamento ai cicli termici dei lotti di matrici realizzate nelle varie fasi delle attività.

Il comportamento della matrice durante il riscaldamento somiglia molto a quello della matrice tradizionale (Figura 102), i campioni sono omogenei e le prove di debinding in forno hanno dimostrato che hanno anche un'ottima stabilità dimensionale.

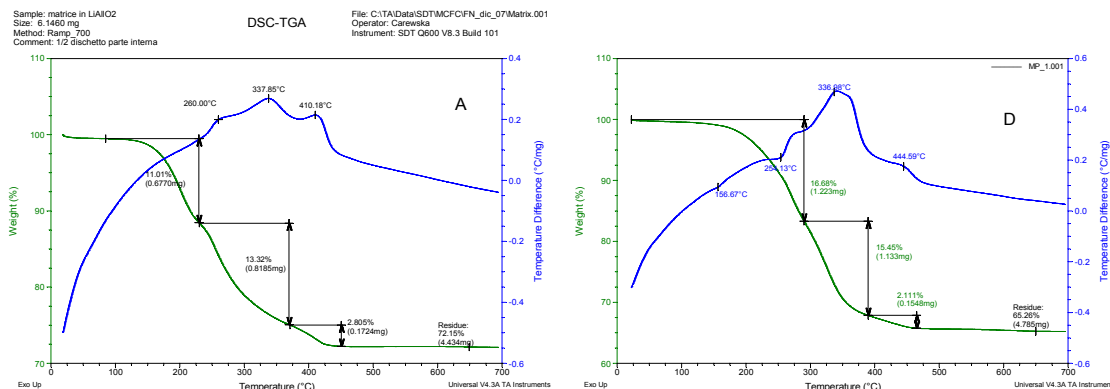


**Figura 102. Curve termogravimetriche TG/DTA ottenute in aria a velocità di riscaldamento di 10°C/min della matrice tradizionale prodotta da FN con tape casting (A) e delle matrici in plastico della seconda serie (D)**

È stato quindi progettato e realizzato un dispositivo (stack) a geometria tonda (diametro 95 mm, area 71 cm<sup>2</sup>), modulabile fino a 15 unità, completamente attrezzato per l'alimentazione con i gas di reazione e per la gestione della prima fase di start up anche in remoto (Figura 103).

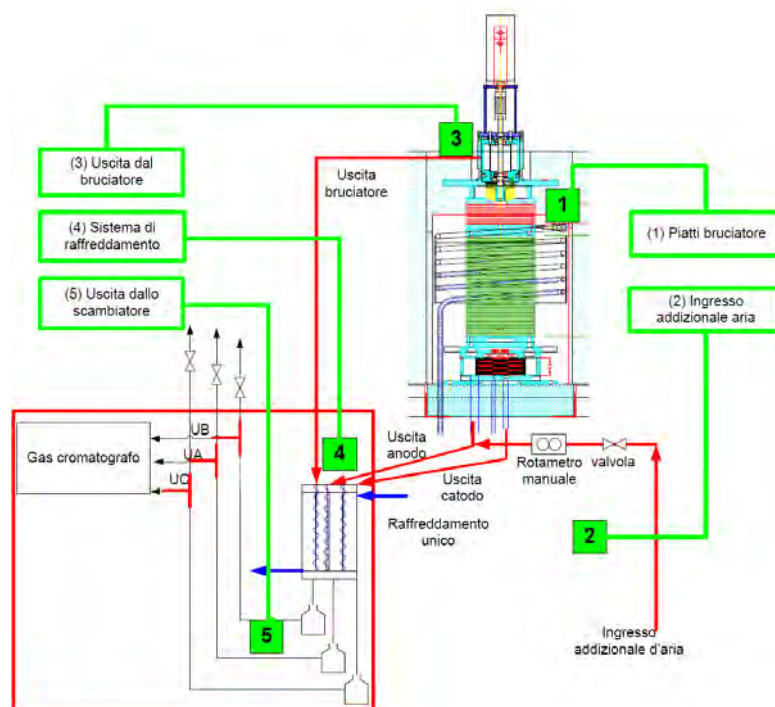


**Figura 103. Dispositivo per le prove: schema di impianto MCFC prototipale di FN**

Sono poi state condotte le prime prove sperimentali, con la individuazione dei parametri critici di trattamento termico e gestione gas, la predisposizione di un sistema dedicato per l'analisi dei gas reflui (accoppiamento con un gascromatografo appositamente individuato) e di un sistema di combustione catalitica per il ricircolo degli stessi, la messa a punto della registrazione dei segnali elettrici in uscita (tensione, corrente, densità di corrente e monitoraggio nel tempo).

E' quindi stato assemblato, e inserito nel sistema, uno stack di 10 celle, con 3 matrici in plastico da 0,25 mm di spessore per cella, procedendo poi alla prova dello stesso sia dal punto di vista del ciclo di condizionamento che delle prestazioni in funzionamento.

Per quanto riguarda il primo, è stato individuato un ciclo di ragionevole durata (una settimana circa) lento e graduale, in modo da poter seguire i fenomeni che si verificano durante la decomposizione e distruzione/combustione dei prodotti generati dalla componente plastica delle matrici. Si è quindi proceduto a riscaldare lo stack secondo le rampe e l'atmosfera gassosa programmate e a controllare la composizione chimica dei gas in uscita dai comparti anodico e catodico; la presenza, oltre ad anidride carbonica ed acqua, di una certa percentuale di idrogeno fa ritenere che la combustione dei prodotti di decomposizione della matrice non sia completa e che verifichino fenomeni di pirolisi del polimero collaterali a quelli più tipicamente associabili al bruciamento.

Dopo la fase di condizionamento e start up dello stack, che le matrici hanno superato senza problemi, è stata condotta la sperimentazione per valutare le prestazioni dello stack sotto carico elettrico. Nelle Figure 104 e 105 è possibile osservare le caratteristiche di tensione e potenza dello stack nella prima fase di funzionamento, confrontate con quelle stimate con celle con matrici tradizionali.

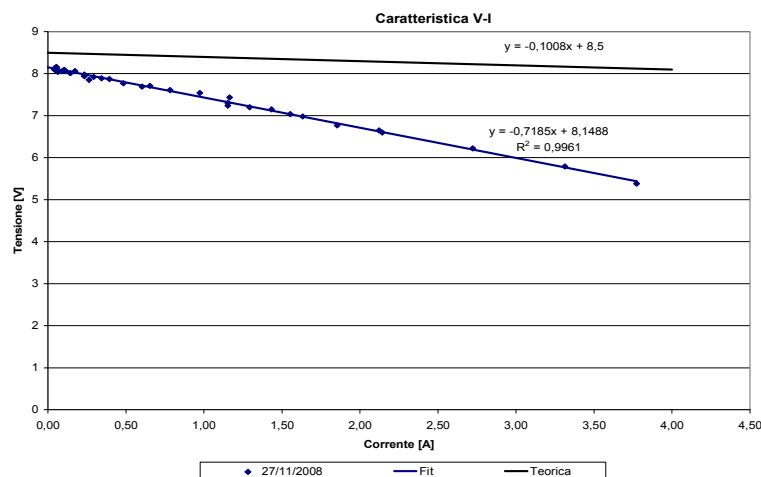


**Figura 104. Confronto tra caratteristica volt-amperometrica teorica e sperimentale del primo giorno di funzionamento**

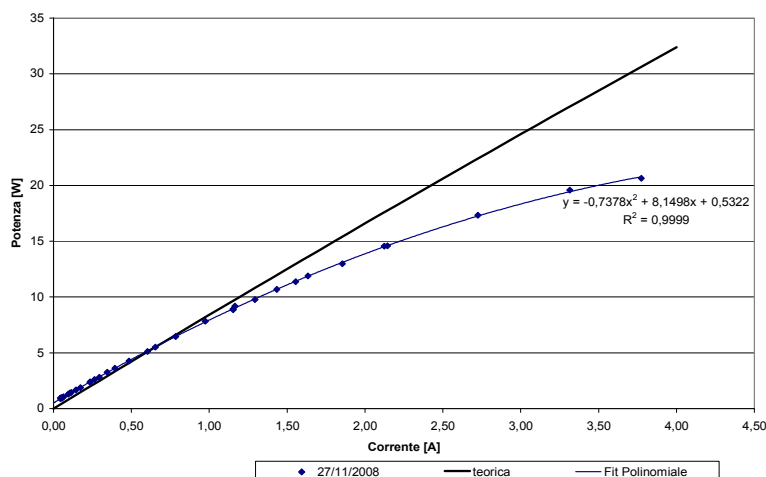


**Figura 105. Confronto tra potenza teorica e sperimentale del primo giorno di funzionamento**

La durata complessiva della sperimentazione è stata di 560 ore, compreso un riavvio dello stack, tendente a verificare l'influenza dello stesso sulle prestazioni (è stata rilevato un peggioramento delle caratteristiche elettriche causato da un incremento della resistenza interna).

Al termine della prova lo stack è stato smontato e sui componenti porosi (anodi, catodi e matrici) sono state condotte le analisi di caratterizzazione dimensionale, chimico-fisica e micro strutturale post test. In particolare, le matrici in plastico hanno mantenuto la tipica struttura del gamma alluminato di litio, senza presentare fessurazioni o cricche anomale, in linea con il comportamento delle matrici ottenute per tape casting. Le uniche osservazioni



riguardano una certa presenza di cromo nello strato a contatto con l'anodo (cromo rilasciato dal collettore di corrente a contatto con l'anodo stesso) e una presenza dei carbonati fusi inferiore a quella rilevabile nel prodotto per tape casting.

Anche se ulteriori prove in cella sono necessarie per confermare le prestazioni delle matrici in plastico sviluppate, si può dire che le stesse funzionano correttamente e sono compatibili con l'ambiente di reazione che si crea dallo start up della cella in poi, per tutto il funzionamento.

Altre prove delle matrici, in una monocella ( $3 \text{ cm}^2$ ) assemblata con elettrodi tradizionali, sono state condotte presso ENEA e sono tuttora in corso. Durante le prime 500 ore di esercizio sono state effettuate misure di resistenza interna con il metodo dell'interruzione di corrente, misure di polarizzazione e misure di impedenza. Il carico meccanico è stato registrato nel tempo. Dalla variazione dei valori di carico meccanico, di resistenza elettrica e dall'andamento delle curve di polarizzazione si può affermare che la cella con matrici in plastico richiede un tempo di condizionamento di circa 300 ore per essere operativa. Tale intervallo di tempo è paragonabile a quello necessario con matrici tradizionali. La resistenza di cella risulta più elevata di quella con matrici tradizionali (Figura 106), fatto che testimonia la necessità di ulteriori miglioramenti delle matrici in plastico per questo aspetto specifico. Dalle misure di impedenza si può affermare che la reazione catodica ha luogo sulla superficie dell'elettrodo senza risentire della presenza della matrice in plastico.

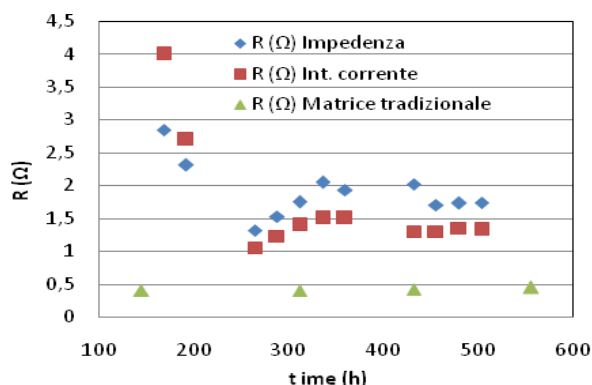


**Figura 106. Resistenza di cella misurata con due tecniche diverse: ( ■ ) il metodo dell'interruzione di corrente e ( ◆ ) la spettroscopia d'impedenza. ( ▲ ) Valori di resistenza di una cella di confronto con matrici tradizionali**

### C. Ottimizzazione del processo di digestione anaerobica di reflui zootecnici e studi preliminari per la produzione di idrogeno dagli stessi; studio di nuove formulazioni dei componenti di cella MCFC più resistenti alle impurezze a base di zolfo e prova in monocella di gas simulante quello prodotto da digestione anaerobica

L'impiego delle MCFC per la valorizzazione energetica di rifiuti urbani e agro-industriali è una linea di sviluppo che sta ricevendo sempre maggiore attenzione, sia a livello nazionale che internazionale. Lo sviluppo di questi sistemi richiede che la realizzazione e sperimentazione di impianti sia affiancata da attività di ricerca e sviluppo su alcuni componenti critici, che consentano di ottimizzare le prestazioni degli stessi e del sistema nel suo insieme. A tal fine nell'ambito del presente obiettivo sono previste diverse linee di ricerca, che coinvolgono l'ENEA ed alcune università; le attività svolte ed i risultati finora ottenuti vengono descritti nel seguito.

#### Ottimizzazione del processo di digestione anaerobica a metano e studi preliminari sulla produzione diretta di idrogeno da reflui zootecnici

Principale scopo di questa linea di sperimentazione è la produzione di un biogas con elevato potere calorifico (concentrazione di metano, nel secondo stadio, almeno pari al 70% e di idrogeno, nel primo, superiore al 50%) e basso contenuto di impurità, con particolare riferimento all'idrogeno solforato.

Le attività sono state svolte in collaborazione con il Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade dell'Università di Roma "La Sapienza" (DITS), suddividendole in maniera complementare e coordinata tra i laboratori della Casaccia e quelli dell'Università in modo da ottimizzare i tempi e sfruttare al meglio i risultati ottenuti.

Le azioni condotte nella prima fase (sino a settembre 2008) hanno riguardato principalmente la definizione dei substrati da avviare a digestione anaerobica (reflui zootecnici, frazione organica dei rifiuti solidi urbani - FORSU, biomasse disponibili a seconda della stagione di produzione) e la definizione della strumentazione per l'attività di laboratorio.

Si è deciso di installare reattori batch in vetro Pyrex da 1 L termostatati e dotati di sistema di agitazione magnetica e raccolta del biogas mediante eudiometro (Figura 107), reattori batch più adatti di quelli in continuo nella prima fase di studio per l'ottimizzazione delle principali variabili operative (temperatura, pH, modalità di miscelazione, alimentazione, ecc.). Sistemi in continuo o semi-continuo, in scala da laboratorio, verranno utilizzati durante il 2° anno per la definizione dei principali parametri di dimensionamento, che permetteranno lo scale up necessario per alimentare una cella a combustibile a carbonati fusi da 1 kW, e di ottimizzare il processo di digestione anaerobica a doppio stadio, in modo da ottenere una corrente di gas ricca in idrogeno ed una ricca in metano.

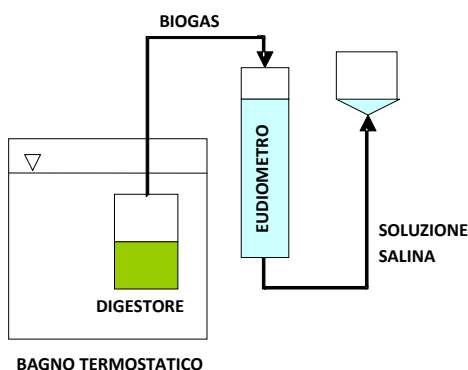


**Figura 107. Schema di funzionamento del sistema di raccolta del biogas prodotto**

Dopo l'adeguamento delle attrezzature, sono state avviate prove di digestione anaerobica su substrati diversi e con scopi diversi nelle due unità coinvolte.

Date le competenze precedentemente acquisite, presso il DITS sono state avviate prove di digestione anaerobica non convenzionale volte all'ottimizzazione della produzione biologica di idrogeno da biomasse. Sono stati approfonditi, nello specifico, gli effetti del pH sulla produzione di idrogeno e dei metaboliti intermedi (VFA) durante la prima fase della digestione anaerobica di una FORSU riprodotta in laboratorio; a tale scopo è stato sviluppato un sofisticato sistema di controllo in continuo del pH di processo.

Presso l'ENEA, si è scelto di cominciare a studiare il processo convenzionale, in modo da utilizzare le rese energetiche raggiunte come riferimento per una successiva analisi comparativa dei trattamenti studiati. In particolare, inizialmente si è ottimizzata la temperatura di processo e si sono investigati gli effetti della modifica iniziale del pH sulla produzione qualitativa e quantitativa di biogas da digestione anaerobica di reflui suinicoli. In un secondo momento, sono state avviate prove di biometanazione della medesima matrice, apportando modifiche in termini di pH ed aggiunta di sali con lo scopo di ridurre il contenuto di idrogeno solforato nel biogas prodotto, intervenendo sulla formazione/precipitazione di sali di tale composto e sulla competizione tra i batteri responsabili della sua produzione ed i metanogeni.

Sono state parallelamente individuate le composizioni delle comunità microbiche al variare dei parametri operativi suddetti. A tale scopo sono state messe a punto le tecniche molecolari per il riconoscimento della struttura delle comunità microbiche presenti nel campione di refluo suino.

#### Studio e messa a punto di sistemi di clean up del biogas, sia di tipo chimico-fisico che di tipo biologico

La prima fase della ricerca ha previsto un ampio studio sullo stato dell'arte dei diversi sistemi di tipo chimico-fisico (colonne di assorbimento) per l'abbattimento dello zolfo da miscele con composizione analoga a quella del biogas, studio condotto in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza". Sulla base delle informazioni acquisite è stata definita e programmata l'attività sperimentale, che prevedrà la caratterizzazione di diverse tecnologie e diversi materiali (carboni attivi e catalizzatori) per l'abbattimento dei composti dello zolfo presenti nel biogas; in particolare ognuno di questi composti deve essere abbattuto al di sotto dei limiti di tollerabilità della cella (0,5÷1 ppm).

Sono stati individuati ed acquisiti campioni di materiale da utilizzare come adsorbenti (vari tipi di carboni attivi e setacci molecolari) o catalizzatori per il processo di abbattimento dello zolfo. Questi sono stati sottoposti a caratterizzazione chimico-fisica utilizzando le seguenti tecniche: porosimetria, XRD per la determinazione della struttura cristallina, assorbimento atomico o analisi elementale, per la determinazione della composizione chimica dei catalizzatori, analisi termogravimetrica, pH superficiale.

In parallelo è stata progettata la postazione di prova (Figura 108) per i test catalitici in reattore; i reattori sono tutti realizzati in quarzo, che è materiale inerte nei confronti dello zolfo.



L'attività prosegue nel secondo anno con i test catalitici dei campioni commerciali, con la sintesi di nuovi materiali e con le misure di caratterizzazione degli stessi.

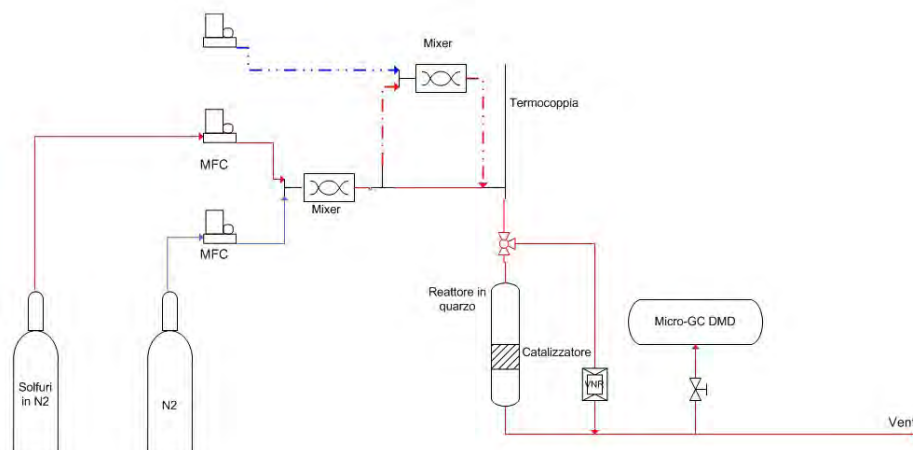


**Figura 108. Schema dell'apparato sperimentale per le prove sui catalizzatori**

#### Studio dei meccanismi di avvelenamento della cella da parte di impurezze a base di zolfo

E' stata inizialmente condotta una analisi approfondita della bibliografia esistente nel settore, al fine di delineare i meccanismi di interazione tra i composti solforati, in particolare  $H_2S$ , ed i componenti della cella (soprattutto anodo ed elettrolita). Sulla base di tale analisi, è stato impostato un programma sperimentale di prove in monocella a carbonati fusi con gas simulante quello prodotto dalla catena digestore anaerobico/sistema di clean up. Alcuni risultati sono riportati in Figura 109.

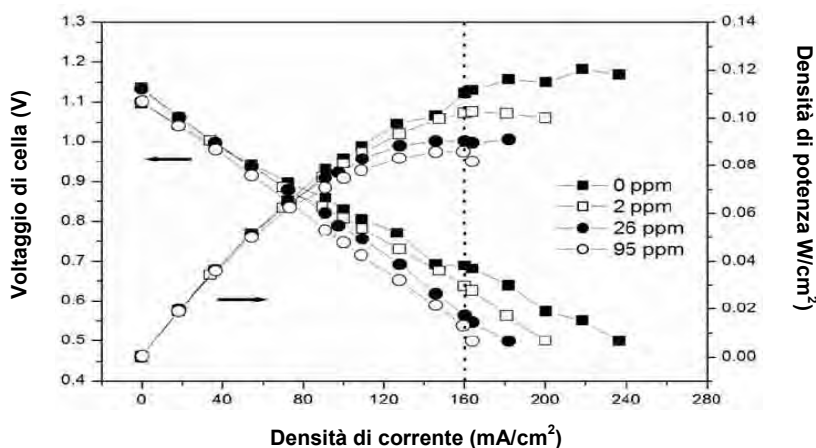


**Figura 109. Curve di polarizzazione per una cella alimentata con combustibile secco contenente differenti quantità (0, 2, 26 e 95 ppm) di acido solfidrico**

Le prove, effettuate anche in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Perugia, mostrano che l'acido solfidrico compromette le prestazioni di una cella a carbonati fusi perché reagisce sia con l'anodo sia con l'elettrolita. A basse concentrazioni di  $H_2S$  può avvenire soltanto l'adsorbimento fisico e chimico sulla superficie del nichel e la sostituzione di ioni carbonato con ioni solfuro e solfato, dal momento che la formazione in bulk di solfuri di nichel è termodinamicamente proibita. Tuttavia quando si applica una corrente alla cella, il potenziale anodico aumenta rendendo possibile l'ossidazione elettrochimica di ioni solfuro a solfuri di nichel. Quindi la cella, sotto carico elettrico, è più sensibile all'attacco dell'acido solfidrico. Il grado di avvelenamento dipende dalla corrente applicata, dalla concentrazione di acido solfidrico e dalla concentrazione di idrogeno. Il grado di rigenerazione delle prestazioni dipende dalla quantità di vapore acqueo nel gas anodico in ingresso (Figura 110). Infine, l'effetto irreversibile dell'avvelenamento è dovuto alla formazione del solfuro  $Ni_3S_2$ .

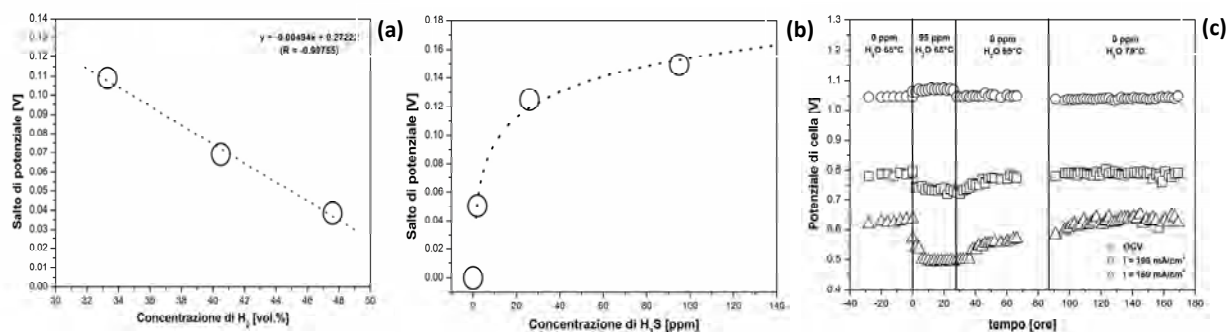


**Figura 110. Effetto sul potenziale di cella di (a) concentrazione dell'idrogeno; (b) concentrazione dell'acido solfidrico; (c) concentrazione di acqua nella fase di rigenerazione**

### Studio di nuove formulazioni dei componenti di cella più resistenti ai composti solforati

Lo sviluppo di anodi più resistenti ai composti solforati rappresenta, insieme allo sviluppo di sistemi di purificazione sempre più efficaci, la possibile soluzione per una tecnologia di cella in grado di utilizzare biogas di diversa origine. A tal fine, nella prima fase delle attività sono state analizzate le possibili alternative da valutare, sulla base dei risultati descritti in precedenza, ossia dal fatto che il decremento delle prestazioni di una cella MCFC alimentata con un gas anodico contenente H<sub>2</sub>S è causato essenzialmente dalla formazione per via elettrochimica di solfuri di nichel. Quindi, il criterio di selezione di materiali anodici alternativi resistenti all'acido solfidrico deve essere tale da valutare parametri sia chimici sia elettrochimici. Infatti, il materiale anodico deve essere tale che le reazioni chimiche di formazione dei solfuri siano termodinamicamente proibite ( $\Delta G > 0$ ) e che i potenziali di formazione dei solfuri siano tali da non permettere la scarica dello ione solfuro nelle condizioni di esercizio della cella, tipicamente 150 mA/cm<sup>2</sup>.

Sono attualmente allo studio tre tipologie di materiale anodico resistente all'avvelenamento da acido solfidrico: NiCr ricoperto da CeO<sub>2</sub>; NiCr ricoperto da CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>; NiAl. I primi due materiali sono costituiti da un elettrocatalizzatore ricoperto da una trappola per l'acido solfidrico facilmente rigenerabile. Il terzo materiale è costituito da un elettrocatalizzatore resistente alla corrosione da acido solfidrico.

La ceria presenta caratteristiche redox tali da intrappolare facilmente l'acido solfidrico secondo la reazione:  $2\text{CeO}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ . Soluzioni solide ceria-zirconia mostrano, rispetto alla ceria, caratteristiche redox superiori e modulabili variando il rapporto Ce/Zr ed il trattamento termico adottato. Inoltre l'aggiunta di ZrO<sub>2</sub> a CeO<sub>2</sub> aumenta la resistenza al sintering e favorisce la capacità di rigenerazione dell'anodo per l'elevata *oxygen storage capacity*.

Sono stati preparati i primi campioni di anodi a base di NiCr rivestiti di ceria con la tecnica *Complex Sol-Gel*: l'elettrodo ottenuto è stato sottoposto ad analisi SEM-EDX per verificare l'omogeneità della ricopertura (Figura 111). Sono in corso prove per l'ottenimento di un prodotto più omogeneo.

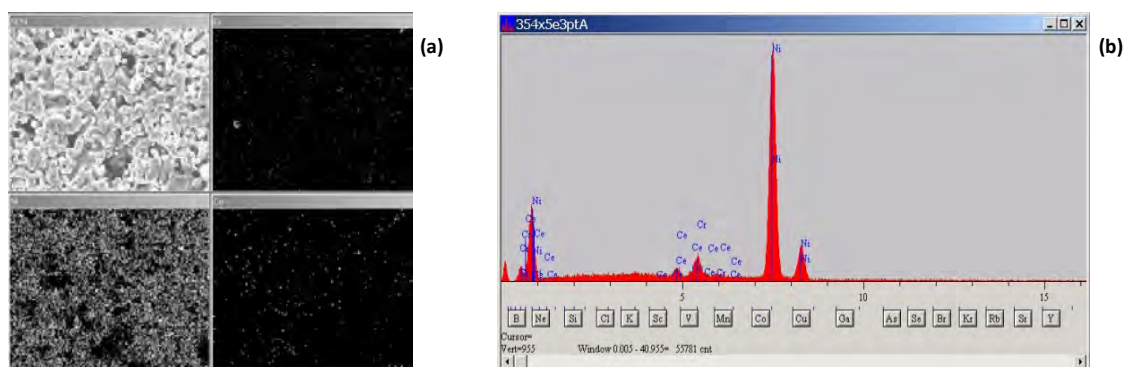


**Figura 111. Microfotografia SEM; (b) Analisi EDX**

### Analisi di sistemi alimentati a biomasse

Accanto alle attività sperimentali sui diversi sottosistemi, sono state svolte, in collaborazione con il Dipartimento DETEC dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, attività di analisi e studio, mediante modelli matematici, dei sistemi con celle a carbonati fusi utilizzando diverse tipologie di combustibili derivati da biomasse e rifiuti, al fine di individuare, anche in funzione della disponibilità sul territorio degli stessi, le applicazioni e le configurazioni più promettenti.

#### **D. Progettazione e realizzazione del potenziamento dell'impianto per la simulazione del comportamento del sistema cella MCFC/turbina**

L'attività è strettamente collegata a quella, assai più ampia, in corso nell'ambito di un progetto FISIR, che prevede la realizzazione nel centro ENEA della Casaccia di una postazione di prova per lo studio della integrazione di turbine con celle a carbonati fusi (sistemi ibridi), al fine di aumentare l'efficienza elettrica del sistema. In particolare il presente obiettivo è relativo al potenziamento dell'impianto, per consentire allo stesso, previsto in origine per turbine da 100 kW (accoppiate a una cella di circa 500 kW), di provare turbine fino alla taglia di 500 kW (integrabili in impianti di potenza superiore al MW). A tal fine, sulla base di una revisione del progetto dell'impianto, è stata ridefinito, per quanto necessario, il dimensionamento di alcuni componenti dello stesso e si è proceduto alla loro acquisizione. E' stata inoltre svolta, nell'ambito di una collaborazione con l'Università di Roma, un'attività comprendente l'analisi del layout dell'impianto nel nuovo assetto, la verifica della strumentazione in campo e l'impostazione del programma delle prove sperimentali.

### *Sistemi con celle a combustibile ad elettrolita polimerico*

#### **E. Progettazione e realizzazione di una stazione di prova e installazione di un sistema da 5 kW, valutazione di tecnologie diverse per la realizzazione dei componenti di cella e caratterizzazione di diverse tipologie di catalizzatori per la riforma di vari combustibili**

Lo sviluppo di sistemi di cogenerazione con celle a combustibile ad elettrolita polimerico per applicazioni residenziali (da 1 kW a qualche decina di kW, generalmente con gas naturale come combustibile) sta ricevendo una notevole attenzione a livello internazionale, con ampi programmi dimostrativi (alcune migliaia di sistemi) soprattutto in Giappone, ma anche in Germania. Nell'ambito del presente obiettivo era previsto che si avviasse la verifica delle potenzialità di questi sistemi, con la acquisizione di uno di essi, e che si affrontassero due aspetti critici per la tecnologia, come la valutazione di metodologie di produzione potenzialmente a basso costo per i componenti di cella e il miglioramento dei catalizzatori impiegati nella conversione del combustibile in un gas ricco di idrogeno. Le attività su queste tematiche sono condotte dall'ENEA, in collaborazione con alcune Università. Vengono descritti nel seguito le attività svolte ed i risultati ottenuti.

### Progettazione e realizzazione di una stazione di prova e installazione di un sistema da 5 kW

Nella prima fase dell'attività è stato individuato il sistema da acquisire, è stata progettata la stazione di prova e sono stati definiti i parametri da monitorare nel corso delle campagne di prova. In particolare, è stata svolta una indagine di mercato finalizzata a individuare la disponibilità di sistemi cogenerativi del tipo di quello previsto, con le difficoltà connesse al fatto che gli stessi sono in questa fase di tipo sperimentale e dimostrativo. Tali vincoli hanno portato a scegliere il sistema ORION 5 di Exergy Fuel Cells, società con sede in Emilia Romagna, con le seguenti caratteristiche:

- Potenza elettrica nominale: 4,8 kW<sub>e</sub>;
- Potenza termica nominale: 7 kW<sub>th</sub> @ 50°C;
- Efficienza in energia elettrica: >30% LHV;
- Efficienza totale: 70% LHV.

L'impianto, completamente automatico, ha un sistema di acquisizione dati in grado di fornire in continuo le informazioni relative a temperatura di ingresso e uscita dell'acqua, corrente e tensione dello stack di celle, potenza, energia elettrica fornita (kWh), condizioni operative.

Sulla base dei dati tecnici disponibili sono state definite le liste dei parametri da rilevare per la caratterizzazione dell'impianto e degli strumenti e apparecchiature necessari al completamento della postazione di prova per integrare la strumentazione in dotazione al sistema ORION 5. Sono state individuate alcune ditte fornitrici della strumentazione e delle apparecchiature relative, scelte tra le più affidabili in circolazione; sono state emesse le

richieste d'offerta e, successivamente, è stato effettuato l'allineamento tecnico-economico delle offerte stesse in modo da individuare volta per volta la più conveniente.

Purtroppo alcune variazioni della struttura societaria del fornitore individuato, intervenute durante lo svolgimento delle attività, hanno reso impossibile l'acquisizione del sistema; infatti tali variazioni hanno comportato, da un lato, uno slittamento significativo dei tempi di fornitura, dall'altro hanno fatto venir meno la disponibilità dell'azienda a cedere all'ENEA il sistema a un costo simbolico, come previsto nella fase di definizione del programma.

Per tali motivi, e tenendo conto dell'impossibilità di avere un sistema analogo da altri fornitori in tempi più brevi e a costi compatibili con le disponibilità finanziarie, si è deciso, da un lato, di modificare la progettazione della stazione di prova, in modo da poter testare altri sistemi che si rendessero disponibili in futuro, dall'altro di non procedere alla realizzazione della stessa.

In parallelo è stata svolta un'attività di modellazione e di simulazione dei due sottosistemi costituenti l'elemento cogenerativo: il processamento del combustibile, basato sullo steam reforming, e la produzione di energia, vale a dire lo stack di celle a combustibile.

Il sistema di fuel processing è stato modellato in ambiente AspenPlus<sup>TM</sup>, tenendo conto dei parametri critici di funzionamento (rapporto vapore/carbone, temperatura di reforming, temperature dei flussi dei reagenti in ingresso al reattore di steam reforming, le condizioni operative del reattore di shift e del reattore di ossidazione parziale). Lo schema d'impianto dell'unità di trattamento del combustibile oggetto della modellazione numerica fa riferimento al fuel processor FPS2000 sviluppato da Osaka Gas.

Per quanto riguarda la modellazione dell'unità di potenza, è stato utilizzato un approccio monodimensionale in grado di predire le prestazioni di celle polimeriche alimentate con gas di sintesi. Il modello è stato validato utilizzando i dati sperimentali di una campagna di prove condotte sul modulo Nexa da 1 kW di Ballard Power System.

Le attività sono state svolte in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza" e con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Cassino.

#### Valutazione di tecnologie diverse per la realizzazione dei componenti di cella

L'attività di ricerca, svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza", ha riguardato principalmente la messa a punto di una metodologia adatta a produrre membrane polimeriche catalizzate (con deposizione dei catalizzatori direttamente sulla membrana) da impiegare nelle celle a combustibile (PEFC) o negli elettrolizzatori a polimero solido (SPE). Inizialmente, è stato condotto uno studio approfondito sui lavori presenti in letteratura che trattano l'argomento, cercando di individuare la metodologia operativa migliore tra quelle proposte ed ottimizzandone il procedimento. Le membrane catalizzate a base di platino sono state quindi caratterizzate da un punto di vista morfologico mediante la microscopia elettronica a scansione con sorgente ad emissione di campo (FEG-SEM), che ha fornito informazioni molto dettagliate sulle proprietà dei depositi. La valutazione delle proprietà elettrochimiche è stata condotta, dopo aver individuato le condizioni sperimentali più adatte, con misure di spettroscopia di impedenza (EIS) e con misure di elettrolisi.

Inoltre, nella fase finale delle attività, l'interesse è stato focalizzato sulla preparazione, ottimizzazione e caratterizzazione di assemblati membrana-elettrodi (MEA). In particolare, sono stati studiati elettrodi ottenuti con tecniche di deposizione non tradizionali (elettrodeposizione) su varie tipologie di substrato.

Dai risultati ottenuti (Figura 112), si è osservato che i MEA in cui vengono utilizzati elettrodi prodotti per

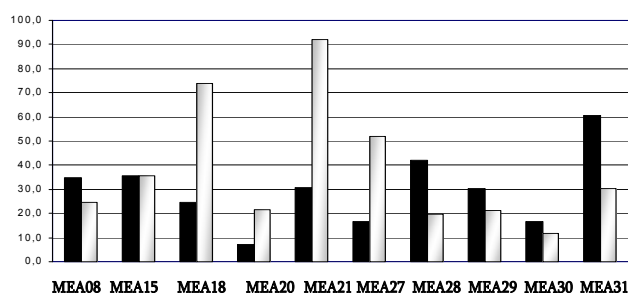


**Figura 112.** Valori di densità di corrente massima raggiunta a 2 Volt ( $I_{max@2V}$ , barre chiare) e divisa per il carico di platino ( $I_{max@2V/mgPt}$ , barre scure) per tutti i MEA caratterizzati

elettrodeposizione o con membrane catalizzate presentano buone prestazioni pur con quantità di platino estremamente più basse ( $0,5 \text{ mg/cm}^2$ ) rispetto agli elettrodi preparati con catalizzatori commerciali.

#### Caratterizzazione di diverse tipologie di catalizzatori per la riforma dei combustibili

La caratterizzazione di catalizzatori, che si differenziano sia per la loro configurazione (pellets, polveri, strutture monolitiche) che per la composizione (diversità di supporti e fasi attive), è stata condotta attraverso l'utilizzo di un sistema di reattori da laboratorio in cui è possibile monitorare, controllare e registrare le diverse variabili del processo (portate in ingresso, T e P del reattore, composizione del gas uscente) (Figura 113).

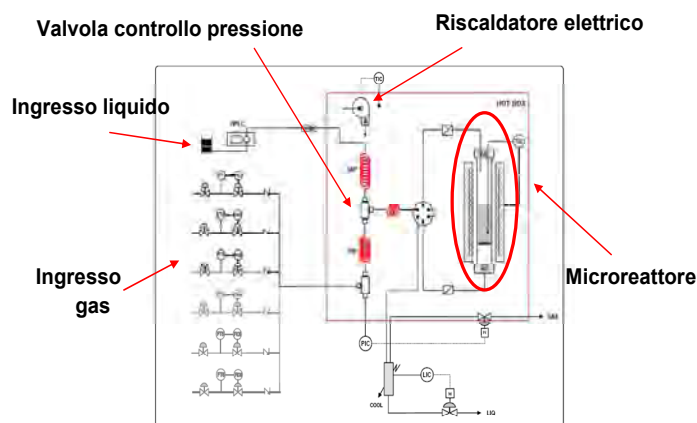


Figura 113. Schema della stazione sperimentale dei reattori da laboratorio

Le prime prove sperimentali hanno riguardato catalizzatori da impiegare per il processo di ossidazione parziale, utilizzando dapprima un catalizzatore commerciale usato ampiamente a livello industriale nei processi di steam reforming, catalizzatore che non si è rivelato adeguato alle più severe condizioni di esercizio dell'ossidazione parziale ed alle più frequenti operazioni di start-up e shut-down. Le prove successive sono state condotte su catalizzatori preparati e forniti dall'Università di Salerno (Dipartimento di Ingegneria Chimica e Alimentare), che collabora a questa attività insieme al Politecnico di Torino (Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica) e all'Università di Roma "La Sapienza" (Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente). In particolare, sono state fornite diverse tipologie di catalizzatori, dotati di un supporto che dovrebbe garantire una maggiore resistenza alla formazione di coke durante le reazioni di reforming ( $12\%$  in peso di  $\text{NiO}$  supportato su  $\text{CeO}_2$ , e  $1\%$  in peso di  $\text{Pt}$  supportato nuovamente su  $\text{CeO}_2$ ). Le prove, condotte verificando la stabilità nel tempo e variando parametri operativi come la velocità spaziale, hanno mostrato che anche i catalizzatori con supporto a base di  $\text{CeO}_2$  mostrano una graduale perdita di prestazioni, che è però più lenta rispetto ai catalizzatori commerciali e tende verso l'asintoto (Figura 114).

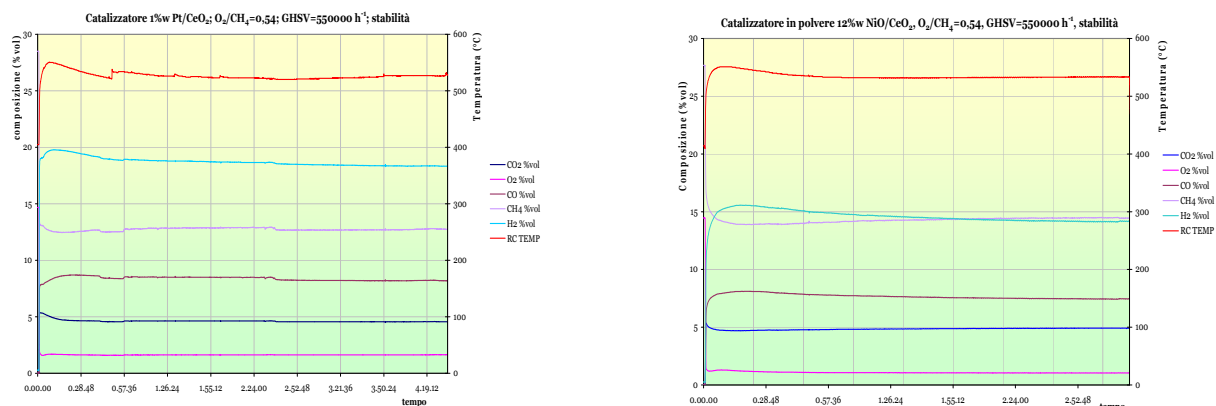


Figura 114. Risultati delle prove eseguite con catalizzatore di Pt e NiO su  $\text{CeO}_2$

La successiva analisi al SEM ha confermato che la granulometria è rimasta invariata ed omogenea e che inoltre non c'è traccia di C nel catalizzatore che ha lavorato.

Sono poi stati condotti test sperimentali anche su catalizzatori strutturati, con supporto ceramico di cordierite. I primi dati raccolti sembrano mostrare una maggiore stabilità dei catalizzatori.

Un'altra attività ha riguardato la caratterizzazione di catalizzatori per le reazioni di desolforazione del gas naturale e del biogas.

Come materiali adsorbenti per la purificazione sono stati provati in una prima fase una serie di campioni commerciali. Solamente un campione commerciale, un carbone attivo impregnato, è stato in grado di rimuovere al di sotto dei valori limite tutti i composti solforati. Tutti gli altri adsorbenti provati sono stati selettivi verso alcuni composti piuttosto che altri. Per ciò che riguarda i composti clorurati nessuno dei campioni commerciali disponibili si è dimostrato in grado di eliminare la grande quantità di organoclorurati. Quindi in commercio non c'è attualmente un unico materiale adsorbente che sia in grado di abbattere gli inquinanti, presenti in un gas naturale o in un biogas, fino ai limiti di tolleranza richiesti dalle celle a combustibile. La soluzione potrebbe essere quella di una purificazione a più stadi.

Successivamente è stato provato un adsorbente sintetizzato in precedenza dal Politecnico di Torino per la desolforazione di combustibile diesel, adsorbente che non si è mostrato idoneo alla purificazione di combustibili gassosi.

#### *Supporto ai Ministeri e collaborazioni internazionali*

#### **F. Supporto a MSE e MATT per la partecipazione a progetti internazionali e per la realizzazione di una road map italiana per idrogeno e celle a combustibile; partecipazione dell'ENEA alle collaborazioni internazionali nel settore.**

Le attività relative a questo obiettivo, svolte interamente dall'ENEA, 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 il rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali nel settore. In particolare, nel periodo di riferimento:

- sono state svolte, e pubblicate, analisi approfondite dello stato e delle prospettive delle tecnologie delle celle a combustibile e dell'idrogeno, a supporto delle scelte nel settore della PA e dei potenziali utenti;
- ENEA ha partecipato ai lavori di definizione dei programmi europei su celle a combustibile e idrogeno, aderendo alla associazione delle strutture di ricerca europee del settore (New European Research Grouping on Fuel Cells and Hydrogen), costituita per coordinare la partecipazione ai programmi 2008-2013, gestiti dalla partnership pubblico-privata Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking;
- ENEA ha partecipato, a supporto del MATTM, ai lavori dell'International Partnership for Hydrogen Economy e alle riunioni dell'Implementation and Liaison Committee dello stesso, nell'ambito del quale riveste l'incarico di Vice-chair per la Strategic Priority 4 "Technology monitoring";
- ENEA ha partecipato, in rappresentanza dell'Italia, agli Implementing Agreements dell'Agenzia Internazionale dell'Energia su Advanced Fuel Cells, Production and Utilisation 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 anche organizzate in Italia alcune riunioni, sia dei Comitati Esecutivi (Hydrogen) che di alcuni Annessi.

#### **PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI**

##### *Sistemi con celle a combustibile a carbonati fusi*

#### **A. Studio, sviluppo e realizzazione di matrici per MCFC con la tecnologia di formatura in plastico e allestimento di una linea di produzione industriale**

Le attività relative a questo obiettivo sono state condotte da FN, come descritto nella sezione precedente, con il supporto delle seguenti università: Università di Genova, Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale; Politecnico di Torino, Sede di Alessandria. Le attività svolte dalle università e i risultati ottenuti sono descritti nel seguito.

### Università di Genova, Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale

Ha svolto una attività di ricerca in supporto ad FN per lo sviluppo di un processo a basso costo per la produzione di gamma alluminato di litio per le matrici delle celle a combustibile a carbonati fusi. In tale ambito il Dipartimento ha collaborato con FN nello sviluppo del processo di sintesi delle polveri e nella caratterizzazione delle stesse, con lo studio di alcune possibili alternative per la sintesi e con l'esecuzione di diverse analisi chimiche e chimico-fisiche sia sui prodotti commerciali (HSA-10 e LSA-50, materiali caratterizzati da diversa granulometria) che sulle polveri prodotte da FN.

I diversi prodotti sono stati valutati attraverso diffrazione di raggi X (purezza del prodotto, analisi qualitativa e semi-quantitativa delle fasi presenti), microscopia elettronica a scansione (morfologia e dimensione dei grani) ed analisi al granulometro laser (dispersione delle dimensioni delle polveri).

Tra i metodi di sintesi analizzati quelli allo stato solido (sintesi mediante processi che avvengono ad alte temperature e sintesi mecano-chimica, partendo in entrambi i casi da  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) sono risultati i metodi più convenienti ed attuabili tenuto conto delle attrezzature disponibili presso FN.

Il lavoro svolto ha portato a mettere a punto un metodo che consente di produrre  $\gamma\text{-LiAlO}_2$  con caratteristiche di purezza ed una distribuzione dimensionale delle particelle simili a quelle di uno dei due prodotti commerciali (HSA-10) presi come riferimento. L'attività è proseguita con lo studio dell'influenza della granulometria dei reagenti (soprattutto  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) sulla distribuzione dimensionale del prodotto, al fine di ottenere un  $\gamma\text{-LiAlO}_2$  con proprietà paragonabili a quelle del materiale commerciale LSA-50.

### Politecnico di Torino, Sede di Alessandria (CESAL)

Collabora con FN allo sviluppo delle matrici in plastico, fornendo alla stessa un supporto per caratterizzazioni chimico-fisiche dei compound plasto-ceramici e dei campioni prototipali di matrice, necessario nella fase di messa a punto del processo di produzione. In particolare, il CESAL ha eseguito diverse tipologie di analisi sia sul polimero base che sui compound via via sviluppati e sulle matrici (come indice di fluidità, curva reometrica, resistenza Vicat, spettroscopia IR, contenuto di inerte e di umidità, conducibilità termica, prove meccaniche e di invecchiamento). Di particolare importanza per lo sviluppo del processo è stata la determinazione delle caratteristiche reologiche del compound nelle varie fasi del processo stesso, dato il particolare tipo di compound trattato (carica ceramica molto elevata) e la criticità della scorrevolezza del compound per l'ottenimento di prodotti con le caratteristiche desiderate.

### **B. Studio, sviluppo e realizzazione di un dispositivo innovativo, da utilizzare per prove di condizionamento dei componenti prodotti, e prova dei componenti stessi in cella.**

Anche in questo caso le attività sono state svolte da FN, con il supporto del Politecnico di Torino, sia attraverso la sua Sede di Alessandria (CESAL) che con il Dipartimento di Energetica.

### Politecnico di Torino, Sede di Alessandria (CESAL)

Ha collaborato con FN per lo sviluppo, realizzazione ed impiego del dispositivo per prove di condizionamento. In tale ambito, nella prima fase ha curato lo studio e la progettazione esecutiva delle strumentazioni accessorie utili ad acquisire e gestire in remoto tutti i parametri di prova, nonché quella delle interfacce di collegamento al dispositivo di analisi dei gas e del sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati sperimentali.

In una seconda fase, il CESAL ha affiancato FN nella sperimentazione dello stack, di configurazione circolare, assemblato utilizzando le matrici plasto-ceramiche in corso di sviluppo presso quest'ultima. Le attività CESAL sono state indirizzate all'ottimizzazione delle funzionalità del circuito di prova e all'analisi dei risultati delle varie fasi della sperimentazione dello stack in vista degli sviluppi futuri.

### Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica

Ha sviluppato un modello numerico della cella a carbonati fusi, come strumento per gestire al meglio ed interpretare i dati sperimentali derivanti dalle prove di condizionamento delle nuove matrici e verificarne il comportamento in cella.

Gli studi effettuati sono stati finalizzati a creare un modello in grado di simulare con il maggior grado di approssimazione possibile gli effettivi fenomeni chimico-fisici che si verificano in cella ed in stack. Le celle prese in esame, a differenza di quelle usate tradizionalmente, a geometria planare e rettangolare, presentano una configurazione circolare.

A livello di cella, il principale problema evidenziato dall'analisi dei dati ricavati dallo studio è risultato quello di una non omogenea alimentazione dei gas (principalmente nel comparto anodico) lungo la superficie attiva della cella.



Questo determina una elevata densità di corrente nella zona centrale della cella, mentre la parte più esterna evidenzia una produzione nettamente inferiore. La soluzione proposta per ovviare al problema è quella di ricorrere ad una differente distribuzione dei gas, da realizzarsi attraverso canali a sviluppo prevalentemente radiale ricavati nella parte del piatto metallico di distribuzione rivolta verso la superficie attiva dell'anodo.

Per quanto riguarda lo stack, il modello alle differenze finite che è stato elaborato consente di simulare in modo accurato l'andamento delle temperature al suo interno. Il modello è stato validato utilizzando i dati sperimentali relativi ad uno stack dai 15 celle realizzato da FN. I risultati del confronto mostrano la validità del modello e la sua applicabilità nello studio di stack costituiti da un numero elevato di celle.

### **C. Ottimizzazione del processo di digestione anaerobica di reflui zootecnici e studi preliminari per la produzione di idrogeno dagli stessi; studio di nuove formulazioni dei componenti di cella MCFC più resistenti alle impurezze a base di zolfo e prova in monocella di gas simulante quello prodotto da digestione anaerobica**

Le attività relative a questo obiettivo sono state condotte da ENEA, come descritto al paragrafo precedente, con il supporto delle seguenti università: Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Idraulica, Trasporto e Strade; Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente; Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Applicata e Condizionamento Ambientale; Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale. Le attività svolte dalle università e i risultati ottenuti sono descritti nel seguito.

#### **Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Idraulica, Trasporto e Strade**

Obiettivo principale della ricerca è quello di individuare le condizioni ottimali per la produzione combinata di idrogeno e metano mediante co-digestione anaerobica di substrati organici biodegradabili, ai fini di un successivo impiego del biogas in celle a combustibile a carbonati fusi.

Nella prima fase delle attività sono state eseguite una serie di prove sperimentali in scala di laboratorio, impiegando diverse condizioni operative ed utilizzando come substrati refluo suinicolo e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU). Dalla sperimentazione eseguita è risultato che il substrato più idoneo per la produzione di idrogeno tramite il processo di digestione anaerobica in scala reale è la FORSU.

La seconda fase di studio si è quindi concentrata essenzialmente su questo substrato, che, essendo soggetto a limitati processi di degradazione prima del trattamento vero e proprio, risulta costituito in buona parte da macromolecole prontamente biodegradabili come zuccheri ed aminoacidi, praticamente assenti nel refluo suino.

Le prove di digestione su FORSU sono state condotte impiegando un processo a doppio stadio semicontinuo volto a migliorare le rese di conversione in  $H_2$  e  $CH_4$ , così da rendere più efficiente il bilancio energetico globale del processo di digestione.

Nel corso della sperimentazione sono state eseguite tra l'altro alcune prove operando un controllo automatico in continuo del pH; questo ha consentito di ottenere una maggiore stabilità del processo attraverso un'attenta regolazione dei processi metabolici, a cui è corrisposta una migliore ripetibilità dei risultati sperimentali.

Le produzioni specifiche di idrogeno ottenute nelle prove in semi-continuo a pH controllato indicano la potenziale applicabilità del processo di digestione anaerobica in due stadi studiato ai fini della produzione di idrogeno. Il trasferimento in piena scala del processo richiede comunque ulteriori indagini e l'esecuzione di prove sperimentali su reattori pilota atte ad evidenziare eventuali problematiche connesse al passaggio di scala del processo.

#### **Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente**

E' stato fatto un ampio studio sullo stato dell'arte delle diverse tecnologie di produzione del biogas, con particolare riferimento a quelle relative alla produzione da reflui zootecnici, e dei diversi sistemi chimico-fisici impiegati per l'abbattimento dell'acido solfidrico da miscele di composizione analoga a quella del biogas. In particolare, per questi ultimi sono state esaminate sia le tecnologie che operano a secco (adsorbimento su ossido di zinco, spugne di ferro, sostanze alcaline, setacci molecolari, carboni attivi) che quelle a umido (slurries di ossidi di ferro e zinco, chinoni, soluzioni di ferro chelato, soluzioni alcaline, ammine, ecc.), i solventi fisici e le membrane, valutando le caratteristiche dei diversi sistemi.

Propedeutica all'attività sperimentale, che verrà condotta utilizzando un sistema di micro reattori, è stata l'individuazione e l'acquisizione di campioni di materiale da utilizzare appunto come adsorbente o catalizzatore per il processo di abbattimento dello zolfo.

Alcuni di questi campioni, di tipo commerciale, sono stati acquistati o forniti in prova da ditte che operano a livello industriale per l'abbattimento dello zolfo all'interno di raffinerie, altri forniti da università o dagli stessi utilizzatori. Questi campioni saranno successivamente sottoposti a caratterizzazione presso ENEA al fine di valutare la loro capacità di abbattimento dei composti dello zolfo.

#### Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Nell'ambito di questa attività l'Università collabora con ENEA allo studio dell'influenza dei contaminanti presenti nel biogas, principalmente zolfo, sulle prestazioni delle celle a carbonati fusi. A tal fine era prevista la progettazione e realizzazione, presso il Fuel Cell Lab dell'Università, di un apposito banco prova. L'attività condotta nella prima fase ha riguardato la progettazione del banco prova e l'approvvigionamento dei componenti necessari alla sua realizzazione. La stazione di prova è costituita da una monocella, da un sistema di alimentazione dei gas, da un sistema per la realizzazione delle misure e da tutti gli ausiliari necessari per il corretto funzionamento della cella stessa.

Successivamente i singoli componenti sono stati assemblati e provati singolarmente, secondo procedure standardizzate, si è quindi proceduto al collaudo della postazione di prova, al fine di verificarne il corretto funzionamento. Terminata la fase di messa a punto della postazione sono state avviate le prove su una monocella fornita da AFCo, la quale dopo caratterizzazione con gas di riferimento, è stata alimentata con miscele atte a simulare gas anodici a differente contenuto di zolfo (aggiunto sotto forma di  $H_2S$ ). Scopo della sperimentazione è stato quello di valutare l'effetto prodotto dall'inquinante sulla cella e di cercare di quantificare il decadimento di prestazioni della cella e la possibilità di una rigenerazione della stessa dopo avvelenamento.

Dalla serie di prove effettuate risulta che la perdita di prestazione della cella (pari a circa il 20 e 35 % dopo 500 ore di esposizione rispettivamente a 6 e 10 ppm di  $H_2S$ ) è riconducibile a diversi fattori ed è essenzialmente dovuta all'aumento della polarizzazione anodica ed all'inquinamento della reazione di shift.

Dal punto di vista della reversibilità o meno del fenomeno si può invece asserire che la rigenerazione della cella è solo parziale ed il grado di avvelenamento perdura anche una volta che viene fornito solamente gas puro alla stessa.

#### Università di Napoli "Federico II", Dipart. di Energetica, Termofluidodinamica Applicata e Condizionamento Ambientale

L'attività di ricerca ha lo scopo di analizzare le potenzialità delle celle a carbonati fusi nel loro impiego nelle diverse catene energetiche basate su rifiuti, residui, biomasse ad elevato contenuto organico, idonei al processo di digestione anaerobica. A tal fine è previsto lo sviluppo e l'utilizzazione di un modello del sistema integrato gas da digestione anaerobica di diversa origine/cella a carbonati fusi. L'attività condotta nella prima fase ha riguardato lo sviluppo del modello, che ha l'obiettivo di determinare il comportamento di tutto il sistema di generazione di energia termica ed elettrica a partire dall'alimentazione, andando a valutare anche la fattibilità tecnico-economico-finanziaria del progetto.

Il modello integrato permette di analizzare la filiera di valorizzazione energetica del biogas da digestione anaerobica di diversa origine attraverso un'analisi comparata tra MCI, micro-TG e MCFC. Nel modello sono inserite le tecnologie commerciali attualmente più usate con relativi potenze, rendimenti e caratterizzazioni. È possibile inserire e aggiornare nuove tecnologie e/o nuovi parametri. Le principali variabili in ingresso riguardano la quantità ed il tipo di biomassa disponibile, mentre in uscita sono forniti principalmente i valori di energia termica ed elettrica prodotta. Nelle analisi è possibile fissare il tipo di digestione anaerobica voluta, dimensioni del digestore, le temperature e il generatore utilizzato.

In parallelo a questa attività, è stata realizzata una stima quantitativa delle principali biomasse avviabili a digestione anaerobica per la produzione di biogas presenti sul territorio italiano. Lo studio ha riguardato reflui zootecnici, frazione organica dei rifiuti solidi urbani, reflui civili, siero di latte, scarti di macellazione e residui colturali. Il livello di dettaglio dell'informazione ottenuta è regionale e/o provinciale. Sono forniti inoltre i principali parametri di tali biomasse per la producibilità e caratterizzazione del biogas.

#### D. Progettazione e realizzazione del potenziamento dell'impianto per la simulazione del comportamento del sistema cella MCFC/turbina

Alle attività di questo obiettivo, svolte dall'ENEA, ha contribuito l'Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Meccanica e Aeronautica.

### Università di Roma “La Sapienza”, Dipartimento di Meccanica e Aeronautica

Scopo delle attività dell'Università è stato quello di verificare, in collaborazione con ENEA, il layout dell'impianto nel nuovo assetto (potenze dell'ordine del MW) e di adattare alla nuova configurazione la strumentazione in parte già sviluppata per taglie inferiori, nonché quella di partecipare alla definizione del programma di prove sperimentali da condurre sull'impianto, anche attraverso l'utilizzo di modelli matematici.

Nella prima fase è stata fatta un'analisi della configurazione dell'impianto, verificando il dimensionamento dei componenti e l'ingombro degli stessi e fornendo indicazioni per procedere alla loro acquisizione.

Per quanto riguarda gli strumenti di simulazione da utilizzare si è deciso di adottare due sistemi di calcolo che si differenziano sia dal punto di vista metodologico che operativo, ma che per molti aspetti risultano comunque complementari. In un caso ci si è avvalsi di uno strumento di simulazione, già usato in ENEA, che opera in ambiente IPSEpro, abbastanza flessibile nei confronti della descrizione funzionale del sistema da simulare, ma pesante sotto l'aspetto del protocollo operativo trasferimento-dati; dall'altro si è ritenuto utile elaborare un package di programmazione ex-novo in linguaggio tradizionale (FORTRAN). Quest'ultimo risulta più esigente in termini di impostazione fisico-matematica e numerica del sistema in esame, ma è dotato di maggiore flessibilità ed è decisamente più snello in termini di trasferimento-dati in ingresso.

I codici di simulazione messi a punto sono stati impiegati per descrivere il funzionamento dei sottosistemi (Compact Unit e microturbina) dell'impianto in fase di allestimento presso ENEA. Lo studio fin qui effettuato ha consentito inoltre di caratterizzare le apparecchiature di misura, controllo e regolazione presenti nell'impianto stesso.

I risultati ottenuti, in linea con quelli attesi, permettono di assumere i codici di simulazione numerica sviluppati quali strumenti a largo spettro per l'analisi previsionale fine di futuri altri gruppi ibridi di caratteristiche e taglie diverse.

#### *Sistemi con celle a combustibile ad elettrolita polimerico*

#### **E. Progettazione e realizzazione di una stazione di prova e installazione di un sistema da 5 kW, valutazione di tecnologie diverse per la realizzazione dei componenti di cella e caratterizzazione di diverse tipologie di catalizzatori per la riforma di vari combustibili**

Le attività relative a questo obiettivo sono state svolte dall'ENEA con il supporto delle seguenti università: Università di Roma “La Sapienza”, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente; Università di Cassino, Dipartimento di Ingegneria Industriale; Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica; Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Chimica e Alimentare.

### Università di Roma “La Sapienza”, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente

Ha collaborato con ENEA per la stazione di prova del sistema da 5 kWe, per la valutazione delle caratteristiche tecniche di fabbricazione dei componenti di cella e per la modellistica dei reattori per prova catalizzatori. In particolare, ha contribuito alla definizione delle caratteristiche della stazione di prova e delle specifiche dei componenti che la costituiscono.

Un'altra fase dell'attività ha riguardato lo sviluppo di diversi modelli (mono-dimensionale pseudo-omogeneo, bi-dimensionale pseudo-omogeneo e bi-dimensionale eterogeneo) per ricavare profili di temperatura e concentrazioni nei reattori di prova dei catalizzatori. I modelli verranno validati successivamente utilizzando i dati che si renderanno disponibili nelle fasi sperimentali.

Ha inoltre partecipato allo studio della deposizione dei catalizzatori sulle membrane per le celle polimeriche e contribuito alla caratterizzazione dei prodotti ottenuti, sia da un punto di vista morfologico che elettrochimico.

### Università di Cassino, Dipartimento di Ingegneria Industriale

L'attività è finalizzata a svolgere un'analisi, attraverso la modellazione stazionaria e dinamica, delle prestazioni di sistemi di cogenerazione per uso residenziale (1-5 kW), basati sulla tecnologia delle celle a combustibile ad elettrolita polimerico. In tale ambito, nella prima fase della ricerca sono stati sviluppati i modelli per la simulazione del sistema in condizioni stazionarie. In particolare, il sistema di fuel processing, basato sul processo di steam reforming, è stato modellato in ambiente AspenPlusTM, con riferimento allo schema di un reformer dell'Osaka Gas disponibile presso il Dipartimento, tenendo conto dei parametri critici di funzionamento, come il rapporto vapore/carbonio, la temperatura di reforming, le temperature dei flussi reagenti, le condizioni operative del reattore di shift e dell'unità di abbattimento del CO.

Per la cella è stato realizzato un modello monodimensionale in grado di predire le prestazioni delle celle alimentate con gas di sintesi. In particolare, al fine di valutare gli effetti della composizione del gas di alimentazione anodica sulla curva di polarizzazione, è stato sviluppato un modello cinetico dell'anodo che tiene conto, quindi, di tutte le reazioni cinetiche che possono verificarsi al comparto anodico in presenza di  $H_2$ , CO e  $CO_2$ . Il modello è stato validato utilizzando i dati sperimentali di una campagna di prove condotta su un modulo PEFC da 1 kW.

#### Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica

Il Politecnico ha studiato il problema della desolforazione del gas naturale prima del suo ingresso nel sistema di conversione del combustibile, a monte della cella. Il sistema più impiegato, a temperatura e pressione ambiente, è quello dell'adsorbimento, mediante materiali come carboni attivi, zeolite, silice, allumina ed ossidi metallici. Le prove condotte su diversi adsorbenti commerciali hanno mostrato che la maggior parte dei materiali provati non sono in grado di eliminare tutti i composti solforati presenti nel gas naturale, con l'eccezione dei carboni attivi, che però risultano scarsamente selettivi ed adsorbono anche umidità, riducendo la loro capacità adsorbente.

Dal momento che in commercio non esiste un unico materiale in grado di abbattere i livelli di zolfo e cloro ai valori richiesti dalle celle a combustibile si è proposto l'utilizzo di due letti adsorbenti in serie, ad es. uno a zeoliti (Zeolite 13X, materiale meno costoso rispetto ad altri) seguito da un altro a carbone attivo (RGM3).

Per purificare il biogas si può invece utilizzare a valle del sistema anteriore un ulteriore strato del carbone attivo (R1540W), in modo tale da eliminare completamente anche le specie clorate. Questi sistemi, caratterizzati da un elevato rapporto capacità di adsorbimento/costo, possono consentire, combinando opportunamente le capacità adsorbenti dei diversi materiali, di raggiungere le bassissime concentrazioni di zolfo ed alogenati richieste dalle celle a combustibile.

La corretta combinazione di precise quantità dei tre materiali proposti è chiaramente da mettersi in relazione agli specifici casi di pre-trattamento da effettuare.

#### Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Chimica e Alimentare

Le attività dell'Università di Salerno sono relative alla preparazione e caratterizzazione di catalizzatori attivi nei confronti della reazione di reforming autotermico: I campioni sono stati successivamente forniti ad ENEA che ha effettuato prove di attività catalitica.

Nel corso della prima fase di attività è stato condotto un approfondito esame della letteratura che ha permesso di individuare Ni e Pt quali specie attive e  $CeO_2$  quale supporto dei catalizzatori. Questi ultimi sono stati preparati mediante la tecnica dell'impregnazione ad umido del supporto e caratterizzati attraverso diverse tecniche. I risultati hanno mostrato in genere la formazione di una fase NiO sulla superficie dell'ossido di cerio e la formazione di specie  $PtO_x$  molto disperse. Le misure di riducibilità hanno evidenziato che l'aggiunta del platino ad un catalizzatore a base di nichel promuove la riduzione di quest'ultimo attraverso il fenomeno di spillover di idrogeno.

In seguito sono stati preparati catalizzatori strutturati in forma di monoliti di cordierite a nido d'ape da impiegare nella reazione di reforming autotermico del metano. Sulla base di quanto ottenuto nella prima fase dell'attività, sono stati preparati campioni di catalizzatori monolitici realizzando la deposizione di uno specifico washcoat a base di  $CeO_2$ , aggiungendo nichel come specie attiva (carico di Ni 9-15%p), depositato con la tecnica dell'impregnazioni ad umido.

I catalizzatori sono stati provati in un reattore autotermico per la conversione di  $CH_4$  utilizzando gas di sintesi. Si è osservata una conversione di  $CH_4$  mediamente pari a circa 80% con una concentrazione di idrogeno su base secca pari al 30%vol osservata in corrispondenza del più basso rapporto di alimentazione  $O_2/CH_4$ . In particolare, nonostante i bassi valori del rapporto di alimentazione  $H_2O/CH_4$ , in tutte le prove di attività catalitica non sono stati evidenziati fenomeni di formazione di composti carboniosi e di conseguente disattivazione del catalizzatore.



## **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**

Le metodologie di calcolo comunemente 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.

Attualmente in Italia non esiste una normativa definita che consente il calcolo del fabbisogno energetico per il condizionamento degli edifici. 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 1.000 m<sup>2</sup>, tuttavia mancano delle linee guida su come utilizzare detti schermi e sull'influenza che questi hanno sulla illuminazione naturale degli edifici.

Il prodotto dell'attività è una serie di strumenti, quali linee guida, 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 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 uscita delle normative UNI TS 11300 parte I e II rende disponibile una metodologia di calcolo semi-stazionaria 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 10.000 m<sup>3</sup>, che facciano impiego 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 sviluppare l'impiego di strumenti che consentano una corretta progettazione dei sistemi di illuminazione naturale (e dei sistemi schermanti) e artificiali ad alta efficienza.

### **DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ**

L'attività svolta potrà servire come supporto dell'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica e per l'applicazione del DLgs 115/08 di recepimento della direttiva 2006/32/CE sui servizi energetici, in particolare per quanto riguarda lo sviluppo di metodologie di diagnosi energetica e di metodologie di valutazione degli interventi di recupero energetico di edifici pubblici.

L'obiettivo finale è mettere a disposizione del legislatore gli strumenti tecnici (parametri climatici, metodologie di calcolo, tool informatici, parametri caratteristici 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 ha una durata complessiva di 3 anni. Gli obiettivi previsti per il primo erano i seguenti:

#### **A. Aggiornamento Archivio Dati Climatici e Censimento Stazioni Meteo**

Reperimento e aggiornamento di Basi di Dati geo-climatici esistenti. Realizzazione di un archivio dei dati opportunamente elaborati che tengano conto delle grandezze fisiche di temperatura umidità ed insolazione necessari per lo sviluppo della metodologia di calcolo dei carichi termici estivi.

Attualmente sono Enti titolari di stazioni meteo su base nazionale l'UCEA (Ufficio Centrale di Ecologia Agraria), il SIMN (Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale) e il Servizio Climatologia CNMCA (Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica). Altri enti o istituti regionali si sono dotati di una rete di rilevamento meteo. Un recente Censimento, del tutto informale, ha contato in Italia circa 3.037 stazioni meteo elettroniche

(una ogni 99 km<sup>2</sup>) e almeno 4.398 stazioni di tipo meccanico (una ogni 68 km<sup>2</sup>). Questa indagine serve a classificare la qualità delle stazioni meteo, la tipologia dei dati raccolti, la rispondenza alle norme WMO, la loro disponibilità e accessibilità.

## **B. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali**

Analisi e raccolta delle esperienze di ricerca più significative in corso e completate nel recente passato sull'illuminazione, climatizzazione, ventilazione e componenti di involucro efficienti in ambito di progetti nazionali ed internazionali. Supporto al MSE - DG ERM per il coordinamento della partecipazione nazionale.

## **C. Caratterizzazione di materiali e componenti semitrasparenti di facciata**

L'attività consiste nella individuazione delle tipologie e famiglie di prodotti trasparenti ed ombreggianti e nella definizione delle loro proprietà energetiche e luminose più rilevanti.

## **D. Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati**

Analisi statistica per l'individuazione del campione di edifici non residenziali su cui svolgere indagini e monitoraggi. Tali edifici dovranno essere il più possibili rappresentativi, per caratteristiche costruttive (con particolare attenzione ai componenti semitrasparenti) e zona climatica, per poi poterli utilizzare nelle attività di modellazione e simulazione. Tale analisi è completata da uno studio dei consumi dei vari settori terziari per individuare quelli di maggior interesse per determinare il campione per il monitoraggio. E' previsto inoltre lo sviluppo di codici di calcolo semplificati per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici.

## **E. Determinazione dell'influenza dei sistemi semitrasparenti (componente vetrato più elementi schermanti) sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici e interazione condizionamento-illuminazione**

Elaborazione di uno studio parametrico con modelli di simulazione dinamica al fine di definire le raccomandazioni per una progettazione e gestione efficiente dell'ambiente luminoso, sia nel caso di nuovi edifici che nel retrofit.

Sviluppo di sistemi di integrazione permanente (impianti PSALI) o saltuaria dell'illuminazione naturale con quella artificiale. Individuazione dei sistemi di luce artificiale, in termini di apparecchi, di tipologie di sorgenti e loro distribuzione e regolazione, in modo che siano più idonei ad essere integrati con la luce naturale per differenti tipologie di destinazione e caratteristiche degli ambienti. Tale individuazione produrrà la stesura di linee guida per la progettazione dei PSALI e degli impianti ad uso saltuario, che terranno esplicitamente in conto non solo gli aspetti di comfort visivo, ma anche del risparmio energetico analizzando, ove possibili, anche soluzioni di tipo innovativo per ciò che concerne le sorgenti di luce artificiale (led, o-led, illuminazioni biodinamiche ecc. ), le superfici vetrate (elettrocromiche, TIM, basso emissivi ecc.) e i sistemi di controllo della luce (regolazione DDC, close and open loops ecc. ).

# **RISULTATI DELL'ATTIVITÀ**

## **A. Aggiornamento Archivio Dati Climatici e Censimento Stazioni Meteo**

Le attività svolte hanno riguardato:

### Aggiornamento dei dati climatici

L'attività ha prodotto uno studio per la definizione di una metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento degli edifici. Lo studio, svolto in collaborazione con il CTI, contribuisce a colmare alcune delle lacune esistenti nella normativa tecnica e nei documenti tecnici pre-normativi per quanto attiene i dati riguardanti il comportamento termico degli edifici con particolare riguardo al periodo estivo, nelle varie zone del territorio nazionale e per le varie destinazioni d'uso nei comparti terziario ed abitativo. La lacuna più grave è quasi certamente costituita dalla mancanza di dati climatici aggiornati, in quanto, a livello nazionale, nessuno eroga tali informazioni ai fini della normativa energetica. Lo studio si è proposto 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. I temi affrontati sono stati i seguenti:

- sviluppo di una metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. In particolare, il lavoro proposto fornisce una linea guida per determinare i dati necessari per il calcolo del:
  - fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici secondo UNI EN ISO 13790:2008;



- verifica termoigrometriche secondo UNI EN ISO 13788:2003;
- carico termico invernale di progetto (secondo UNI EN 12831);
- carico termico estivo di progetto (secondo UNI EN 15255);
- temperatura interna estiva in assenza di impianto di climatizzazione secondo UNI EN ISO 13791, UNI EN ISO 13792 e UNI 10375;
- reperimento dei dati climatici della regione Lombardia ai fini dell'applicazione della metodologia.

La finalità è la costruzione "dell'anno tipo" e l'aggiornamento della UNI 10349. Ciò al fine di fornire elementi 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 (ISO 15927 – 4).

Il metodo delineato, infine, potrà essere facilmente esteso alle altre regioni italiane, per il completo aggiornamento dei dati climatici nazionali.

La ricerca ha prodotto il documento "Metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento degli edifici" nel quale è anche riportata l'applicazione del metodo alla Regione Lombardia.

#### Sviluppo di un indice di severità climatico estivo

Oggetto dell'attività è stata la definizione di un indice di severità climatica che metta in relazione il fabbisogno di energia termica (frigorie) per il raffrescamento degli edifici e la verifica, mediante simulazioni, della congruità della relazione confrontando il fabbisogno di energia calcolato secondo normativa con quello stimato attraverso l'indice di severità climatica. Tale indice è necessario alla classificazione del territorio in zone climatiche estive e per definire i valori limite dei consumi energetici per il raffrescamento estivo in relazione alle caratteristiche dell'involucro. In particolare, il lavoro si è articolato nelle seguenti attività:

- *Sviluppo di un modello analitico-empirico per il calcolo dell'indice di severità del clima*

Il lavoro è sintetizzato nel rapporto "Un approccio razionale alla definizione delle zone climatiche di un territorio per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione degli edifici: dai gradi -giorno invernali agli indici di severità climatica "all weather", sviluppato dal ENEA.

- *Definizione dell'indice di severità climatica estivo*

L'obiettivo è stato di proporre, sulla base di un modello analitico- empirico sviluppato e proposto da ENEA, un "fattore integrale" capace di mettere in relazione le condizioni climatiche di una data zona con i consumi energetici per il raffrescamento estivo. Tale fattore integrale è definito indice di severità climatica estivo, può essere messo in relazione ai consumi energetici per la climatizzazione estiva mediante una funzione che tenga conto delle caratteristiche costruttive di un dato involucro edilizio.

- *Simulazione numerica per il confronto del fabbisogno termico estivo (frigorie) stimato mediante l'indice di severità climatica con quello valutato mediante normativa di riferimento*

Considerando una certa casistica di riferimento che contempli sia differenti tipologie edilizie, sia differenti condizioni climatiche (zone climatiche) è stato confrontato, per ciascuna combinazione, il fabbisogno termico calcolato analiticamente con quello stimato mediante l'indice di severità climatica. Tale confronto consente di valutare l'attendibilità, il grado di approssimazione ed i limiti del modello proposto.

#### **B. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali**

Le attività svolte nell'ambito di questo tema di ricerca nel 2008 hanno riguardato la partecipazione agli Implementing Agreements della Agenzia Internazionale dell'Energia relativi a: Solar Heating and Cooling; Energy Conservation in Building and Community Systems; Photovoltaic Power Systems; Wind Turbine Systems. In particolare le attività svolte in ciascun IA sono riportate nei seguenti paragrafi. Una descrizione più estesa dei risultati ottenuti è disponibile nei rapporti relativi ai singoli gruppi di lavoro.

##### "Energy Conservation in Building and Community Systems"

L'Agreement su questo tema è attivo dal 1976 e ad esso partecipano oggi 23 paesi inclusa la Commissione Europea. L'Italia è rappresentata dall'ENEA nel Comitato Esecutivo. ENEA ha partecipato direttamente ai lavori della Annex 42 (FC+COGEN-SIM) e sta partecipando all'avvio dell'Annex 52 (Net Zero Energy Buildings). Nel corso

degli anni, sono stati definiti oltre 40 annessi, di questi, 8 sono in corso, 2 sono stati completati nel corso dell'ultimo anno e 2 sono in fase di preparazione.

- Partecipazione alla Annex 42 FC+Cogen SIM

Scopo dell'Annex è stato quello di individuare sia i sistemi disponibili per la cogenerazione di piccola taglia per applicazioni nel residenziale, sia mettere a disposizione modelli di simulazione dinamica di tali sistemi (celle a combustibile, motori a combustione interna, motori Stirling). Questi modelli sono stati implementati sui sistemi di simulazione quali TRNSYS e SimuLink ed hanno consentito la realizzazione di studi parametrici per la definizione delle condizioni ottimali di impiego di detti sistemi nel campo dell'edilizia residenziale.

Uno di questi sistemi (motore a combustione interna) è stato utilizzato per uno Studio sulle prestazioni di sistemi di cogenerazione in diversi climi italiani (*Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in different Italian climatic zone*). Un altro studio (*Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in Southern Italy*) ha utilizzato alcune test facilities per la simulazione di sistemi di microcogenerazione. I risultati degli studi indicano vincoli e limiti della convenienza dell'impiego di diverse tecnologie di microcogenerazione in ambito residenziale, sia dal punto di vista energetico- ambientale che economico, caratterizzati in base alle condizioni climatiche. Il primo studio infatti mette a confronto i risultati ottenibili in 4 delle sei zone climatiche italiane (B, C, D, E). I report sono pubblicati sul sito dell'Annex, raggiungibile dal sito dell'Implementing Agreement [www.ecbcs.org](http://www.ecbcs.org).

- Partecipazione alla Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings”.

Scopo dell'Annex è quello di indagare le prestazioni di componenti edilizi innovativi (denominati elementi “responsivi”, che consentano una efficace integrazione tra l'involucro, gli elementi strutturali e l'impianto. L'Annex ha prodotto uno stato dell'arte e sta per realizzare una guida alla progettazione di questo tipo di componenti. L'integrazione degli elementi responsivi e dei sistemi energetici nella progettazione integrata degli edifici porta a numerosi vantaggi:

- l'integrazione degli elementi responsivi con i sistemi energetici porta a un sostanziale miglioramento nelle prestazioni ambientali e nei costi;
- sfrutta la qualità delle sorgenti energetiche (exergia) e stimola l'uso di fonti energetiche rinnovabili e sorgenti energetiche secondarie (quali calore sprecato, calore residuo ecc.);
- migliora le possibilità di un accumulo passivo e attivo dell'energia;
- integra principi architettonici nella progettazione integrata di edifici;
- gli elementi responsivi portano a una maggiore integrazione delle tecnologie in relazione agli occupanti dell'edificio e ai loro comportamenti;
- migliora lo sviluppo di nuove tecnologie e elementi nei quali sono combinate più funzioni nello stesso elemento costruttivo;
- conduce a una migliore comprensione dei principi di progettazione integrata tra gli architetti e gli ingegneri

È stato redatto uno stato “stato dell'arte dei componenti adattativi e dei concetti integrati” (tipologie, tecnologie, classificazione, metodi di analisi e verifica delle prestazioni).

È in corso di redazione un “manuale sui componenti adattativi integrati”, destinato principalmente ai progettisti (specie quelli esperti nel settore dell'energetica edilizia e/o della fisica dell'edificio, progettisti termotecnici) in cui si presentano i risultati della ricerca effettuata. Si sta preparando una “guida informativa sui componenti adattativi integrati”, volta a tecnici e progettisti non specializzati, costruttori e utenti (tradotto dall'inglese in italiano).

- Partecipazione all'Annex 45: “Energy efficient electric lighting for buildings”

Lo scopo principale dell'Annex è individuare e dare impulso alla diffusione delle tecnologie energeticamente efficienti per l'illuminazione artificiale ad alta qualità, e la loro integrazione con tutto ciò che riguarda il sistema edificio-impianto, rendendo così tali tecnologie la soluzione da preferire per i progettisti illuminotecnici, i proprietari e gli utilizzatori.

Tale scopo è stato perseguito attraverso la caratterizzazione e documentazione delle prestazioni tecniche di tecnologie innovative promettenti e già esistenti, ma ancora poco utilizzate, e di tecnologie future (o in fase di pre-commercializzazione), e il loro impatto sugli altri aspetti del sistema edificio-impianto, come i sistemi HVAC e la progettazione con la luce naturale. Questo approccio alla progettazione e realizzazione degli impianti di illuminazione artificiale deve comunque soddisfare le necessità funzionali ed estetiche degli ambienti, e di benessere degli occupanti.

Altro obiettivo fondamentale di questo Annex è mostrare le barriere che limitano l'impiego di tali tecnologie innovative, esistenti e future (vincoli legislativi, tecnici, economici, fattori di rischio, resistenze al cambiamento, ecc.), con lo scopo di proporre delle soluzioni per superarle, consentendo l'affermazione a livello anche commerciale di tali soluzioni innovative.

Le attività dell'annex 45 sono ripartite in quattro subtask:

- A. Targets for energy performance and human well-being
- B. Innovative technical solutions
- C. Energy-efficient controls and integration
- D. Documentation and dissemination.

Il compito della subtask A è quello di documentare le conseguenze della progettazione e gli obiettivi in termini di impegno energetico, qualità visiva, benessere dell'uomo e prestazionale, e di fornire esempi di buona progettazione.

ENEA e Università di Roma hanno partecipato a questa attività fondamentalmente di analisi dello stato dell'arte delle conoscenze e delle normative presenti in ambito internazionale, attraverso una costante informazione sulle attuali normative vigenti e sulle novità introdotte o in via di discussione in ambito europeo in campo energetico-illuminotecnico.

Il compito della subtask B è quello di identificare, caratterizzare e documentare i criteri prestazionali, di efficienza energetica ed economici delle tecnologie di illuminazione promettenti attualmente esistenti e di quelle innovative future, ed il loro impatto sugli altri impianti relativi all'edificio. L'obiettivo è quello di ridurre l'impegno energetico degli edifici analizzando il potenziale risparmio energetico che si ottiene dal confronto di tecnologie esistenti e future, applicando le conoscenze teoriche e progettuali, e quelle relative ai prodotti e alle soluzioni illuminotecniche.

L'analisi delle soluzioni tecniche riguarda la fornitura di energia, le sorgenti di illuminazione, gli apparecchi illuminanti e le teorie per la regolazione. ENEA e Università di Roma hanno partecipato attivamente a questo sub task, attraverso un intenso lavoro di raccolta informazioni, di ricerca e di misura, testimoniati dalla presenza di paragrafi e capitoli all'interno del "Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings", edito dalla Prof. L. Halonen (Operating Agent dell'Annex) e dal Dr. E. Tetri, (Helsinki University of Technology, HUT) risultato dei 4 anni di lavoro da parte del gruppo di lavoro internazionale. L'Handbook è ad oggi ancora in fase di completamento, per cui è possibile che i paragrafi indicati siano soggetti a delle piccole modifiche nel testo, o nella posizione all'interno del volume.

La Subtask C è orientata allo studio dei controlli e delle regolazioni che rendono possibile all'utilizzatore, e a colui che si occupa della gestione del sistema di interagire con l'impianto di illuminazione, in funzione delle necessità e delle preferenze individuali, comunque rimanendo all'interno di condizioni di funzionamento soddisfacenti per l'edificio in termini di risparmio energetico. Questi controlli dovranno essere integrati con gli altri impianti dell'edificio (luce naturale, impianto di condizionamento, ecc.). Interazioni e scambi di dati tra i vari componenti del sistema di regolazione e controllo (come sensori, attuatori ed elementi elettronici di regolazione) sono gli aspetti chiave delle strategie di controllo.

L'ambito di lavoro del subtask D è relativo al miglioramento delle attuali tendenze progettuali illuminotecniche, in modo da accelerare la diffusione e l'uso di prodotti energeticamente efficienti, da incrementare le prestazioni energetiche globali degli edifici, e di aumentare la soddisfazione degli occupanti dal punto di vista del comfort visivo e ambientale. Scopo del subtask è stato quindi quello di raccogliere, rendere omogenei e diffondere i risultati di ricerca degli altri subtask, e di individuare gli strumenti per influenzare le politiche energetiche e le normative vigenti, per promuovere l'impiego dell'illuminazione artificiale energeticamente efficiente.

▪ Partecipazione all'Annex 46 "Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings (EnERGo)"

Le attività sono svolte prevalentemente nell'ambito della Subtask B dell'Annex (volte a stimare i vantaggi dati dall'adozione delle diverse Energy Conservation Measures - ECM): in questo quadro sono state eseguite le seguenti attività:

- è stato definito lo schema delle schede descrittive degli edifici sui quali condurre le indagini sui consumi
- sono stati individuati i file climatici medi rappresentativi del territorio nazionale
- sono stati individuati i prezzi medi nazionali dell'energia, al fine di assegnare costi unitari di riferimento per le analisi economiche relative all'adozione delle ECM.

- sono stati individuati alcuni casi studio di retrofit esemplare realizzati sul territorio nazionale, di cui sono state prodotte le relative relazioni descrittive (draft reports)
- è stata condotta un'indagine-pilota negli ambienti interni ai ventisette edifici del Campus Leonardo, Bonardi, Bassini e Golgi Clericetti del Politecnico di Milano
- sono state redatte le relazioni descrittive (draft reports) delle seguenti ECM.

▪ Partecipazione all'Annex 48 "Heat pumping and reversible air conditioning"

Le attività sono state svolte nelle seguenti subtask:

- Subtask 1: Analysis of building heating and cooling demands and of equipment performances (Task leader: Francia)  
L'attività (Classificazione delle diverse tipologie di edifici; Caratterizzazione dei sistemi di condizionamento dell'aria; Uso di modelli di simulazione per identificare le migliori potenzialità di impiego delle pompe di calore) è stata pressoché completata.

- Subtask 2: Progettazione (Task leader: Germania)  
Sono stati prodotti dal Task Leader successive versioni del manuale di progettazione, che contiene informazioni sulle metodologie di progetto e sulle tipologie di impianti maggiormente utilizzate in Italia.

- Subtask 4: Case studies and demonstrations (Task leader: Italia)  
Sono stati sviluppati i "template" per la documentazione dei casi studio:
  - presentazione powerpoint per riunioni e convegni;
  - scheda sintetica descrittiva del caso-studio;
  - rapporto dettagliato sul lavoro svolto.

Sono stati inoltre avviati due casi studio italiani che riguardano: un impianto a pompa di calore reversibile aria-aria a fluido refrigerante del tipo "Variable Refrigerant Flow", recentemente installato in un edificio storico sede della Regione Piemonte.

- Subtask 5: Dissemination (Task leader: Francia)  
E' stato attivato il Sito Web del progetto, in cui sono disponibili i documenti prodotti e le pubblicazioni. E' stato realizzato un workshop di presentazione dei risultati del progetto in occasione della riunione di lavoro che si è svolta a Lione il 6-7 ottobre 2008.

▪ Partecipazione all'Annex 49 "Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities".

Le attività dell'annex 49 proseguono i risultati ottenuti nell'ambito della IEA ECBCS Annex 37 (*low exergy systems for heating and cooling of buildings*) sul tema dell'efficienza exergetica per i sistemi di *heating* e *cooling* per l'ambiente costruito. L'assunto di partenza resta quello che il livello exergetico utile al soddisfacimento delle esigenze di *heating* e *cooling* è molto basso, dato che la temperatura desiderata si colloca in un intervallo molto ristretto e prossimo alla temperatura ambiente. Nonostante ciò, per soddisfare tali esigenze vengono impiegate fonti fossili e di alta qualità energetica. Scopo dell'annex 49 è pertanto 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.

Le attività dell'annex 49 sono ripartite in quattro subtask:

- A. *Exergy analysis methodologies*
- B. *Exergy efficient community supply systems*
- C. *Exergy efficient building technologies*
- D. *Knowledge transfer and dissemination.*

### Solar Heating and Cooling

Il Programma è stato istituito nel 1977 e ad esso partecipano oggi 18 paesi più la Commissione Europea. L'Italia è rappresentata dall'ENEA nel Comitato Esecutivo. ENEA ha partecipato direttamente ai lavori della Task 18 (Advanced Glazing Materials for Solar Applications) e Task 27 (Performance of Solar Facade Components).

Nel corso degli anni, sono stati definiti oltre 42 annessi, di cui 8 ancora in corso. Due nuove task sono attualmente in fase di preparazione.

▪ Partecipazione alla Task 38: “Solar Assisted Cooling Systems”

L'ambito del Task 38 si colloca nel settore delle tecnologie per la produzione di acqua fredda o di aria condizionata alimentate termicamente attraverso calore solare, cioè, sono oggetto del Task i componenti che trasformano la radiazione solare che arriva al collettore in acqua fredda e/o aria condizionata fornita all'applicazione.

Nonostante il sistema di distribuzione sia un elemento chiave, l'edificio e la interazione dello stesso con l'impianto non è l'argomento principale del Task38; tuttavia, questa interazione sarà trattata là dove necessario. In particolare, per impianti di piccola taglia, che possono fare uso dei collettori solari come unica fonte di calore, il sistema complessivo edificio impianto è esaminato in modo da ottimizzarne il rendimento complessivo. Il Task comprende anche il raffreddamento solare per applicazioni diverse da quelle che riguardano la climatizzazione di aria, cioè, per processi industriali e altre applicazioni (ad esempio, conservazione di alimenti).

I Subtask includono attività denominate verticali ed orizzontali

- 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 Market transfer.

Le attività del gruppo italiano hanno riguardato essenzialmente i seguenti punti:

- Raccolta e sistematizzazione dei dati e definizione di indicatori prestazionali adatti ad impianti DEC. Tali indicatori sono riportati nella procedura condivisa da tutti i partecipanti al task (Subtask B)
- Sistematizzazione del monitoraggio delle prestazioni degli impianti esistenti mediante protocolli di misura e definizione di indici di prestazione (Subtask B)
- Analisi delle prestazioni ambientali dei sistemi di Solar Cooling. L'analisi è stata condotta seguendo un approccio di “ciclo di vita” (Life Cycle Assessment – LCA), in conformità agli standard internazionali della serie ISO 14040 (Subtask D).

### Photovoltaic Power Systems

▪ Partecipazione alla Task 1 “Exchange and dissemination of information on PV power systems”: unico di natura orizzontale, è centrato sulla raccolta, lo scambio e la diffusione di informazioni tecniche (tecnologie, applicazioni) e non tecniche (mercato, politiche, barriere, programmi). La partecipazione è obbligatoria per tutti i Paesi che hanno sottoscritto l'Accordo. Nell'ambito di questa Task sono stati prodotti i rapporti “National Survey Report on PV Power Application in Italy” e “Trends in Photovoltaic Applications”.

▪ Partecipazione alla Task 2 “Performance, reliability and analysis of PV systems”: è finalizzato all'analisi delle prestazioni degli impianti e alla messa a punto di strumenti per la progettazione di sistema e per la formazione di personale, previa archiviazione delle informazioni di progetto e di funzionamento, su una base di dati appositamente sviluppata. In questo contesto, ENEA raccoglie e analizza i dati di progetto e di funzionamento di alcuni fra i principali impianti pilota realizzati in Italia, che vengono immessi nella base dati dell'IEA. È stata inoltre realizzata la raccolta di casi studio su educational tools fra i vari paesi partecipanti. Sulla base degli elementi raccolti ha sviluppato e messo a punto strumenti didattici per la progettazione d'impianti fotovoltaici.

▪ Partecipazione alla Task 8 “Very large scale PV power generation systems”

▪ Partecipazione alla Task 10 “Urban scale PV applications”: divenuto completamente operativo nel 2004 come follow up del Task 7, è volto a rendere massime le opportunità per un effettivo largo ricorso alla tecnologia fotovoltaica in ambito urbano mediante la diffusione e la semplificazione d'uso dei principali strumenti, sia di progettazione impiantistica e architettonica, sia di valutazione economica, tecnica e funzionale del tipo di applicazione selezionata. Il piano di lavoro del Task tiene anche conto dell'ottimizzazione dell'efficienza energetica nelle strutture edilizie. La partecipazione italiana è tornata ad essere attiva dopo un periodo di incertezza. Si è deciso di assumere una posizione di leadership su alcune attività lasciate sguarnite. Nel 2008 a seguito di fondi stanziati e dell'ingresso del GSE il gruppo italiano si è quindi riposizionato. Si era pensato anche di avanzare una richiesta di leadership del subtask “Barriers”.

Al meeting di Sydney la rappresentanza italiana, composta da Tilli (GSE) e Pellegrino (ENEA) ha presentato il lavoro in corso di svolgimento sulle barriere in Italia, comprendenti il questionario, i primi risultati, le elaborazioni dello stesso e gli approfondimenti su singole barriere condotti con interviste alle utilities (Enel), istituti di credito e assicurazioni. Pellegrino dell'ENEA ha presentato un approfondimento sullo smaltimento (decommissioning) degli impianti, sulla tassazione in Italia e sulla certificazione.

Durante il meeting tenutosi a Roma è stato presentato un nuovo PVPS task intitolato PV-CUSP or PV - as a Conventional Urban Source of Power. Questo possibile nuovo task dovrebbe comprendere alcuni argomenti di sviluppo ed approfondimento quali:

- la penetrazione del FV e le possibilità di sviluppo
- sinergie con la rete e le future smart grids
- meccanismi di finanziamento e drivers economici
- training
- municipalizzazione delle utilities
- immagazzinamento dell'energia solare
- mappe solari
- dati energetici su area urbana.

#### Wind Turbine Systems

Come membri del Comitato Esecutivo, si è partecipato alla pubblicazione di un Rapporto Annuale, che è disponibile sul sito [www.ieawind.org](http://www.ieawind.org) e che viene diffuso in un certo numero di copie cartacee tra gli operatori eolici italiani. Questi possono così disporre di una sintesi aggiornata degli sviluppi del settore eolico internazionale che sarebbe difficile reperire altrove. Nel corso delle riunioni semestrali del comitato esecutivo sono stati illustrati i risultati conseguiti negli annessi ultimati e gli obiettivi raggiunti o, in corso di conseguimento, negli altri ancora in essere, con ampio dibattito riguardo l'opportunità di continuare o meno le attività appena concluse. La presenza dell'Italia nell'annesso XI è formalizzata dall'iscrizione del CESI, che si assume l'onere della quota di partecipazione, ma si concretizza anche con l'impegno dell'ENEA attraverso un'opera di sensibilizzazione e stimolo degli operatori nazionali e delle università a approfondire un impegno maggiore nella condivisione dei lavori sulle tematiche d'interesse comune e nella frequenza ai seminari relativi proposti dai partecipanti all'annesso. Recentemente è stato approvato il prolungamento di un anno dell'annesso relativo alla tecnologia offshore. In considerazione della rilevanza di tale tematica nel contesto nazionale e delle competenze presenti nel settore industriale dell'estrazione del gas e del petrolio, che si avvale per l'esplorazione ed estrazione delle risorse in mare aperto di piattaforme, si è ritenuto opportuno di continuare a stimolare gli operatori del settore a partecipare ai lavori in corso fornendo loro tutte le informazioni disponibili senza ottenere, per il momento, risultati apprezzabili. Altri annessi in corso di attivazione riguardano il costo dell'energia eolica e gli aerogeneratori di piccola taglia, mentre ulteriori proposte di attivazione di annessi che hanno concluso il periodo previsto riguardano la progettazione e gestione dei sistemi di energia che contemplano una notevole immissione di energia da fonte eolica e l'analisi delle misure nella galleria del vento. Nella prima riunione semestrale sono stati presentati dai vari membri i risultati più significativi conseguiti nello sviluppo dei progetti nazionali, lo stato delle attività di ricerca nel settore, i finanziamenti erogati per tali attività e gli obiettivi da conseguire. Nella seconda sono invece stati segnalati l'evoluzione del mercato, il tasso di crescita e le prospettive di sviluppo a breve e medio termine. Un altro argomento trattato nel corso delle presentazioni autunnali, relativo alle diverse forme di supporto in essere nei paesi membri, ha evidenziato l'ampiezza delle differenze esistenti, in termini legislativi e finanziari, con gli effetti conseguenti sul mercato del settore. E' stato predisposto, come tutti gli anni, il rapporto annuale 2007, completo di tutte le informazioni e dati relativi ai paesi partecipanti all'*Implementing Agreement*. L'analogo rapporto, relativo al 2008, è stato inoltrato alla fine di febbraio 2009.

- Partecipazione alla Annex 11: "Base Technology information exchange": è una Task trasversale, dedicata allo scambio di informazioni, alla diffusione e alla sensibilizzazione presso gli operatori del settore delle attività svolte dall'*Implementing Agreement*.

#### **C. Caratterizzazione di materiali e componenti semitrasparenti di facciata**

Le attività sulla caratterizzazione dei materiali trasparenti si sono focalizzate sull'integrazione del componente trasparente con i sistemi schermanti al fine di valutare i benefici ottenibili in termini di comfort visivo e risparmio energetico per la climatizzazione estiva: nel documento che riporta i risultati della ricerca, sono presentati gli aspetti legati alla caratterizzazione dei sistemi trasparenti e schermanti innovativi attraverso opportuni strumenti e procedure di misura. In particolare, sono riportati i risultati su una serie di sistemi innovativi, che possono essere utilizzati dagli utenti come dati di input in strumenti di calcolo dedicati o come linee guida nella scelta dei sistemi trasparenti in relazione alle caratteristiche ed alla destinazione d'uso dell'edificio. È inoltre presentato lo sviluppo di un tool dedicato al calcolo delle proprietà luminose, solari e termiche di sistemi trasparenti integrati con elementi schermanti.

Le attività si sono incentrate su:

- Analisi sperimentale su materiali schermanti e componenti assemblati. L'obiettivo di questa attività era di verificare le caratteristiche ottiche di un numero di elementi schermanti per verificare:
    - Le modalità di trasmissione/riflessione della luce naturale e della radiazione solare, al fine di cominciare a realizzare un piccolo database di materiali e stabilire dei criteri di scelta di questi prodotti per applicazioni in diversi tipi di edifici
    - La possibilità di controllo dei fenomeni di abbagliamenti per gli utenti. I sistemi trasparenti devono necessariamente essere integrati con sistemi schermanti di vario tipo. Sono state eseguite delle misure sul componente integrato per verificare che le modalità di riflessione/trasmissione del componente non dessero permettessero il controllo delle luminanze e dunque dell'abbagliamento
    - Influenza sulle prestazioni energetiche degli edifici, vedi punto seguente.
  - Analisi numerica indirizzata alla valutazione delle prestazioni luminose ed energetiche a livello di edificio a partire dai risultati ottenuti nella fase precedente. L'attività si è snodata su tre linee:
    - Analisi numerica di distribuzione della luce naturale in ambiente con finestre equipaggiate con elementi schermanti diversi per qualità e quantità della luce naturale trasmessa. Sono stati considerati, infatti, degli schermi con comportamento prevalentemente diffondente e moderati livelli di riflessione, e degli schermi con comportamento prevalentemente speculare ed elevati livelli di riflessione. Dall'analisi è possibile evincere dei criteri per la scelta dei sistemi più idonei
    - Analisi numerica integrata con calcolo dei consumi per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione artificiale in edifici per uffici, con differenti caratteristiche in termini di località, orientamento, strategia di controllo dei sistemi schermanti. Sono stati utilizzati dei codici di calcolo dinamici, in grado di valutare in modo accurato fabbisogni e consumi dell'edificio. Per gli elementi semi-trasparenti è stato possibile implementare diverse strategie di controllo (manuali ed automatiche), con le quali è possibile valutare la configurazione del sistema di facciata sui consumi termici ed elettrici
    - Sviluppo di un sistema di calcolo per i sistemi trasparenti: l'idea di base era la possibilità di realizzare uno strumento di calcolo per la verifica delle proprietà solari, luminose e termiche dei serramenti che realizzasse due condizioni fondamentali:
      - essere intuitivo e semplice nella gestione, affinché possa essere utilizzato anche da utenti non esperti. La rilevanza sempre maggiore del problema energetico in edilizia ha portato la necessità di affrontare questi problemi anche ad utenti non specializzati: si pensi ai periti agrari che possono essere abilitati alla figura di certificatore energetico per gli edifici, piuttosto che operatori nel campo dei serramenti, del vetro, dei sistemi ombreggianti.
      - implementare le norme di riferimento per i componenti di involucro trasparente.
- Sono tuttavia sorti dei problemi di conflitto tra i due punti precedenti. Alcune delle norme in esame utilizzano i dati spettrali dei singoli materiali. Utilizzare input di questo tipo avrebbe però reso lo strumento pesante e meno gestibile dagli utenti. Per ovviare a questo problema si è deciso di mantenere gli algoritmi di calcolo delle norme, utilizzando per i valori integrati piuttosto che quelli spettrali. Questo può portare a delle variazioni sui risultati finali, variazioni contenute però in differenze accettabili, come verificato in un'ampia casistica di test di controllo.
- Il tool consta di due moduli fondamentali: il calcolo della trasmittanza termica del componente finestrato ed il calcolo delle proprietà luminose e solari della parte trasparente integrata con elementi schermanti.
- Si è cercato di semplificare l'interfaccia quanto più possibile, la soluzione adottata è quella di associare un oggetto all'interno della schermata ad una tipologia di materiale. L'utente può selezionare un materiale nuovo attraverso un pulsante o semplicemente trascinarlo da un database di prodotti esistenti, i dati necessari per il calcolo sono quelli nei campi di ciascun oggetto. Questi ultimi sono:
- elemento trasparente;
  - gas;
  - intercapedine;
  - elemento schermante;
  - progetto trasparente.



Una serie di valori sono inseriti nei database del programma, essi provengono da prodotti industriali, così come dichiarati in documenti di dominio pubblico, oppure da valori di riferimento suggeriti dalle norme di riferimento.

Il tool esegue i calcoli soltanto se tutti i campi sono compilati in modo corretto, in caso contrario compaiono dei warning con riferimento ai campi mancanti. La versione attuale dello strumento ha un piccolo report di misura nel quale sono inseriti le principali grandezze calcolate. Lo strumento, calcolando il fattore solare g con e senza schermi, fornisce all'utente i dati da utilizzare per il calcolo del fattore solare corretto secondo la norma UNI TS 11300.

#### **D. Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati**

Nell'ambito di questo obiettivo sono state svolte le seguenti attività:

- analisi statistica del settore alberghiero
- analisi statistica del parco immobiliare ad uso ufficio
- determinazione di un set di edifici tipo ad uso ufficio
- indagine sui consumi e potenziale di efficientamento del settore direzionale pubblico
- analisi della implementazione della EBPD in vari paesi europei e dei modelli di calcolo utilizzati e comparazione a quanto disponibile in Italia (UNI 11300) su un set di casi di riferimento

##### Analisi statistica del parco edilizio non residenziale

###### ■ Indagine statistica sul settore Alberghiero

È stata realizzata una statistica sul parco edilizio del settore alberghiero per categoria e ubicazione geografica, standard costruttivi del sistema edificio impianto, stima dei consumi energetici per il condizionamento invernale ed estivo e ricostruzione dei profili orari del fabbisogno di energia termica e frigorifera attraverso modelli di calcolo semplificati.

###### ■ Indagine sul settore Uffici

È stata realizzata una indagine statistica sulla caratterizzazione del parco immobiliare ad uso Ufficio. L'indagine si è concentrata sugli edifici totalmente dedicati ad uso ufficio, scartando quindi tutti le situazioni per le quali si potesse evidenziare un uso promiscuo. L'indagine ha rivelato che la maggior parte degli uffici sono localizzati per l'appunto in edifici con uso promiscuo. Gli edifici totalmente dedicati ad uso ufficio in Italia sono quindi circa 65.000, distribuiti per il 24,9% al nord ovest, per il 20,6% al nord est, per 17,8% al centro, per il 22,7% al sud e per il 13,9% nelle isole.

L'indagine ha consentito di caratterizzare il segmento, dettagliando i risultati per:

- Periodo di costruzione
- Zona geografica
- Zona climatica
- Zona demografica

È stato possibile ricostruire le caratteristiche di edifici tipo, nei quali sono dettagliate le caratteristiche relative a:

- Involucro
- Tipologia di impianto e tipo di combustibile adottato
- Percentuale di superficie trasparente.

Si è quindi proceduto con l'estrapolazione di un set di edifici tipo per ciascuna zona climatica di ciascuna zona geografica, che verranno utilizzati nelle annualità seguenti per determinare, mediante i modelli di simulazione messi a disposizione sia in questo tema di ricerca, che nel tema 5.4.7.8, il consumo di energia del settore specifico, al fine di determinare i benchmark e di individuare le potenzialità, i costi e la fattibilità tecnico economica degli interventi di retrofit da incentivare.

###### ● Indagine su interventi di efficientamento del direzionale pubblico

L'indagine statistica sull'edilizia per uffici ha anche permesso di estrapolare il dato relativo agli edifici pubblici direzionali, che sono circa 14.000, concentrati per la maggior parte nelle prime 16 provincie. Sulla base di questa indagine è stato condotto uno studio sui consumi di questa tipologia di edifici e sul potenziale di miglioramento della efficienza energetica. Lo studio ha permesso di valutare un potenziale di risparmio energetico di oltre il 20% rispetto ai consumi attuali, che producono una bolletta energetica pari a 430 M€ per il solo settore uffici: il

risparmio ottenibile è valutato in 97 M€, raggiungibile intervenendo su circa il 35 % degli edifici esistenti. Il campione di edifici sui quali intervenire va individuato in base alla comprovata necessità di interventi di manutenzione straordinaria comunque da effettuare. L'ammontare della spesa per gli interventi su questa tipologia di edifici pubblici è di circa 1,76 M€.

### *Modelli semplificati*

È stata realizzata una rassegna dello stato di recepimento della EPBD – Direttiva europea sull'efficienza energetica in edilizia – tra i diversi Paesi della UE. Le principali procedure di calcolo adottate per la certificazione energetica degli edifici in alcuni paesi (Austria, Francia, Germania, Inghilterra, Portogallo e Spagna) sono state approfondite ed applicate per comparazione, accanto a quella italiana, ad edifici-tipo del contesto climatico italiano. Il confronto tra le diverse potenzialità date dai metodi e/o modelli considerati nell'analisi ha consentito di evidenziare possibili implementazioni procedurali da proporre a livello nazionale.

L'indagine ha visto l'applicazione dei metodi di calcolo adottati nei paesi europei selezionati (utilizzando fogli di calcolo/tools di libero accesso, verosimilmente più utilizzati nella prassi professionale ricorrente) a due edifici residenziali (monofamiliare e plurifamiliare) ed una palazzina del terziario (uso uffici), confrontandone i risultati con quelli ottenuti in applicazione delle più recenti norme nazionali italiane UNI/TS11300. Agli edifici-tipo sono state assegnate caratteristiche di involucro differenziate, al fine di valutare la sensibilità dimostrata da ciascuna metodologia di bilancio nel considerare gli effetti della capacità termica, considerati i risultati evidenziati nella fase precedente, contrapponendo ad una stratigrafia di involucro "standard". I confronti tra le diverse metodologie di calcolo sono stati risolti in riferimento ai fabbisogni termici dell'edificio, eludendo le attribuzioni impiantistiche che riconducono alla stima dei consumi energetici. Tale strategia, coerente con la prioritaria importanza da attribuirsi alla prestazione passiva dell'edificio (responsabile delle attribuzioni impiantistiche), ha consentito di contenere il numero delle perturbazioni influenti gli esiti delle analisi da confrontare.

Per l'applicazione della procedura italiana, gli edifici sono stati considerati in una località climatica del nord Italia (Milano), allo scopo di concertare mediamente risultati di ordine di grandezza proporzionato a quello dei risultati ottenuti in applicazione delle procedure contemplate delle altre nazioni europee.

In ragione dell'analisi delle diverse metodologie di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici e dei risultati emersi a seguito della loro applicazione, una proposta di modello di calcolo semplificato per implementare una procedura nazionale non può eludere le considerazioni seguenti:

- qualunque sia il modello di calcolo, è indispensabile definire un set di parametri di input che non lasci ampia discrezionalità di scelta all'utente, al fine di garantire coerenza di confronto sui risultati dei diversi edifici sottoposti a certificazione
- i carichi interni e i ricambi d'aria da considerare nel bilancio energetico dell'edificio assumono un ruolo fondamentale nella determinazione dei fabbisogni termici, in particolar modo durante la stagione estiva e distinguendo la fase diurna da quella notturna
- le procedure di assegnazione della capacità termica dell'edificio di prima approssimazione possono rivelarsi lacunose per alcune morfologie edilizie e per determinate tecnologie costruttive.

Ciò premesso, si prefigurano due possibili approcci: da un lato emerge la possibilità di affinare opportunamente le procedure di bilancio energetico di derivazione CEN, traducendole in strumenti semplici ma efficaci (anche assimilabili a fogli elettronici, quale quello austriaco) nel rispetto dei requisiti precedentemente citati, dall'altro lato risulta percorribile lo sviluppo di un software che, come nel caso spagnolo, consenta di avvalersi delle potenzialità date dai codici di calcolo complessi (che risolvono l'analisi energetica del sistema edilizio in regime dinamico, con l'opportunità di assegnare le caratteristiche impiantistiche modulate secondo curve di funzionamento) tramite un'interfaccia semplificata che contempli impostazioni parametriche appositamente vincolate (come previsto dalla procedura portoghese).

### **E. Determinazione dell'influenza dei sistemi semitrasparenti (componente vetrato più elementi schermanti) sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici e interazione condizionamento-illuminazione.**

Nell'ambito di questo obiettivo sono state svolte le seguenti attività:

- rassegna della normativa europea e nazionale nel campo della efficienza della illuminazione e dell'utilizzo di sistemi di illuminazione naturale
- rassegna di strategie e componenti per l'efficienza energetica della illuminazione:

- illuminazione artificiale
- integrazione luce naturale ed artificiale
- sistemi di controllo
- rassegna di metodi di calcolo
- calcolo della influenza delle prestazioni dell'involucro trasparente sui consumi per illuminazione e climatizzazione.

## **PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI**

### **Dipartimento DREAM dell'Università di Palermo**

Il DREAM ha collaborato alle attività del Subtask B del *task 38 "Solar Air Conditioning and Refrigeration"* che si concentra sugli interventi che mirano a favorire lo sviluppo dei sistemi del raffrescamento solare di potenza media - alta (> 20 kW potenza frigorifera). Lo scopo delle attività è di superare gli ostacoli tecnici, per una sempre maggiore applicazione di questo tipo di sistemi.

Sempre in ambito IEA il Dipartimento ha partecipato alla definizione di procedure standardizzate per l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) di impianti di solar heating e cooling.

### **Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano**

Il Dipartimento di Energetica ha partecipato alle attività della Task 38 del IA *"Solar Heating and Cooling"* della IEA e nell'ambito dell'obiettivo D del progetto ha condotto uno studio sulla caratterizzazione energetica del settore alberghiero in Italia.

### **Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università La Sapienza di Roma**

Il gruppo partecipa all'Annex 45 della IEA organizzato dall'ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems) dal titolo *"Energy Efficient Electric Lighting for Buildings"*, rappresentando assieme all'ENEA il contatto chiave per l'Italia. Nell'ambito dell'Annex, è stato portato avanti un lavoro di raccolta informazioni, di ricerca e di misura, i cui risultati sono stati riportati all'interno del Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings.

Sono stati inoltre eseguite attività all'interno dell'obiettivo E finalizzato alla determinazione dell'influenze dei sistemi semitrasparenti sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici.

### **Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino**

L'attività svolta dall'unità di ricerca del Politecnico di Torino nell'ambito dell'Annex 44 *"Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings"* (Subtask A) è finalizzata allo studio, sviluppo e ottimizzazione di componenti adattativi e di concept, strumenti e procedure per la loro integrazione nel sistema edificio-impianto. Contributi del Politecnico di Torino erano previsti anche nell'ambito dell'Annex 48 *"Heat pumping and reversible air conditioning"*.

Nell'ambito dell'Obiettivo E del progetto, sono state inoltre attività di ricerca connesse allo sviluppo di modelli di modelli e tecnologie per l'integrazione luce naturale e luce naturale,

### **Dipartimento BEST del Politecnico di Milano**

Il Dipartimento ha partecipato all'Annex 46 ECBCS *"Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings (EnERGo)"* e ai lavori del gruppo di esperti IEA dell'Annex 49 *"Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities"*.

Nel quadro dell'obiettivo D *"Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati"* è stato condotto uno studio che ha riguardato lo stato d'avanzamento del recepimento della EPBD nei principali Paesi europei nonché il reperimento dei principali metodi e/o modelli di calcolo per la certificazione energetica degli edifici.

### **Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Padova**

Esperti del Dipartimento di Fisica Applicata hanno partecipato ai gruppi di lavoro dell'Annex 49 IEA *"Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities"*.

### Università IUAV di Venezia

Il Dipartimento partecipa ai lavori del gruppo di IEA dell'Annex 49 "Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities".

### Stazione Sperimentale del Vetro

SSV è impegnata nello sviluppo di un software per il calcolo delle proprietà luminose e solari di dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate, basato sulla norma EN13363-2:2006.

### ITC

ITC, nell'ambito dell'obiettivo relativo alla caratterizzazione di materiali e componenti semitrasparenti di facciata (Ob. C) ha svolto attività che hanno riguardato prove su materiali e componenti di facciata e l'allestimento del set up di prova.



## Sviluppo di linee guide ed indici di riferimento per il legislatore

La normativa sull'efficienza energetica degli edifici e la regolamentazione per l'impiego delle fonti rinnovabili e il mercato della generazione distribuita sono in continuo sviluppo. Attualmente in Italia non esistono elementi di riferimento affidabili e test per la valutazione dei consumi energetici degli edifici distinti per categorie e il miglioramento dell'efficienza. Per quanto riguarda il sistema elettrico, non esistono studi organici e modelli di valutazione che forniscano al legislatore le informazioni necessarie per un'azione più incisiva sull'efficienza lato produzione, distribuzione e usi finali e sugli aspetti legati all'evoluzione delle reti verso le smart grid.

Le normative europee sull'efficienza energetica degli edifici, in particolare la direttiva 2002/91/CE e i DLgs di recepimento 192/05 e 311/06, richiedono, per la loro efficace attuazione, un'approfondita analisi del sistema edificio/impianto. Diventa pertanto necessario disporre di dati e informazioni per indirizzare la governance verso scelte mirate al raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei consumi e delle emissioni di gas climalteranti, per i quali il nostro Paese si è impegnato.

### DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività, attraverso studi mirati alla ottimizzazione del sistema edificio-impianto, intende 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 ed indirizzino le scelte programmatiche e strategiche per il raggiungimento degli obiettivi sul risparmio energetico e la riduzione delle emissioni dei gas serra.

Le attività del progetto prevedono:

- la definizione degli indici e dei livelli di consumo attuali (benchmark), distinti per le diverse destinazioni d'uso, tipologie edilizie, condizioni climatiche e d'impiego
- lo sviluppo di modelli di valutazione del sistema elettrico nazionale che preveda l'integrazione dei sistemi edificio/impianto finalizzata alla generazione distribuita di energia.

Il progetto si articola nei seguenti obiettivi:

#### A. Analisi della normativa vigente in ambito nazionale ed europeo

Analisi della normativa vigente in ambito nazionale ed europeo in materia di efficienza degli usi finali dell'energia e servizi energetici, con approfondimento specifico degli aspetti relativi a incentivi e ostacoli per la diffusione delle fonti di energia rinnovabili e della generazione distribuita.

#### B. Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici

L'obiettivo prevede la definizione di indici e livelli di fabbisogno energetico di edifici con diverse destinazioni d'uso: scuole, alberghi, uffici, centri commerciali, ospedali e residenziale.

#### C. Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati

Indagine statistica dei consumi energetici attuali classificati secondo tipologia edilizia, zona climatica e destinazione d'uso.

#### D. Creazione di un database di sistemi e tecnologie di generazione distribuita

- Individuazione dei sistemi di microgenerazione e acquisizione di schede tecniche dei componenti e dei parametri prestazionali
- Individuazione dei sistemi di fonti rinnovabili, acquisizione di schede tecniche dei componenti e dei parametri prestazionali.

## RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

In questa sezione si riporta lo stato di attuazione delle singole linee di attività dei progetti, in relazione agli obiettivi realizzativi previsti. Si riportano in sintesi i dati ed i risultati più significativi delle attività e per maggiori approfondimenti si rimanda ai documenti tecnici disponibili sul sito ENEA.

Una nota di carattere generale riguarda le difficoltà che si sono incontrate nell'ambito delle singole ricerche nel reperimento dei dati per la consistenza del parco immobiliare del civile non residenziale e sui dati di consumo reali degli edifici. In virtù di questa situazione si è proceduto su due impostazioni di lavoro che hanno determinato l'utilizzo di codici di simulazione dinamica e, ove possibile, il reperimento di dati di consumo reale. Il confronto dei risultati delle simulazioni e dei dati da "bolletta" ha fornito utili indicazioni che hanno evidenziato la necessità di approfondire le analisi sugli aspetti gestionali del sistema edificio-impianto e sulla necessità di svolgere audit energetiche negli edifici. Il caso più significativo è il raffronto, negli edifici ad uso uffici, tra i dati di consumo da simulazione e quelli rilevati da bolletta energetica.

### A. Analisi della normativa vigente in ambito nazionale ed europeo

La normativa, anche a seguito dell'emanazione del DLgs 115/08 di recepimento della direttiva 32/2006/CE, è in un periodo di continui sviluppi e aggiornamenti, che determinano situazioni difficili da seguire alla luce di quanto le Regioni hanno in essere. Per dare una concretezza alle attività si è impostato il lavoro facendo riferimento allo stato dell'arte seguendo due linee di attività:

- la **prima** riguarda la raccolta e l'analisi dei provvedimenti legislativi e normativi collegati al settore dell'energia elettrica: se ne valutano punti deboli e opportunità non ancora adeguatamente sfruttate in grado di portare ad un miglioramento dell'efficienza lato produzione, trasporto e distribuzione e usi finali;
- la **seconda** investe la definizione di indicazioni sulle caratteristiche del mercato della generazione distribuita e sugli aspetti legati all'evoluzione delle reti verso le smart grid.

I risultati dell'analisi hanno evidenziato le criticità relativamente alla mancanza di una politica energetica chiara e coerente, capace di rispondere alle debolezze proprie del Paese (dipendenza dall'estero oltre l'85%, scarso sviluppo delle fonti alternative ai combustibili fossili, carente diffusione di tecnologie a migliore efficienza energetica diffuse in altri paesi, dimensione e capitali delle imprese mediamente limitati e scarsa capacità di attrarre investimenti esteri, etc).

Altro aspetto importante investe la necessità di avere un quadro stabile di regole con forti e indirizzi sulle politiche per una fiscalità energetica intelligente e sullo sviluppo di strumenti di credito bancario adatti a favorire lo sviluppo di imprese nel settore dell'efficienza e delle rinnovabili.

Nella presentazione del quadro normativo nazionale di riferimento sono evidenziate le gerarchie che il quadro normativo è tenuto a considerare, dal comunitario al nazionale al regionale e così a seguire, le diverse tipologie dei provvedimenti, i principali attori del processo decisionale e le fonti di informazione e di aggiornamento, che, vista la velocità con cui i provvedimenti e le regole vengono aggiornate, è indispensabile consultare per potersi orientare nel mercato.

### Le motivazioni alla base della liberalizzazione del mercato elettrico

Il passaggio da un mercato monopolistico ad uno in buona parte liberalizzato e concorrenziale è derivato da fattori diversi e contemporanei: la globalizzazione e la dematerializzazione dell'economia, la volontà economica e politica degli stati membri dell'Unione europea di creare un mercato unico (il cosiddetto single market) regolato da norme comuni, la ricerca di schemi di sviluppo caratterizzati da una fiscalità ridotta e semplificata, la maggiore attenzione posta agli aspetti ambientali ed allo sviluppo sostenibile e così via. L'Unione Europea, fra le varie possibilità di apertura del mercato disponibili, ha scelto di liberalizzare la domanda e dell'offerta, richiedendo nel contempo il libero accesso alle reti di trasporto. La liberalizzazione del settore vuole creare concorrenza fra gli operatori che, invogliati a migliorare l'efficienza degli impianti per ridurre il costo marginale di produzione dell'elettricità, possono meglio difendersi sul mercato.

Ci sono inoltre delle problematiche che derivano da fattori peculiari del settore elettrico. Si annotano gli ingenti investimenti necessari per realizzare le reti di trasporto dell'energia, ad esempio, richiedono una regolamentazione ed un'attività di indirizzo da parte delle Autorità preposte e dei Governi, per favorire quegli interventi ritenuti essenziali per lo sviluppo ed il miglioramento del servizio.



Un altro aspetto che richiede un indirizzo ed una regolamentazione adeguata è il tema della diversificazione delle fonti energetiche impiegate nella generazione di energia e l'eliminazione di barriere per le fonti rinnovabili ed assimilate. Negli ultimi anni si è assistito ad una crescita molto forte del gas naturale, solo parzialmente bilanciata dalla diminuzione dell'utilizzo del carbone, mentre è calato velocemente il consumo di olio combustibile.

Nella definizione del quadro di riferimento sugli aspetti normativi sono stati esaminati in modo approfondito gli aspetti salienti che investono i principali temi del settore quali:

- la liberalizzazione del mercato elettrico;
- la borsa elettrica;
- la liberalizzazione del mercato del gas naturale;
- I meccanismi che determinano le tariffe dei combustibili, le implicazioni nella ripartizione dei costi e i loro prezzi di mercato.

#### *GLI ORGANISMI E GLI ATTORI NEL SETTORE DELL'ENERGIA*

I Ministeri e gli organismi decisionali coinvolti nel settore dell'energia sono:

##### Ministero dello Sviluppo Economico (MSE)

Il Ministero dello Sviluppo Economico oltre all'attività di indirizzo nei confronti dell'Autorità e del settore energetico in generale, concede le concessioni ai distributori ed emana le convenzioni tipo nell'ambito delle concessioni nazionali. Esso rilascia inoltre la VIA per gli impianti termoelettrici di potenza termica superiore ai 300 MW, in base alla procedura semplificata attivata dalla Legge 9 aprile 2002, di concerto con il Ministero dell'Ambiente.

##### Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATM)

Il Ministero dell'Ambiente, oltre all'attività di indirizzo nei confronti dell'Autorità e del settore energetico in generale, è responsabile delle attività di indirizzo in campo ambientale, partecipa insieme al MSE alla formazione di provvedimenti in campo energetico e rilascia la VIA per gli impianti termoelettrici di potenza termica superiore ai 300 MW, in base alla procedura semplificata attivata dalla Legge 9 aprile 2002, di concerto con il Ministero dello Sviluppo Economico.

##### Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas (AEEG)

L'Autorità ha il compito di controllare e regolamentare i settori dell'energia elettrica e del gas. Fra le sue competenze rientrano le tariffe per il mercato vincolato, la definizione degli standard di qualità del servizio, la determinazione degli aspetti connessi alla separazione contabile ed amministrativa delle attività, l'informazione e la trasparenza, nonché la formulazione di pareri e segnalazioni sulle forme di organizzazione del mercato. L'Authority è inoltre il soggetto incaricato di individuare le linee guida per il funzionamento del meccanismo dei titoli di efficienza energetica. L'intensa attività normativa può essere visionata nel sito internet dell'AEEG.

#### *Attori principali del mercato elettrico*

##### Gestore dei Servizi Elettrici (GSE)

Il Gestore dei Servizi Elettrici, già Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale e Gestore del Sistema Elettrico, dal 2005 ha un ruolo centrale nella gestione, promozione e incentivazione delle fonti rinnovabili e cogenerazione in Italia, rilasciando la garanzia d'origine, la qualifica IAFR (Impianto Alimentato a Fonti Rinnovabili), i certificati verdi e la tariffa omnicomprensiva, i certificati RECS e gestendo l'incentivazione in conto energia per il fotovoltaico, lo scambio sul posto e il conto energia. Il nome corrente è in vigore da ottobre 2006.

##### Gestore del Mercato Elettrico (GME)

Il Gestore del Mercato Elettrico è una società per azioni controllata dal GSE che ha il compito di assicurare il funzionamento del mercato elettrico e, in particolare della borsa dell'energia e di quelle per la compravendita dei certificati verdi, dei titoli di efficienza energetica e delle unità di emissione. Il Gestore ha inoltre attivato una piattaforma per lo scambio delle quote di emissione nel nostro Paese.

##### Acquirente Unico (AU)

L'Acquirente Unico è una società per azioni controllata dal GSE. I suoi compiti consistono nello stipulare e gestire i contratti di fornitura per i clienti del mercato vincolato, approvvigionandosi attraverso varie modalità (contratti bilaterali, aste, borsa, importazioni, etc). L'energia acquistata viene ceduta ai distributori e da questi ai clienti vincolati. Si tratta di un soggetto previsto dalla direttiva comunitaria di liberalizzazione del mercato, ma creato ed attivato solo nel nostro Paese.

### *Le reti nazionali*

#### Terna - Rete Elettrica Nazionale spa

È la società responsabile in Italia della trasmissione e del dispacciamento dell'energia elettrica sulla rete ad alta e altissima tensione su tutto il territorio nazionale. L'assetto attuale è il risultato dell'acquisizione, nel mese di novembre 2005, del ramo di azienda del GRTN come definito dal DPCM 11 maggio 2004.

#### SNAM Rete Gas

È la società del gruppo ENI che è il principale operatore in Italia per il trasporto e il dispacciamento del gas naturale, nonché l'unico operatore italiano per la rigassificazione di GNL (gas naturale liquefatto).

Vengono riportati anche gli enti e i principali soggetti che sono coinvolti nel settore tra cui:

#### Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile (ENEA)

L'ENEA è l'ente di stato incaricato di condurre attività di ricerca e di supportare la Pubblica Amministrazione centrale e locale sui temi dell'energia e l'ambiente. L'ente conduce svariate attività ed è coinvolto in numerosi progetti nazionali ed europei.

#### Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA -ex APAT)

L'ISPRA è l'Istituto incaricato di svolgere un supporto operativo al Ministero dell'Ambiente relativamente ai temi ambientali. Essa coordina le Agenzie regionali (ARPA) nello svolgimento di tali attività.

Associazioni di settore fra cui si distinguono:

- le associazioni di categoria, che curano gli interessi di gruppi particolari, (es. Confindustria, -Assoelettrica, Federutility, Federgasacqua, Assotermica, ANIE, APER, Italcogen, Cogena, Assosolare, Assolterm, Fiper, Gifi);
- le associazioni tecnico-scientifiche e le Fondazioni, che promuovono buone pratiche nel settore dell'energia, come le fonti rinnovabili e l'efficienza energetica, e collaborano con le istituzioni per attivare iniziative atte a favorire tali pratiche (es. FIRE, ISES Italia, Kyoto Club, AIEE, Fondazione ENI, Fondazione Energia ecc.);
- gli organi normativi, che si occupano dello sviluppo della normativa tecnica (es. UNI, CEI, CTI).

### *Produttori di energia elettrica*

Si tratta delle persone fisiche o giuridiche che generano energia elettrica, indipendentemente dalla proprietà dell'impianto.

### *Produttori di gas naturale*

Per quanto riguarda il gas naturale, le attività di produzione sono andate calando a partire dalla metà degli anni Novanta. Attualmente la quota nazionale è scesa sotto il 15% e si appresta a raggiungere il 10% del fabbisogno.

Gli attori coinvolti in tale attività sono indicati in Tabella 48.

**Tabella 48. Produzione di gas naturale in Italia nel 2007**

| Società                  | M, m <sup>3</sup> | Quota %      |
|--------------------------|-------------------|--------------|
| Gruppo Eni               | 7.875             | 86,2         |
| Gruppo Edison            | 674               | 7,4          |
| Gruppo Royal Dutch Shell | 340               | 3,7          |
| Gruppo Gas Plus          | 236               | 2,6          |
| Altri                    | 6                 | 0,1          |
| <b>TOTALE</b>            | <b>9.132</b>      | <b>100,0</b> |
| TOTALE (Fonte: MSE)      | 9.706             | -            |

Fonte: Elaborazione AEEG su dichiarazioni degli operatori

Collegata all'attività di produzione è quella di stoccaggio; essa si serve di giacimenti ormai esauriti, oltre alla capacità insita nella rete di trasporto e consente di operare un'ampia modulazione per venire incontro alle esigenze della domanda. Quest'azione viene svolta essenzialmente da ENI ed Edison.

*Distributori, grossisti e clienti*

## Distributori

Le attività di distribuzione dell'energia elettrica e del gas naturale, essendo monopoli naturali, sono svolte su concessione dello stato (le prime) e degli Enti Locali (le seconde). I distributori sono responsabili dell'allacciamento degli utenti, sia idonei, sia vincolati, e del servizio di misura. Sono sottoposti ad un regime di incentivi e penalità, introdotto dall'AEEG, per garantire livelli standard di qualità commerciale e di continuità di servizio sulle proprie reti. I maggiori distributori sono inoltre sottoposti all'obbligo di realizzare interventi inerenti all'uso razionale dell'energia presso l'utenza, al fine di ridurre i consumi in energia primaria secondo obiettivi fissati dai decreti sull'efficienza energetica.

## Grossisti

Sono le persone fisiche o giuridiche che acquistano e vendono energia elettrica e/o gas naturale senza esercitare attività di produzione e distribuzione all'interno dell'Unione Europea.

## Clienti idonei

I clienti idonei erano gli utenti non domestici che, essendo stati autorizzati a scegliere liberamente il fornitore, hanno lasciato il mercato vincolato. Dal 1 luglio 2007, tutti i clienti elettrici hanno facoltà di scegliere liberamente il proprio fornitore, mentre dal 2004 tale possibilità ha riguardato gli utenti dotati di partita IVA. Dal 2003 sono clienti potenzialmente idonei tutti gli utenti del mercato del gas naturale. Per ora pochi utenti di piccola taglia hanno optato per sfruttare tale opportunità.

### Clienti tutelati

Nel mercato elettrico, i regimi di maggior tutela e salvaguardia sono dei regimi creati per “tutelare” appunto quei clienti prima “vincolati”, diventati idonei a decorrere dal 1° luglio 2007, quando si è conclusa l’ultima fase del processo di liberalizzazione. L'erogazione del servizio per i clienti finali domestici non riforniti di energia elettrica sul mercato libero è garantita dall'impresa di distribuzione, anche attraverso apposite società di vendita, mentre la funzione di approvvigionamento continua ad essere svolta dall'Acquirente Unico Spa di cui all'articolo 4 del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79. Le imprese connesse in bassa tensione, aventi meno di 50 dipendenti e un fatturato annuo non superiore a 10 milioni di euro sono comprese nel regime di tutela attraverso il regime di salvaguardia. Nel mercato del gas naturale, la liberalizzazione si è conclusa nel 2003; i clienti che non hanno deciso di passare al mercato libero, sono riforniti alle condizioni economiche definite dall'Autorità; per i soli clienti domestici è inoltre previsto che, anche in caso di cambio del fornitore, sia sempre possibile ritornare alle condizioni di fornitura definite dall'AEEG. I clienti domestici e i clienti con consumi ridotti (fino a 200.000 metri cubi l’anno) che non passano al mercato libero continuano ad essere riforniti dallo stesso venditore che li riforniva al momento della liberalizzazione, a condizioni e prezzi regolati.

## ESCO E SERVIZI ENERGETICI

La realizzazione di azioni per il miglioramento dell'efficienza energetica richiede competenze ed esperienza. Sono infatti necessari una diagnosi, che individui le richieste energetiche dell'azienda o dell'edificio (presenti e, possibilmente, future) e le opportunità di intervento offerte dalla recente tecnologia adattabili alla situazione in esame; un'analisi di fattibilità tecnico-economico-finanziaria dei possibili progetti individuati, ed un'opera di convincimento dei decisori. In alcuni casi, come per la Pubblica Amministrazione, interventi interessanti sono difficili da implementare per la carenza di fondi; rispetto alle esigenze complessive, poi, l'energia occupa molto

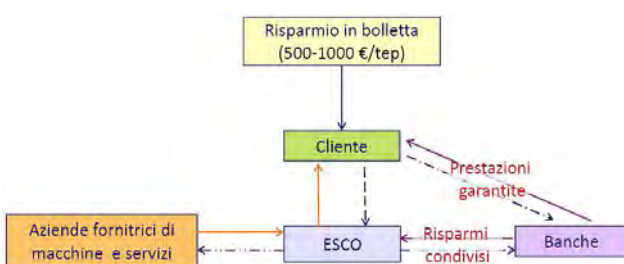


**Figura 115. Possibili schemi di intervento di una ESCO: prestazioni garantite o risparmi condivisi**

spesso un ruolo solo secondario. Queste caratteristiche sono alla base del concetto di ESCO (Energy Service Company) e di finanziamento tramite terzi.

Per ESCO, in sostanza si intendono società che operano nel settore dell'energia offrendo servizi integrati all'utente - progettazione, installazione, manutenzione e gestione degli impianti - in una logica di energy performance contracting e di finanziamento tramite terzi e come funziona quali attività deve svolgere e le aree di intervento.

Riferendosi alla Figura 115, la ESCo interviene presso

l'utente realizzando le opere individuate nell'ambito di una diagnosi energetica e stipula un contratto per la manutenzione e gestione degli impianti. L'utente gira tutto o parte del risparmio alla ESCo (si tratta di circa 500-1000 €/tep a seconda del settore di appartenenza, riferendosi i valori più alti al settore civile ed alle piccole imprese artigiane), che si ripaga in tal modo dei costi sostenuti per l'intervento e delle spese per la manutenzione e gestione degli impianti, garantendosi un adeguato utile.

#### *ESCO e decreti sull'efficienza*

I decreti ministeriali 20 luglio 2004 sull'efficienza energetica aprono importanti spazi di azione per le ESCo, in quanto ne fanno il soggetto principe per la realizzazione di interventi e per l'ottenimento di titoli di efficienza energetica. A tale proposito, va chiarito che l'Autorità ha introdotto una definizione di società di servizi energetici che non vuole essere un'alternativa di quella del D.Lgs. 115/08 precedentemente data. Semplicemente, l'aver indicato tali società come quelle che presentano come oggetto sociale, anche non esclusivo, l'offerta di servizi integrati per la realizzazione e l'eventuale successiva gestione di interventi, dà un criterio semplice per determinare quali soggetti possono accedere al meccanismo dei decreti citati. Interessante notare che le società di servizi accreditate presso l'Autorità nell'ambito del meccanismo dei certificati bianchi si configurano come ESPCO, ma non necessariamente come ESCO. Questo aspetto ha rappresentato comunque una causa di confusione per il mercato, in quanto molti soggetti poco seri si sono affrettati a richiedere l'accreditamento per essere inseriti nell'elenco curato dall'Autorità, in modo da potersene "vantare" in pubblico. Onde evitare malintesi, il Regolatore ha sospeso la pubblicazione dell'elenco stesso, decidendo di dare evidenza solo alle società che abbiano effettivamente ottenuto dei titoli e si siano dunque dimostrate attive.

#### *I servizi energetici*

Il D.Lgs. 115/08 definisce il servizio energetico come "la prestazione materiale, l'utilità o il vantaggio derivante dalla combinazione di energia con tecnologie ovvero con operazioni che utilizzano efficacemente l'energia, che possono includere le attività di gestione, di manutenzione e di controllo necessarie alla prestazione del servizio, la cui fornitura è effettuata sulla base di un contratto e che in circostanze normali ha dimostrato di portare a miglioramenti dell'efficienza energetica e a risparmi energetici primari verificabili e misurabili o stimabili". In ambito pubblico nel D.Lgs. 115/08 si definiscono le modalità di partecipazione agli appalti pubblici aventi ad oggetto l'affidamento della gestione dei servizi energetici e che prevedono unitamente all'effettuazione di una diagnosi energetica, la realizzazione di progetto in conformità ai livelli di progettazione specificati nell'art. 93 del D.Lgs. 163/06, nonché la realizzazione degli interventi attraverso lo strumento del finanziamento tramite terzi. Il criterio applicato è quello dell'offerta economicamente più vantaggiosa, secondo art. 83 del D.Lgs. 163/06, anche in mancanza di progetto preliminare redatto a cura dell'Amministrazione.

Nella sezione dedicata alla qualificazione dei servizi energetici, all'art. 16 del D.Lgs. 115/08, viene indicato, fra i contratti che possono essere proposti nell'ambito della fornitura di un servizio energetico, il contratto servizio energia. L'allegato II del D.Lgs. 115/08 disciplina gli aspetti fondamentali della materia, ovvero da indicazioni riguardo:

- ai requisiti del fornitore del contratto servizio energia,
- ai requisiti e alle prestazioni minime offerte nell'ambito di un contratto servizio energia
- ai requisiti e alle prestazioni aggiuntive offerte dal contratto servizio energia plus

#### *Il mercato in Italia*

Al momento in Italia sono attive circa una quarantina di realtà che si dichiarano ESCo secondo i parametri definiti dal JRC di Ispra. Fra queste ne spiccano quattro con un fatturato superiore ai 500 M€: la Cofatech, la Siram, la CPL Concordia e la Elyo. A parte la CPL, per la quale i servizi offerti come ESCo costituiscono solo una parte delle attività, le altre tre società operano prevalentemente su grandi appalti nel settore pubblico e nella sanità. In linea di massima si può effettuare una distinzione fra gli operatori in base ai servizi offerti:

- il facility management;
- la cogenerazione;
- l'illuminazione pubblica;
- l'illuminazione d'interni;
- la climatizzazione degli edifici;
- interventi specifici per il settore industriale.

La prima tipologia è tipica dei soggetti molto grandi, mentre le altre sono affrontabili anche dagli altri operatori. Fra gli elementi positivi per lo sviluppo del mercato vanno considerati:

- l'alto costo dei combustibili;
- i DM 20 luglio 2004;
- l'evoluzione del ruolo degli energy manager e la struttura delle PMI italiane;
- la possibile diffusione del concetto di ESCo e di finanziamento tramite terzi nella P.A. e nel settore industriale.

Rimangono alcune problematiche da affrontare, legate fondamentalmente a:

- l'evoluzione della normativa;
- la risposta del sistema bancario all'evoluzione dei mercati;
- la definizione eventuale di protocolli di misura e verifica;
- la definizione di standard di qualità o di sistemi di certificazione per le ESCo. Riferimenti utili per approfondimenti sulle ESCo e sui DM 20 luglio 2004 .

La normativa europea in fase di sviluppo sotto mandato per direttiva 2002/91/CE riguardante le prestazioni energetiche degli edifici e da tempo seguita dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) indica una serie di proposte tra loro alternative per una definizione di fabbisogni energetici degli edifici e per i relativi indici di riferimento.

Quanto contenuto nei progetti di norma europei dovrà essere integrato con documenti normativi nazionali per renderne possibile un'applicazione univoca.

Il CTI partecipa in ambito europeo ai lavori del CEN con gruppi nazionali, i quali hanno già iniziato - da circa due anni - lo studio dei documenti richiesti quale integrazione della normativa europea ed ha nel suo programma studi per la definizione di indici e livelli di consumo, alcuni dei quali già in avanzato stato di sviluppo. In questo quadro e con l'attività svolta in questo Studio, il CTI ha definito degli indici di fabbisogno per i vari centri di consumo energetici degli edifici ad uso alberghiero facendo riferimento, nella fase iniziale, a edifici di varia geometria.

In particolare sono stati:

- individuati e caratterizzati di tre edifici adibiti ad uso alberghiero con diversa organizzazione degli spazi, differenti carichi interni e un diverso numero di camere;
- analizzati i singoli edifici attraverso simulazioni dinamiche;
- valutati i relativi fabbisogni energetici e consumi di energia primaria disaggregati in relazione alle principali voci che compongono il bilancio energetico (riscaldamento, condizionamento, ventilazione, ecc.).

#### Analisi di tre edifici ad uso alberghiero diversi per tipologia dell'involucro e dell'impianto al fine di definire degli indici di consumo energetico di riferimento

Nelle simulazioni del presente studio, sono state considerate le località climatiche di Milano, Roma e Palermo, come rappresentative delle principali condizioni climatiche medie del territorio italiano ed i cui dati climatici sono stati desunti dalle norme di riferimento nazionali per la caratterizzazione del clima o dati di letteratura ove necessario.

Sono stati considerate tre tipologie alberghiere, con diverse geometrie, le quali come tipologia e forma, caratteristiche costruttive, stratigrafie di componenti per l'involucro opaco con valori di trasmittanza congrui con il DLgs 192/05 e modelli d'uso possono rappresentare, da un punto di vista medio, tipici edifici, dello scenario edilizio italiano.

Il campione esaminato riguarda le tre tipologie alberghiere di 50 e 100 camere collocate a Roma, Milano e Palermo e la tipologia edilizia "speciale" ( $S/V=0,5 \text{ m}^{-1}$ ) collocata anch'essa in località Roma, Milano e Palermo. Per le simulazioni è stato utilizzato il SW EnergyPLUS versione 3.0.

Sono stati sviluppati i calcoli dinamici per una serie di edifici alberghieri con 50 camere posizionati nelle tre località scelte. Gli edifici differiscono per geometria, in particolare l'edificio "a.1" ha una geometria in linea, l'edificio "a.2" a torre, l'edificio "a.3" ad "L". Inoltre è stato studiato un edificio con rapporto  $S/V=0,5$  che rappresenta una tipologia ad "L".

Dai dati ottenuti è risultato che il fabbisogno di energia primaria totale (riscaldamento ed elettricità) espresso in  $\text{kWh/m}^3$  è limitato per tutte e tre le tipologie. Nella pratica si varia per i fabbisogni invernali tra circa 6,5 a 24  $\text{kWh/m}^3$ , mentre quelli estivi si aggirano per tutti i casi sui 5,5  $\text{kWh/m}^3$ , quindi totali annui variabili tra circa 12 e 30

kWh/m<sup>3</sup>. Il contenimento è dovuto al forte isolamento imposto (trasmittanze termiche al 2010), al notevole apporto solare attraverso le strutture vetrate e ai forti carichi interni negli edifici.

Di fatto lo studio dei fabbisogni energetici in condizioni ante L.373 evidenzia fabbisogni invernali variabili tra circa 11 e 40 kWh/m<sup>3</sup>, fabbisogni estivi variabili tra circa 7 e 5 kWh/m<sup>3</sup>, quindi fabbisogni totali annui variabili tra circa 18 e 45 kWh/m<sup>3</sup>. Ciò corrisponde, rispetto alla situazione attuale di legge, a valori superiori di circa il 50%

I risultati evidenziano come il comportamento invernale degli edifici sia più influenzato dal rapporto S/V rispetto a quanto succede nel comportamento estivo, soprattutto per climi relativi a zone D ed E. Si nota inoltre che la zona climatica influenza molto i consumi fino ad incrementare il fabbisogno energetico di 3-4 volte, nonostante le buone prestazioni dell'involucro.

Per quanto riguarda i fabbisogni di energia utile l'edificio a torre risulta avere il valore più basso seguito dall'edificio in linea e per ultimo l'edificio con S/V=0,5.

Sono stati sviluppati i calcoli dinamici per la successiva serie di edifici alberghieri da 100 camere posizionati nelle stesse località. Gli edifici differiscono per geometria, in particolare l'edificio "b.1" ha una geometria in linea, l'edificio "b.2" a torre e l'edificio "b.3" ad "L".

Dalle analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni si può affermare, non commettendo un grande errore, che i fabbisogni di energia utile espressi in kWh/m<sup>3</sup> non differiscono da quelli riscontrati per le 50 camere.

Si può desumere quindi che le osservazioni fatte relativamente al caso di edifici con 50 camere sono applicabili agli edifici con 100 camere.

## **B. Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici**

Da un'indagine svolta sul territorio nazionale, presso i soggetti interessati al tema, si è constatato che attualmente in Italia non si dispone di dati sui consumi energetici degli edifici del settore non residenziale né di dati che caratterizzino il parco edilizio di questo settore, eccezion fatta per i dati di consumo di energia elettrica del GRTN, aggregati però per macrosettore, ed alcuni studi svolti da alcune Università, ma in ambiti ristretti, per caratterizzare tipologie edilizie di alcuni sottosettori come alberghi, ospedali ed altro.

Oltre a questi aspetti il settore del non residenziale si differenzia nei sottosettori, per le singole destinazioni d'uso, caratteristiche edilizie, esigenze e dotazioni impiantistiche, profili di utenza e di consumo, normative di funzionamento e logistica ed altro diverse per le singole destinazioni d'uso e che determinano acquisizione dei dati specifici per ogni sotto settore. Da una ricognizione fatta presso le proprietà di grandi o piccoli complessi si è constatata la difficoltà oggettiva di svolgere tale lavoro.

Sulla base delle conoscenze di ENEA dei dati forniti dal CRESME, sono state individuate in una prima fase le tipologie edilizie di riferimento per i sotto settori: uffici, scuole, centri commerciali, ospedali e alberghi.

Si è quindi proceduto secondo questo schema:

- Individuare un numero rappresentativo di tipologie e su queste, tramite codici di calcolo dinamici, determinarne il fabbisogno energetico per gli usi più ricorrenti: condizionamento invernale, condizionamento estivo, illuminazione;
- Sulle tipologie edilizie individuate, svolgere la simulazione per le singole fasce climatiche, eccetto la zona A, valutando il comportamento dell'edificio per le principali esposizioni e confrontando i dati con quelli che si riusciranno a reperire dalla letteratura tecnica o con interviste specifiche per sottosettore.

La metodologia applicata è stata la seguente:

- a. Sulla base delle conoscenze a disposizione determinare il numero di edifici "campione" di riferimento, a livello nazionale, e su questi svolgere, utilizzando codici di simulazione dinamiche, valutazioni sui fabbisogni energetici;
- b. definire le caratteristiche di involucro più ricorrenti;
- c. avviare una indagine per acquisire dei dati di consumo per alcuni edifici, il più possibile rispondenti a quelli campione definiti, in modo da poter avere un conforto dei dati simulati;
- d. determinare degli indicatori di riferimento (ad es. per gli alberghi kWh/posto letto, per le scuole kWh/alunno, per gli ipermercati e per gli uffici kWh/m<sup>3</sup>, ecc.);
- e. ottenere delle valutazioni per dati il più possibile disaggregati (riscaldamento, condizionamento, illuminazione ecc.);

- f. per le simulazioni, operare in modo da svolgere le valutazioni energetiche, utilizzando gli edifici campione precedentemente definiti, in tre località di riferimento. Le località scelte sono state: Milano per la zona climatica E, Napoli, per la zona climatica C, Palermo per la zona climatica B.

## CARATTERIZZAZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI NAZIONALI DELLE STRUTTURE AD USO UFFICIO

La caratterizzazione degli assorbimenti energetici negli edifici ad uso ufficio ha avuto luogo secondo due direttrici principali: una di raccolta dati, l'altra di elaborazione dati.

### Raccolta dati

In fase istruttoria, è immediatamente sorta la necessità di conoscere lo “stato” del sistema. Come “stato” non si intende soltanto la quantità di energia utilizzata, ma anche l'andamento temporale degli assorbimenti, nonché le caratteristiche degli impianti e delle condizioni di fornitura. Al fine di richiedere agli EMs la fornitura di dati tra loro omogenei, è stato messo a punto interattivamente un questionario di raccolta dati, che mirasse all'ottenimento di informazioni realmente significative. Come era da attendersi, lo studio ha condotto non soltanto alla generazione del questionario, ma anche – e soprattutto – alla identificazione delle principali grandezze di interesse ed ai livelli di difficoltà nell'ottenerli. In estrema sintesi, sono state individuate due categorie di dati. I primi sono quelli che identificano l'utenza (dati primari); i secondi, di seguito definiti secondari, permettono una caratterizzazione ed una agglomerazione a granularità più fine (ove richiesta) ma non modificano significativamente le grandezze integrali e di conseguenza non hanno effetti significativi su quelle medie.

I dati ritenuti di primaria importanza sono i seguenti:

- consumo elettrico annuo espressi in kWh;
- consumo termico, annuo espressi in quantità (m<sup>3</sup> o litri) di combustibile;
- numero di dipendenti della struttura;
- superficie della struttura;
- localizzazione geografica (zona climatica).

La conoscenza di questi valori risulta essenziale ai fini dell'individualizzazione di un indicatore di consumo. Come si discuterà nel seguito, la mancata conoscenza di uno di essi, per un dato edificio e/o complesso, porta necessariamente alla non-considerazione del campione in esame.

I dati ritenuti di secondaria importanza sono quelli relativi a:

- involucro edilizio;
- destinazione d'uso;
- tipo di urbanizzazione della zona;
- effettiva occupazione dei locali in ore/uomo per anno (ad esempio, struttura adibita a lavoro individuale oppure struttura adibita a rapporti con il pubblico oppure base operativa per struttura di manutenzione dalla quale i lavoratori escono per recarsi a mantenere sedi esterne).

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.

### Questionario

La fase operativa della ricerca è iniziata con la stesura del questionario da sottoporre agli EMs, nel quale si tenesse conto di tutti i parametri d'interesse sopra citati.

Il questionario riporta in ordine prima i dati primari, e poi i dati secondari. Per una migliore stesura si è effettuato un approccio iterativo di successive approssimazioni convergenti: il questionario è stato infatti preventivamente concordato con gli EMs di alcune grandi società di servizi operanti sul territorio nazionale, con il fine esplicito e quindi dichiarato agli interlocutori di affinare la ricerca e condividere i dati.

La richiesta di informazioni del questionario è stata strutturata in maniera tale da richiedere dati facilmente reperibili e misurabili, anche per chi non avesse una specifica formazione tecnica.

Nel questionario sono state inserite voci atte a reperire eventuali informazioni sui suddetti carichi eccezionali per poterli incorporare; in questa maniera si fornisce una corretta valutazione legata esclusivamente ai carichi attribuibili al normale uso ufficio, oggetto di questa ricerca.

Nella fase di coordinamento si è rilevata la necessità di redigere anche una versione ridotta del questionario per la P.A., a causa della scarsa collaborazione riscontrata e delle difficoltà strutturali incidenti sulla fase di raccolta dati.



### Esito della raccolta dati

Al fine di ottenere sul territorio nazionale un campione correttamente distribuito e rispondente alla realtà, come prima scelta, si è deciso di contattare sia Enti pubblici che privati. 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 diversa a seconda dalla natura dell'ente contattato e del tipo di servizio erogato. In particolare, le maggiori difficoltà sono state riscontrate nei rapporti con gli enti pubblici. Probabilmente, ciò è dovuto al fatto che in tali strutture non viene condotta una politica di gestione dell'energia e, quindi, non vi è all'interno alcuna struttura operativa interessata al problema energetico e comunque delegata al reperimento ed alla gestione dei dati di consumo.

Viene di seguito riportato l'elenco delle sole organizzazioni che hanno risposto alla richiesta di collaborazione e quindi contribuito al progetto di ricerca:

- Autostrade S.p.A;
- Consip S.p.A.;
- S. Giovanni Addolorata Azienda Ospedaliera;
- Poste Italiane S.p.a;
- R.F.I. S.p.A.;
- Tiscali S.p.A.;
- Trenitalia S.p.A.;
- Università Sapienza;
- Wind S.p.A.

La risposta alla operazione di raccolta dati, sia presso enti pubblici che privati, ha avuto un esito decisamente negativo. L'assistenza e la disponibilità risultano scarse. Il rendimento funzionale della ricerca dati effettuata è stato bassissimo, inferiore al 10 %. A parte considerazioni sulla micro-conflittualità locale, è anche da riscontrare una scarsa sensibilità individuale nei confronti del problema energetico nel suo complesso.

Spesso gli Enti non conoscono i dati essenziali dei propri consumi energetici, anche perché si tende a delegare all'esterno la gestione del proprio sistema energetico. Questa strategia può essere localmente pagante, ma, quando le dimensioni della struttura raggiungono dimensioni critiche, la gestione esterna della fornitura di energia tende a spostare il proprio baricentro verso l'utilizzo piuttosto che verso l'investimento, come è caratteristico di qualsiasi "affitto" rispetto all'"acquisto". È praticamente conseguente la carenza nella conoscenza delle informazioni.

Nella maggior parte delle sedi manca una figura tecnica in grado di gestire le problematiche energetiche della struttura, così come in normali problemi di manutenzione degli impianti e dei sistemi di lavoro. Si è rivelato praticamente impossibile reperire all'interno una figura in possesso delle informazioni generali dell'involucro edilizio, della presenza di addetti e spesso anche dei consumi.

Un dato integrale di estrema semplicità come la percentuale di superficie vetrata rispetto alla muratura risulta in genere non disponibile, a meno che non si effettui una campagna di misura che richiederebbe comunque un impegno temporale non trascurabile (e quindi costi) per ogni singolo edificio. Ovviamente questa è una metodica non percorribile, per tempi e costi, considerando l'elevato numero di edifici necessari alla creazione di un campione significativo.

Anche in relazione al dato relativo al numero di occupanti deve essere rilevata una diffusa carenza. Infatti, in una struttura convivono spesso diversi enti e società che condividono gli spazi e le attività ma non i dati relativi alla gestione del personale. Spesso, poi, la diffusione dei dati occupazionali non è facilitata dagli organi di controllo, anche per problematiche di natura sindacale e privacy. Di conseguenza, risulta non disponibile anche il dato medio relativo alle ore lavorative in cui la struttura viene utilizzata. Sulla base di quanto sopra, nella ricerca non è stato possibile tener conto in maniera particolareggiata delle dispersioni termiche degli edifici e dell'impatto della presenza umana: come detto, ciò è stato dovuto alla quasi totalità dei dati. Anche dal 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. Di conseguenza ed a causa dei problemi riscontrati, l'analisi ha potuto essere più deduttiva che induttiva ed è stata pertanto condotta sulla base dei soli dati reperiti.

Per valutare quale fosse il numero minimo di campioni da prendere in analisi per rappresentare la totalità degli uffici nazionali con la tecnica deduttiva adottata, è stato prodotto un apposito software. Nella simulazione informatica, sono state generate 2.000 utenze in maniera del tutto casuale (con generatori random di quantità numeriche). Queste utenze simulate presentavano superfici ed assorbimenti energetici compresi nel *range* in analisi. Ordinando in maniera casuale i campioni e valutando le opportune medie mobili dei consumi, si è verificato che un gruppo di circa 200 unità è sufficiente a rappresentare soddisfacentemente il comportamento del sistema nel suo complesso. Dalle valutazioni numeriche risulta infatti che le oscillazioni dell'indicatore globale calcolato si smorzano dopo circa 200 campioni portandosi al valore globale calcolato su oltre 2000 unità come evidenziato graficamente in Figura 116.

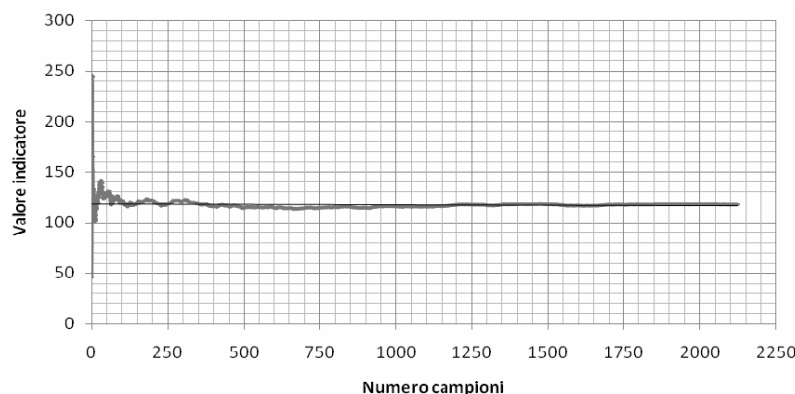


**Figura 116. Oscillazione dell'indicatore calcolato intorno al valore reale, all'aumentare del numero di campioni preso in analisi**

Dalle valutazioni numeriche effettuate, si può asserire che per la ricerca in oggetto sarebbero sufficienti già 130 campioni ammettendo un errore entro il 10% tra il consumo calcolato e quello misurato.

In fase di raccolta dati sono stati reperiti circa 200 campioni da considerare assolutamente affidabili, permettendo così di considerare attendibili i risultati ottenuti. Inoltre, per ottenere una corretta rappresentazione dello scenario nazionale, gli edifici presi in analisi sono stati scelti tra gruppi uniformemente distribuiti secondo diverse:

- zone climatiche (sei zone);
- dimensioni (piccola, media, grande);
- assorbimenti di energia.

I diversi edifici presi in esame non possono essere raggruppati secondo una semplice suddivisione in funzione della latitudine, ad esempio, nord, centro e sud, ogni zona presenta diverse condizioni altimetriche ed ambientali che la caratterizzano; pertanto è stato necessario introdurre 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, per mezzo della tabella riportata nel decreto in cui viene definito il parametro adimensionale dei "gradi giorno" (GG).

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 40%.

#### Valutazione degli indicatori di consumo

Diversi indicatori di consumo sono stati presi in esame per verificare quale fosse il più aderente alla realtà energetica da delineare.

Per quanto riguarda i carichi termici (nel terziario, principalmente gas), avendo già verificato una proporzionalità tendenzialmente stabile tra il consumo di energia e la superficie, nonché una ridotta dispersione dei dati, si è ritenuto opportuno non impiegare modelli complessi per l'analisi dei consumi. È peraltro evidente anche alla semplice ispezione qualitativa che i diversi volumi vengono riscaldati con metodologie e tecnologie molto simili tra

loro. In tal caso per la raccolta dati viene utilizzato un indicatore di consumo, semplice e comprensibile a tutti, che rapporta la quantità di gas consumato per unità di superficie [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ] per anno.

Si rileva che il consumo di gas da riscaldamento non è legato a fattori come il numero di occupanti ma principalmente alle dimensioni della struttura. Preso ad esempio un numero di campioni della zona climatica D, risulta evidente dalla Figura 117 come il dato indicatore di consumo termico dimostri una dispersione ridotta attorno al valore medio di circa 9 metri cubi per metro quadro.

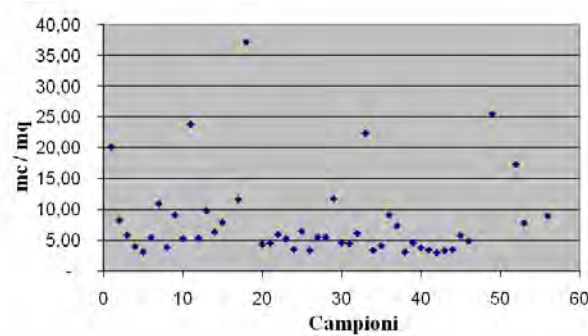


**Figura 117. Valori degli indicatori termici per un campione di edifici della zona climatica D**

Al contrario, per i consumi elettrici si rileva una dispersione dei dati non accettabile ai fini di una previsione di consumo per i singoli edifici. Si suppone che la variabilità riscontrata derivi da un utilizzo degli apparecchi legato ad imprevedibili usi locali degli utilizzatori o al particolare servizio fornito. A titolo di esempio, si riporta in Figura 118 il valore degli indicatori elettrici di un gruppo di edifici appartenenti alla zona climatica E.

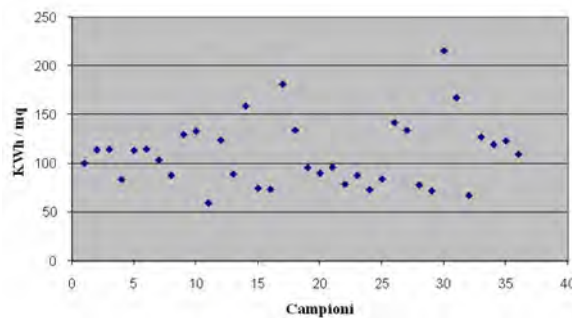


**Figura 118. Valori degli indicatori elettrici per un campione di edifici della zona climatica E**

Essendo impossibile prevedere i coefficienti di utilizzazione e di contemporaneità per gli utilizzatori impiegati, vengono proposti diversi modelli di valutazione del consumo elettrico globale di un edificio. Tra i principali vi sono quelli che rapportano l'energia assorbita a:

- metri quadri;
- volumi;
- numero di addetti;
- superficie per dipendente (inverso della densità).

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 ciò non è stato possibile a causa della ricorrente mancanza dei principali dati di riferimento come, ad esempio, il numero di addetti o il volume dell'involucro edilizio. Nella maggior parte degli edifici, a causa della presenza di consulenti esterni e del distaccamento di personale presso altre sedi, non è possibile conoscere il numero di impiegati presenti nella struttura, e tanto meno è disponibile la quantità numerica principale, quella delle ore uomo / anno. Inoltre, alcuni edifici ospitano più di una società e, purtroppo, nella maggior parte dei casi almeno una delle unità operative occupanti non può collaborare alla raccolta dati, rendendo impossibile ricavare il numero di addetti globale. In alcuni edifici tale dato non viene in nessuna maniera valutato.

L'unico dato sempre disponibile, per tutti i fabbricati, è la superficie mentre per tutti gli altri richiesti nel questionario è stata reperita solo qualche sporadica e spesso poco attendibile indicazione.

### Analisi dei dati elettrici

#### Analisi dei dati con il modello in funzione della superficie (m<sup>2</sup>)

Come primo passo l'analisi dei consumi elettrici è stata effettuata a livello nazionale sulla raccolta globale di tutti i 200 campioni. Successivamente i risultati sono stati affinati valutando i consumi in riferimento alle singole zone climatiche.

L'indicatore utilizzato è quello a "metro quadro" e viene ricavato dal rapporto l'energia assorbita in un anno e la superficie, per ogni singola zona climatica:

$$I_e = \frac{kWh_{totali}}{m^2_{tot}}$$

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 edifici e la somma delle superfici degli stessi in un anno. L'indicatore globale di riferimento ottenuto in questo caso è pari a 115 kWh/m<sup>2</sup> anno.

L'analisi di consumo condotta sul campione generato statisticamente, con un apposito programma di calcolo, produce un valore di circa 120 kWh/m<sup>2</sup> anno confermando quanto appena calcolato dai dati di consumo.

Verificata la rappresentatività del campione analizzato si passa a calcolare l'indicatore di consumo elettrico per singola zona climatica: i valori risultanti, come risulta evidente dalla Figura 119, sottolineano ancora una volta il peso che gli impianti di condizionamento hanno sul fabbisogno energetico di uno stabile. In Tabella 49 il dato relativo agli indicatori è riportato numericamente.

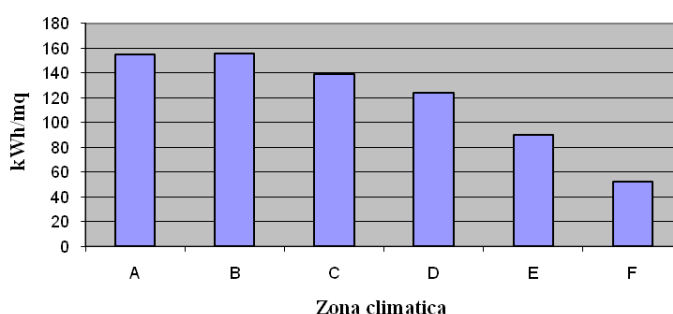


Figura 119. Valori degli indicatori di consumo elettrico per zona climatica.

Tabella 49. Energia elettrica assorbita in un anno per metro quadro di superficie, per zona climatica

| ZONA CLIMATICA | INDICATORE [kWh/m <sup>2</sup> anno] |
|----------------|--------------------------------------|
| A              | 155                                  |
| B              | 156                                  |
| C              | 139                                  |
| D              | 125                                  |
| E              | 90                                   |
| F              | 52                                   |

#### Analisi dei dati con il modello in funzione del numero di addetti

L'analisi dei consumi elettrici è stata effettuata anche tramite indicatore riferito al numero di addetti associati alla struttura. L'indicatore utilizzato è quello ad "addetto" e viene ricavato dal rapporto tra l'energia assorbita in un anno e il numero di addetti impiegati all'interno della struttura, per ogni zona climatica:

$$I_e = \frac{kWh_{totali}}{addetti}$$

Nonostante i 200 campioni, raccolti con difficoltà sul territorio nazionale, quelli completi dei dati relativi all'occupazione sono solamente il 20%.

In questo caso il campione in analisi non può essere considerato rappresentativo. Volendo comunque effettuare una valutazione dell'indicatore si rileva la non attendibilità dei risultati; questa è confermata dalla oscillazione degli indicatori per zona climatica mostrata in Figura 120.

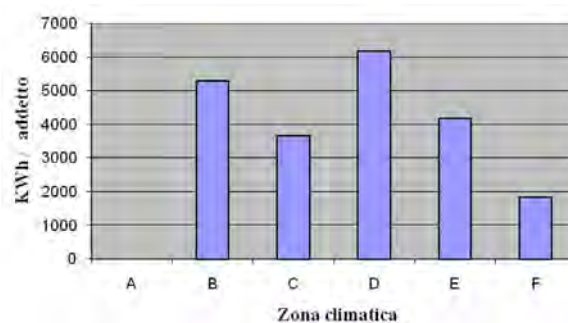


**Figura 120. Indicatore di consumo elettrico in funzione del numero di addetti, per zona climatica**

*Analisi dei dati con il modello in funzione della superficie e del numero di addetti*

Un'analisi corretta del consumo dovrebbe legare strettamente tra loro cause ed effetti. È pienamente condivisibile il principio secondo il quale una ricerca più approfondita dovrebbe basarsi su di un modello di calcolo che leghi gli attori/utilizzatori alle energie assorbite.

In Tabella 50 viene riportata una ripartizione di massima dei consumi che li vede legati a diverse variabili; questa deriva da una prima analisi effettuata su un numero peraltro limitato di campioni e potrebbe essere sviluppata in studi futuri.

**Tabella 50. Ripartizione degli assorbimenti tra superficie ed addetti**

| UTILIZZATORE                                        | % SUPERFICIE | % ADDETTO |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------|
| Macchine da ufficio (PC, stampanti, fotocopiatrici) | 5            | 95        |
| Impianti tecnologici centralizzati                  | 100          | 0         |
| Ascensori, montacarichi                             | 70           | 30        |
| Illuminazione di interni ed esterni                 | 80           | 20        |
| Condizionamento e ventilazione                      | 80           | 20        |

Ritenendo non corretto legare un consumo esclusivamente ad una superficie o ad un numero di addetti, si è fatto uno studio preliminare per cercare di stabilire una relazione, fisicamente ed energeticamente corretta, tra l'energia assorbita ad entrambe le grandezze.

Tale strategia, pur corretta, non può essere al momento sfruttata per la parziale presenza di dati relativi alla occupazione.

Viene comunque proposto e studiato un modello misto che permetta di ricavare l'energia tramite due indicatori parziali, uno riferito alla superficie ed uno al numero di addetti:

$$E = I_S \cdot S + I_{Add} \cdot n_{Add}$$

dove: E è l'energia assorbita,  $I_S$  è l'indicatore riferito alla superficie, S è la superficie totale del fabbricato,  $I_{Add}$  è l'indicatore riferito al numero di addetti e  $n_{Add}$  è il numero di addetti.

Per la scarsità di dati relativi al numero di addetti il modello misto è stato testato solo su 40 campioni distribuiti sull'intero territorio nazionale (senza distinzione per zona climatica).

Per ogni fabbricato in analisi, gli indicatori parziali risultano due, pertanto è necessario suddividere correttamente tra essi l'energia totale assorbita. Per la valutazione dei suddetti indicatori è stato prodotto un apposito programma di calcolo, questo individua la combinazione migliore tra i due valori basandosi sulla minimizzazione dello scarto tra l'energia calcolata ed il dato reale.

Tramite le analisi effettuate, nonostante l'esiguo campione non rappresentativo, sono stati comunque ricavati dei valori di indicatori parziali che portano ad un risultato compreso nei valori attesi; pertanto, come da Tabella 51, si conferma che è corretto legare i consumi specifici contemporaneamente alla superficie ed al numero di addetti.

**Tabella 51. Indicatori specifici relativi alla superficie ed al numero di addetti**

| Indicatori specifici del modello misto |                            |
|----------------------------------------|----------------------------|
| Indicatore m <sup>2</sup>              | 80 kWh/m <sup>2</sup> anno |
| Indicatore Ad                          | 3.000 kWh/addetto anno     |

#### 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; in genere il consumo di energia per il riscaldamento non varia significativamente in relazione con gli utilizzatori ed il numero di addetti.

Nella raccolta dati, per semplificare l'operazione agli amministratori con minime capacità tecniche, è stato utilizzato un indicatore di consumo semplice che rapporta il volume di gas naturale consumato [m<sup>3</sup>] alla superficie [m<sup>2</sup>]. Nella presentazione dei risultati, il dato viene riferito anche al rapporto tra energia termica consumata e superficie [kWh/m<sup>2</sup>]; l'operazione di conversione del dato viene effettuata considerando il potere calorifico inferiore del gas pari a 8.250 kcal m<sup>3</sup> (indicato nella revisione finale 13 giugno 2004) del "Bilancio Energetico Nazionale 2001" redatto dal Ministero delle Attività Produttive. Detto fattore di conversione viene indicato al netto di ogni rendimento di conversione.

#### *Analisi dei dati con il modello in funzione della superficie*

Nella maggior parte dei casi, i dati relativi alla struttura che occorrono per definire un modello accurato di previsione dei consumi risultano assenti. Non trattandosi di un'approfondita analisi energetica "on site" sarebbero sufficienti al raggiungimento dell'obiettivo i seguenti dati integrali, peraltro di immediata rilevazione:

- superficie;
- volume;
- tipologia del fabbricato (pietra, struttura portante in cemento armato e tamponature in laterizio, prefabbricato...);
- tipologia della coperta (tetto spiovente a tegole, terrazzo...)
- percentuale superficie vetrata;
- tipologia degli infissi (vetro doppio o singolo...);
- trasmittanza termica.

Purtroppo, data la scarsa assistenza ottenuta, la maggior parte dei suddetti dati non sono pervenuti, con l'eccezione della quantità di gas naturale consumato e della superficie. Pertanto l'indicatore scelto fa riferimento ad una energia termica assorbita per unità di superficie:

$$I_t = \frac{kWh}{m^2_{tot}}$$

Anche in questo caso, il calcolo degli indicatori è stato accuratamente effettuato per ogni singola zona climatica. Si riportano gli indicatori termici calcolati nel corso della presente ricerca; il relativo dato numerico, suddiviso per zona climatica, viene indicato in Tabella 52.

**Tabella 52. Valori degli indicatori di consumo termico calcolato come utilizzo di gas naturale e come energia termica impiegata (al netto di ogni rendimento di conversione), per zona climatica**

| ZONA CLIMATICA | INDICATORE [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> anno] | INDICATORE [kWh/m <sup>2</sup> anno] |
|----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| A              | 0,3                                              | 2,9                                  |
| B              | 3,0                                              | 28,8                                 |
| C              | 6,0                                              | 57,6                                 |
| D              | 9,0                                              | 86,4                                 |
| E              | 10,9                                             | 104,6                                |
| F              | 23,1                                             | 221,8                                |

### Possibili sviluppi

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 strutture obbliga di fatto ad una futura indagine, maggiormente impegnativa. Sarà inoltre necessario effettuare un'analisi dettagliata dei consumi, quanto meno statistica, "entrando" dentro l'utenza e valutando gli usi finali che sono già stati identificati in:

- illuminazione
- condizionamento
- office equipment
- refrigerazione
- lavaggio
- produzione ACS
- sistemi ausiliari
- eventuali tipologie o gruppi di utilizzatori non considerati preventivamente.

La dispersione rilevata nei dati, causa dei diversi utilizzatori e coefficienti di contemporaneità ed utilizzazione degli stessi, 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.

Tale lavoro necessita di uno staff più ampio e di tempi maggiori per svolgere un'accurata attività di misura e ricerca all'interno delle strutture. Sembra comunque necessario effettuare una opera di sensibilizzazione all'interno della PA.

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, o, in alternativa, amministrativa a livello ministeriale, che specifichi ed imponga compiti e doveri.

Tutte le attività proposte hanno il fine intermedio di raccogliere, organizzare e centralizzare generare i dati, rendendoli disponibili per tutto il territorio interessato (comunale, regionale, statale).

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 amministrazioni 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.

In breve, le azioni di sviluppo della ricerca possono essere riassunte come segue:

#### Incremento del numero di dati relativi a situazioni locali

- coinvolgimento di altri attori
- invio di ulteriori questionari

#### Valutazione dei consumi di utenza

- censimento del tipo di apparecchiature
- studio di modelli di previsione più particolareggiati
- ampliamento degli inventari degli Enti con dati di tipo energetico

#### Supporto alla generazione di un sistema di catasto energetico

- attività legislativa
- attività amministrativa
- attività normativa
- attività informatica

#### Redazione di linea guida sulla organizzazione della struttura interna di energy management di un edificio

- organigramma operativo
- suddivisione dei compiti ed organizzazione del lavoro
- trattamento ed elaborazione dati
- provvedimenti ed interventi.



## EDIFICI ADIBITI A USO UFFICIO

### USI TERMICI - ANALISI DEL POTENZIALE DI RISPARMIO ENERGETICO

Nello studio si è analizzato il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento nell'ambito del settore edilizio degli uffici.

L'analisi si sono sviluppate attraverso i seguenti passi metodologici:

- si è individuato e caratterizzato un limitato pacchetto di edifici in grado di rappresentare qualitativamente una parte rappresentativa dello stock edilizio in oggetto: 2 edifici adibiti a uffici con diversa organizzazione degli spazi e differenti carichi interni;
- si è svolta un'analisi approfondita attraverso simulazioni dinamiche di modelli d'edificio, utilizzando il software DOE2-EnergyPlus.

In particolare, per ciascun modello e per tre diversi contesti climatici italiani (Milano, Roma e Palermo) sono state svolte delle analisi di sensitività "bottom" 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 nella Tabella 53.

**Tabella 53. Analisi bottom di stima del potenziale di risparmio**

| Categoria energetica | Funzione obiettivo                                                    | Casi Base                                                 | Tecnologia                                          | Numero variazioni (compreso caso base) | Contesti climatici            |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| Riscaldamento        | Fabbisogni energetici di riscaldamento (con temperatura di Setpoint)  | 1 Ufficio con alti carichi<br>1 Ufficio con bassi carichi | Isolamento termico sup. opache                      | 3                                      | 3<br>(Milano, Roma e Palermo) |
|                      |                                                                       |                                                           | Isolamento termico sup. trasparenti                 | 3                                      |                               |
|                      |                                                                       |                                                           | Permeabilità dell'involucro                         | 3                                      |                               |
|                      |                                                                       |                                                           | Recupero del calore                                 | 3                                      |                               |
| Raffrescamento       | Fabbisogni energetici di raffrescamento (con temperatura di Setpoint) | 1 Ufficio con alti carichi<br>1 Ufficio con bassi carichi | Controllo solare                                    | 3                                      | 3<br>(Milano, Roma e Palermo) |
|                      |                                                                       |                                                           | Riflettanza involucro                               | 3                                      |                               |
|                      |                                                                       |                                                           | Massa termica                                       | 3                                      |                               |
|                      |                                                                       |                                                           | Permeabilità dell'involucro e ventilazione naturale | 3                                      |                               |
|                      |                                                                       |                                                           | Isolamento termico superfici opache                 | 3                                      |                               |

Nelle simulazioni si sono considerate le località climatiche di Milano, Roma e Palermo, come rappresentative in modo medio delle principali condizioni climatiche del territorio Italiano ed i cui dati climatici sono stati desunti dalle norme di riferimento nazionali per la caratterizzazione del clima o dati di letteratura ove necessario.

Sono stati considerati due edifici, con diverse geometrie, i quali come tipologia e forma, caratteristiche costruttive e modelli d'uso possono rappresentare, da un punto di vista medio, dei tipici edifici ad uso ufficio, dello scenario edilizio italiano. Per tale definizione si è fatto riferimento a dati e studi di letteratura, ed a quelli disponibili di ENEA.

In generale i modelli d'uso dei due edifici (periodi di occupazione, livelli di affollamento, utilizzo dell'illuminazione artificiale, ecc.) sono uguali.

Fanno eccezione i carichi termici interni (dovuti agli apparecchi illuminanti e alle apparecchiature elettriche d'ufficio), differenziandoli in relazione alla volumetria per le due tipologie scelte.

#### Apporti termici

Per determinare gli apporti termici interni si è tenuto conto del livello di occupazione delle persone degli apporti termici dovuti all'uso dell'impianto di illuminazione, valutati sulla potenza di illuminazione installata e per gli apporti termici dovuti all'uso delle apparecchiature elettriche (computer, stampanti, macchine fotocopiatrici, ecc.) si sono considerati i valori massimi desunti da valori valutati su dati di riferimento presenti nella letteratura tecnica. In particolare le valutazioni, per l'impianto di illuminazione, hanno tenuto conto nei periodi di occupazione degli ambienti dell'edificio, e per le zone di comunicazione e servizio (corridoi, scale, servizi igienici, ecc.) dalle ore 7 alle ore 20, nei giorni di lavoro.

**Tabella 54. Riepilogo dei valori massimi degli apporti termici interni**

| Apporti termici interni – Valori massimi – Riepilogo [W/m <sup>2</sup> ] |                                     |               |                      |                                      |               |                      |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------|----------------------|--------------------------------------|---------------|----------------------|
|                                                                          | Edificio A - Alti carichi termici - |               |                      | Edificio B - Bassi carichi termici - |               |                      |
|                                                                          | Uffici                              | Sale Riunioni | Zone di Circolazione | Uffici                               | Sale Riunioni | Zone di Circolazione |
| Persone                                                                  | 8,75                                | 30,00         | 0,00                 | 8,75                                 | non presente  | 0,00                 |
| Illuminazione                                                            | 16,20                               | 16,20         | 10,80                | 9,00                                 | non presente  | 6,30                 |
| Apparecchiature                                                          | 15,00                               | 10,00         | 0,00                 | 7,00                                 | non presente  | 0,00                 |
| <b>TOTALE</b>                                                            | <b>39,95</b>                        | <b>56,20</b>  | <b>10,80</b>         | <b>24,75</b>                         | -             | <b>6,30</b>          |

#### *Protezioni solari*

Per i modelli base di riferimento, degli edifici A e B, si sono applicate delle schermature solari costituite da tende alla veneziana, completamente opache, di colore mediamente scuro, posizionate in corrispondenza delle finestre, verso l'ambiente interno.

Dispositivi di controllo solare con queste caratteristiche fisiche portano ad un fattore solare circa pari a 0.6, calcolato secondo il metodo indicato nella norma [UNI EN 13363-1:2004].

Questa tipologia di tenda può essere rappresentativa dei più comuni sistemi di schermatura adottati negli edifici ad uffici in Italia. Nelle simulazioni svolte, si è scelto di rappresentare un controllo realistico dei sistemi di schermatura solare., quindi le tende sono controllate manualmente dagli utenti dell'edificio.

Nelle simulazioni la percentuale di schermature solari attive varia secondo la funzione "Uso di sistemi di controllo solare", rappresentata di seguito, che, nel software di simulazione, approssima la curva di riferimento, ricavata da studi di misure ed osservazioni sul campo, condotti su edifici ad uso uffici in Francia, per l'uso delle schermature solari da parte degli utenti.

#### *Flussi d'aria*

##### Ventilazione meccanica

Gli edifici considerati sono dotati di impianto di ventilazione meccanica in funzione nelle ore di occupazione dell'edificio, nei giorni lavorativi, dalle ore 7 alle ore 21.

I valori delle portate di ventilazioni considerati sono in linea con i valori medi per uffici e sale riunioni, indicati nello Standard Europeo [EN 15251:2007-08], per edifici appartenenti alla Categoria III di comfort, categoria tipica per edifici esistenti.

##### Infiltrazioni d'aria

Negli edifici base, di riferimento, le infiltrazioni d'aria attraverso l'involucro edilizio sono state mediamente assunte pari a 2.5 volumi all'ora per una differenza di pressione pari a 50 Pa, che corrispondono a circa 0.6 volumi all'ora in condizioni medie (per una differenza di pressioni di riferimento di 4 Pa).

Questi valori di infiltrazione d'aria corrispondono ad una classe di tenuta all'aria media dell'involucro edilizio secondo dallo Standard Europeo [prEN 12831-2000-08 E].

##### Impianto di climatizzazione

Nei modelli di edifici simulati si è rappresentato un impianto di climatizzazione ad aria, il quale controlla la temperatura degli ambienti climatizzati. L'impianto funziona con completo ricircolo dell'aria (il rinnovo dell'aria interna viene simulato per mezzo del sistema di ventilazione meccanica di cui sopra).

**Tabella 55. Impianto di climatizzazione: orari di funzionamento e temperature di set-point**

| IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE: TEMPERATURE DI SET POINT [°C] |                        |                          |
|------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|
|                                                            | in ore con occupazione | in ore senza occupazione |
| Riscaldamento                                              | 20                     | 10                       |
| Raffrescamento                                             | 26                     | free floating            |

Al fine di valutare la richiesta di energia utile (energy need) per riscaldamento e raffrescamento complessiva di tutto l'anno, tenendo conto anche di eventuali periodi di sovra riscaldamento degli ambienti interni in periodo invernale, con conseguente necessità di raffrescare, si è simulato un impianto che consente il riscaldamento e il raffrescamento durante tutto l'anno. Impianti di questo tipo possono essere utilizzati comunemente negli edifici ad uso uffici.

#### Azioni di miglioramento delle prestazioni energetiche

Nelle tabelle riportate di seguito vengono descritte le variazioni apportate rispettivamente agli edifici base, di riferimento (Edificio A ed Edificio B).

Ciascuna famiglia di variazioni, indicata di seguito con il termine "AZIONE" (ad es. "Isolamento termico sup. opache", "Recupero del calore", ecc.) sono state applicate singolarmente agli edifici base. Si è valutato così l'effetto termico che ciascuna azione, attuata singolarmente, ha sull'edificio base considerato.

Nelle tabelle, la capacità termica realmente utile ai fini energetici dell'edificio è espressa per unità di superficie calpestabile, in pianta, dell'edificio, con la grandezza  $\text{Wh/m}^2\text{K}$ .

I valori di permeabilità all'aria dell'involucro sono espressi per una differenza di pressione tra ambiente interno ed esterno di 50 Pa (valore di riferimento).

Si riportano titolo esemplificativo le tabelle relative al clima di Roma per le due tipologie di edificio

**Tabella 56. Variazioni applicate singolarmente ad Edificio A – clima di Roma**

| Clima                                                                                           |                                       | ROMA        |                           |        |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------|---------------------------|--------|-------------------------|
| Modello: Edificio A: <u>Grandi dimensioni</u> - Ufficio con <u>alti carichi</u> termici interni |                                       | Codice: MIN |                           |        |                         |
| AZIONE                                                                                          |                                       | VARIAZIONI  |                           |        |                         |
| CODICE                                                                                          | DESCRIZIONE                           | CODICE      | NOTE                      | VALORI | U.M.                    |
| 1                                                                                               | Isolamento termico sup. opache        | -           | pareti esterne            | 0.90   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       |             | copertura                 | 2.10   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       |             | solaio su terreno         | 2.00   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       | o           | pareti esterne            | 0.36   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       |             | copertura                 | 0.32   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       |             | solaio su terreno         | 0.36   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       | +           | pareti esterne            | 0.20   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       |             | copertura                 | 0.20   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       |             | solaio su terreno         | 0.20   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
| 2                                                                                               | Isolamento termico sup. trasparenti   | -           | finestre                  | 5.80   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       | o           | finestre                  | 2.40   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
|                                                                                                 |                                       | +           | finestre                  | 1.09   | $\text{W/m}^2\text{K}$  |
| 3                                                                                               | Permeabilità dell'involucro           | -           | $n_{50}$                  | 2.50   | 1/h                     |
|                                                                                                 |                                       | o           | $n_{50}$                  | 1.00   | 1/h                     |
|                                                                                                 |                                       | +           | $n_{50}$                  | 0.60   | 1/h                     |
| 4                                                                                               | Recupero del calore                   | -           | efficienza recuperatore   | 0      | %                       |
|                                                                                                 |                                       | o           | efficienza recuperatore   | 60     | %                       |
|                                                                                                 |                                       | +           | efficienza recuperatore   | 80     | %                       |
| 5                                                                                               | Controllo solare (manuale)            | -           | SF                        | 0.60   | -                       |
|                                                                                                 |                                       | o           | SF                        | 0.30   | -                       |
|                                                                                                 |                                       | +           | SF                        | 0.10   | -                       |
| 6                                                                                               | Riflettanza involucro                 | -           | -                         | 0.10   | -                       |
|                                                                                                 |                                       | o           | -                         | 0.50   | -                       |
|                                                                                                 |                                       | +           | -                         | 0.70   | -                       |
| 7                                                                                               | Massa termica                         | -           | capacità termica efficace | 51.99  | $\text{Wh/m}^2\text{K}$ |
|                                                                                                 |                                       | o           | capacità termica efficace | 58.22  | $\text{Wh/m}^2\text{K}$ |
|                                                                                                 |                                       | +           | capacità termica efficace | 62.86  | $\text{Wh/m}^2\text{K}$ |
| 8                                                                                               | Ventilazione naturale (night-cooling) | -           | -                         | 0.00   | 1/h                     |
|                                                                                                 |                                       | o           | -                         | 1.75   | 1/h                     |
|                                                                                                 |                                       | +           | -                         | 6.00   | 1/h                     |

**Tabella 57. Variazioni applicate singolarmente ad Edificio B – clima di Roma**

| Clima: ROMA                                                                                     |                                       |            |                           |               |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------|---------------------------|---------------|--------|
| Modello: Edificio B: <u>Medie dimensioni</u> - Ufficio con <u>bassi carichi</u> termici interni |                                       |            |                           | Codice: PORLL |        |
| AZIONE                                                                                          |                                       | VARIAZIONI |                           |               |        |
| CODICE                                                                                          | DESCRIZIONE                           | CODICE     | NOTE                      | VALORI        | U.M.   |
| 1                                                                                               | Isolamento termico sup. opache        | -          | pareti esterne            | 0.90          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | -          | copertura                 | 2.10          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | -          | solaio su terreno         | 2.00          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | o          | pareti esterne            | 0.36          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | o          | copertura                 | 0.32          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | o          | solaio su terreno         | 0.36          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | +          | pareti esterne            | 0.20          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | +          | copertura                 | 0.20          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | +          | solaio su terreno         | 0.20          | W/m²K  |
| 2                                                                                               | Isolamento termico sup. trasparenti   | -          | finestre                  | 5.80          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | o          | finestre                  | 2.40          | W/m²K  |
|                                                                                                 |                                       | +          | finestre                  | 1.09          | W/m²K  |
| 3                                                                                               | Permeabilità dell'involucro           | -          | n <sub>50</sub>           | 2.50          | 1/h    |
|                                                                                                 |                                       | o          | n <sub>50</sub>           | 1.00          | 1/h    |
|                                                                                                 |                                       | +          | n <sub>50</sub>           | 0.60          | 1/h    |
| 4                                                                                               | Recupero del calore                   | -          | efficienza recuperatore   | 0             | %      |
|                                                                                                 |                                       | o          | efficienza recuperatore   | 60            | %      |
|                                                                                                 |                                       | +          | efficienza recuperatore   | 80            | %      |
| 5                                                                                               | Controllo solare (manuale)            | -          | SF                        | 0.60          | -      |
|                                                                                                 |                                       | o          | SF                        | 0.30          | -      |
|                                                                                                 |                                       | +          | SF                        | 0.10          | -      |
| 6                                                                                               | Riflettanza involucro                 | -          | -                         | 0.10          | -      |
|                                                                                                 |                                       | o          | -                         | 0.50          | -      |
|                                                                                                 |                                       | +          | -                         | 0.70          | -      |
| 7                                                                                               | Massa termica                         | -          | capacità termica efficace | 46.38         | Wh/m²K |
|                                                                                                 |                                       | o          | capacità termica efficace | 50.89         | Wh/m²K |
|                                                                                                 |                                       | +          | capacità termica efficace | 54.79         | Wh/m²K |
| 8                                                                                               | Ventilazione naturale (night-cooling) | -          | -                         | 0.00          | 1/h    |
|                                                                                                 |                                       | o          | -                         | 1.75          | 1/h    |
|                                                                                                 |                                       | +          | -                         | 6.00          | 1/h    |

### Risultati

Sono riportati i principali risultati ottenuti, in termini di stima del fabbisogno di energia utile e del potenziale di risparmio energetico rispetto ai casi di riferimento, applicando singolarmente le diverse azioni di miglioramento energetico.

Rispettivamente, per l'Edificio A e l'Edificio B, in termini di:

- fabbisogno di energia utile (energy need) – riscaldamento e raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup>]<sub>a</sub>;
- risparmio di energia utile rispetto al caso base corrispondente – riscaldamento e raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup>]<sub>a</sub>;
- risparmio percentuale di energia utile rispetto al caso base corrispondente - riscaldamento e raffrescamento [%].

Nei grafici che presentano i fabbisogni di energia utile in termini assoluti, vengono individuati i valori relativi ai casi base, nei tre diversi climi, secondo la simbologia individuata di seguito.

- ■ ■ caso base – clima di Milano
- ■ ■ ■ ■ caso base – clima di Roma
- ● ● ● ● caso base – clima di Palermo

A titolo esemplificativo si riportano le tabelle che esprimono in termini percentuali i risultati ottenuti.



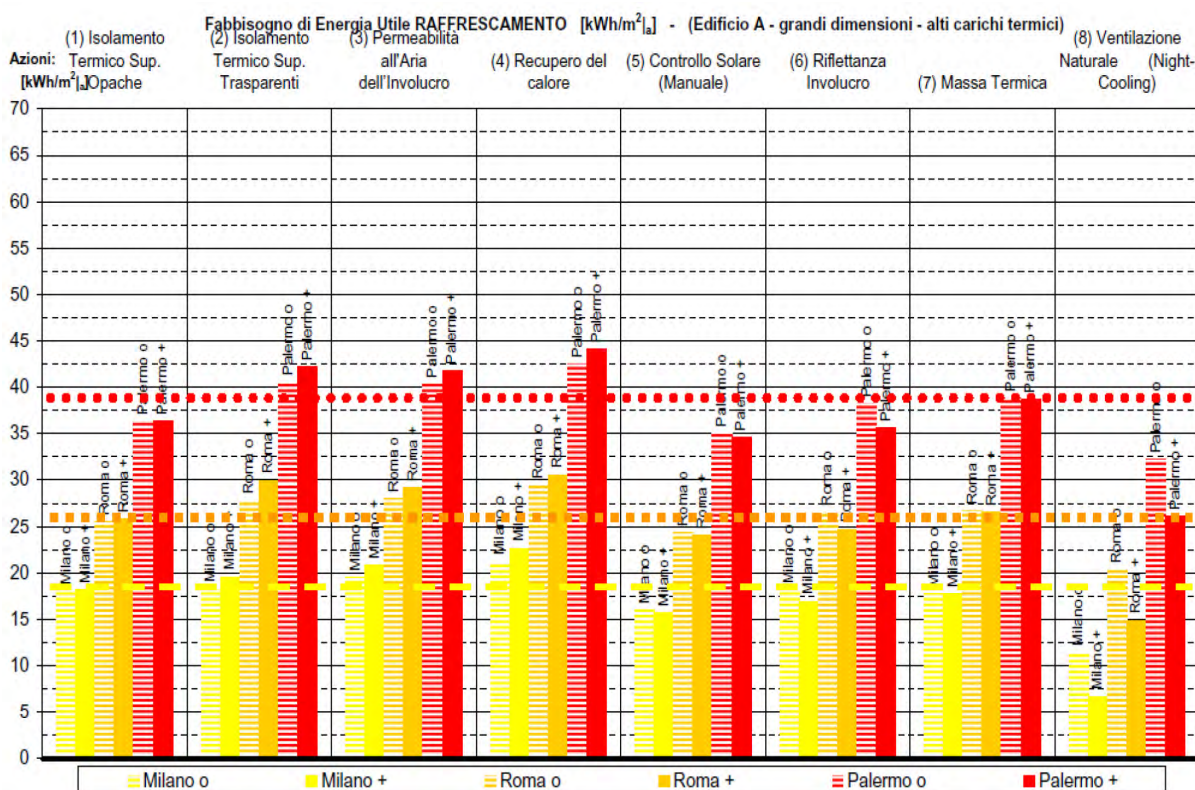


Figura 121. Fabbisogno di energia utile – Raffrescamento, Edificio di tipo A

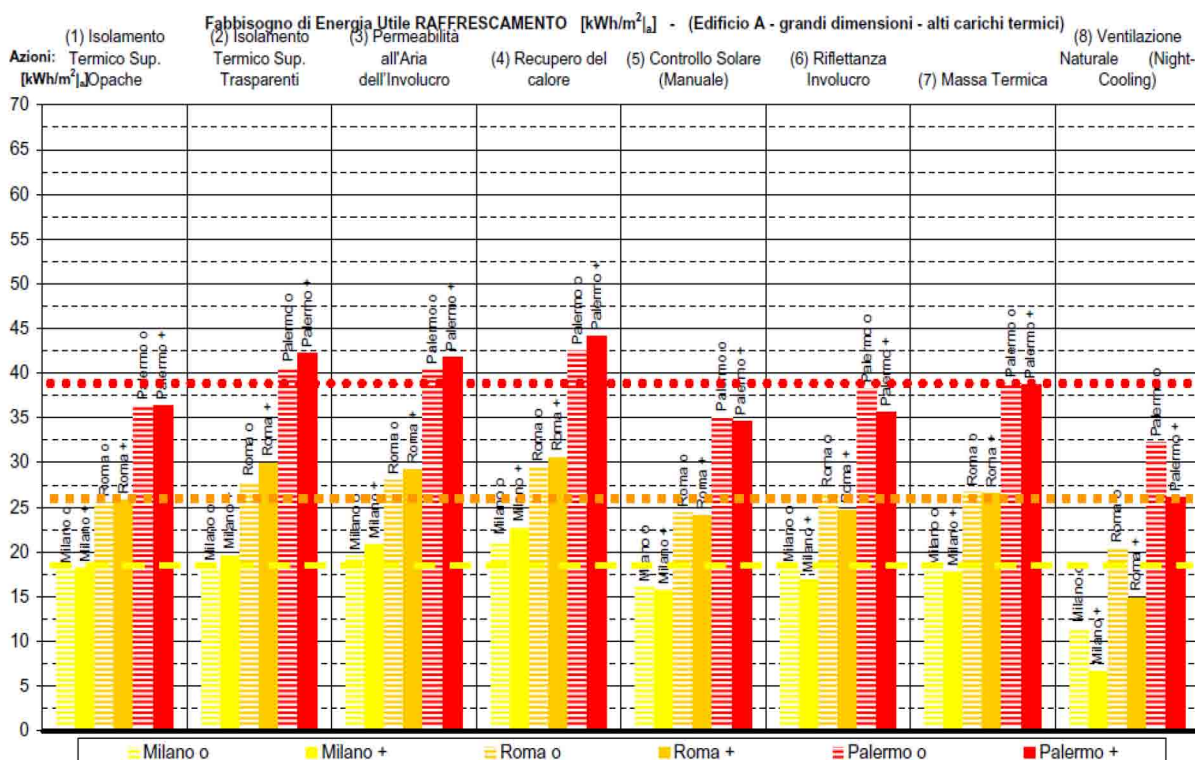


Figura 122. Fabbisogno di energia utile – Riscaldamento – Edificio di tipo A

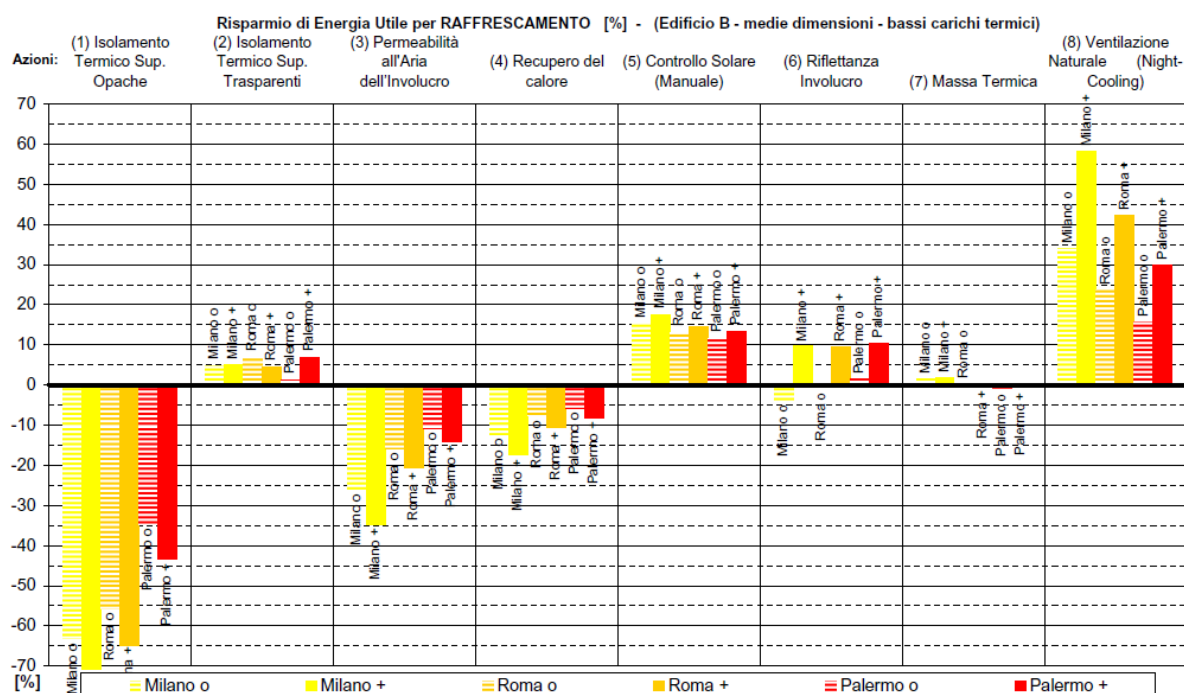


Figura 123. Fabbisogno di energia utile – Raffrescamento – Edificio di tipo B

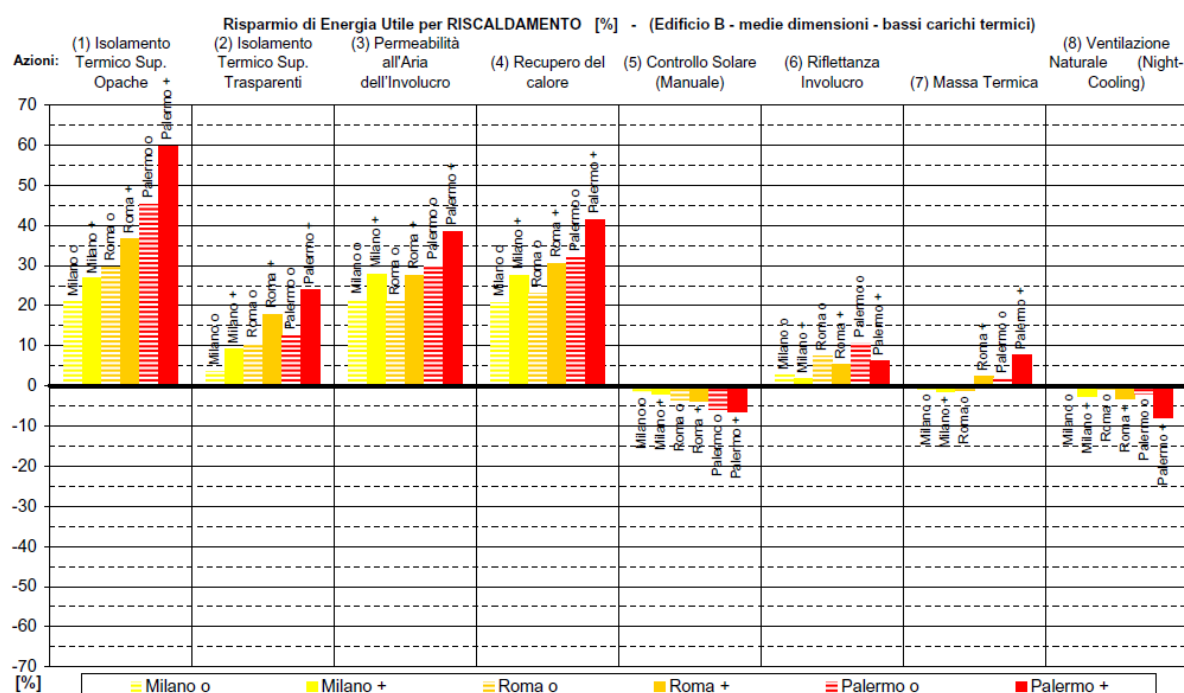


Figura 124. Fabbisogno di energia utile – Riscaldamento – Edificio di tipo B

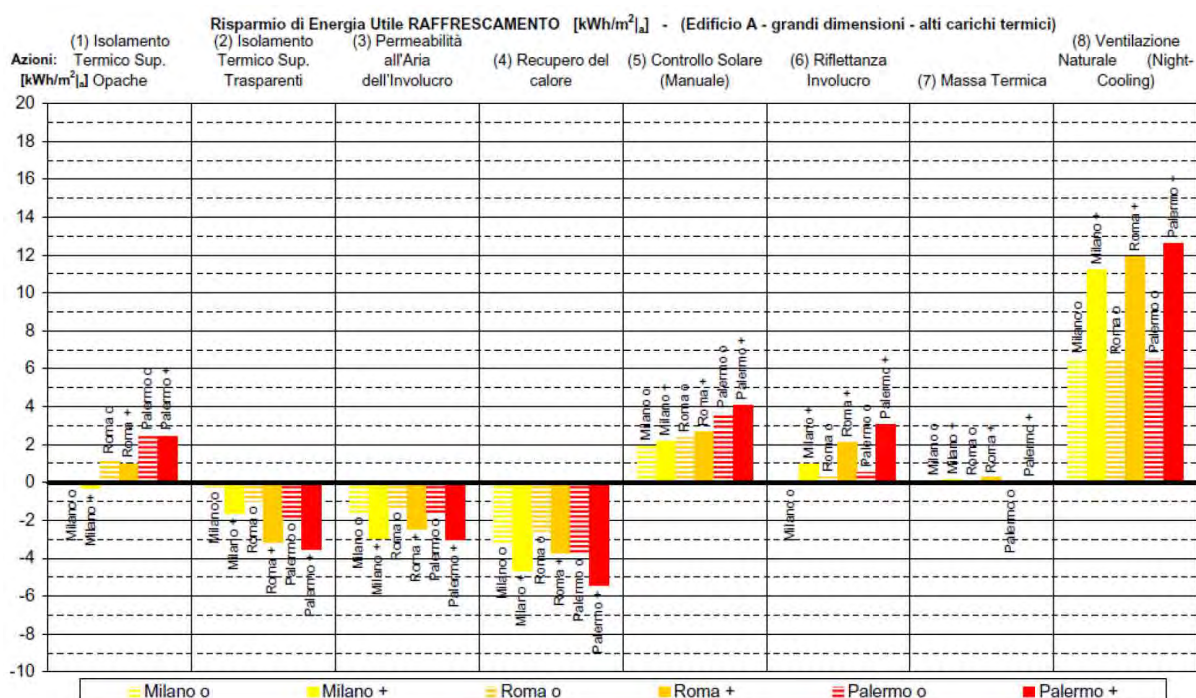


Figura 125. Risparmio di energia utile – Raffrescamento; Edificio di tipo A

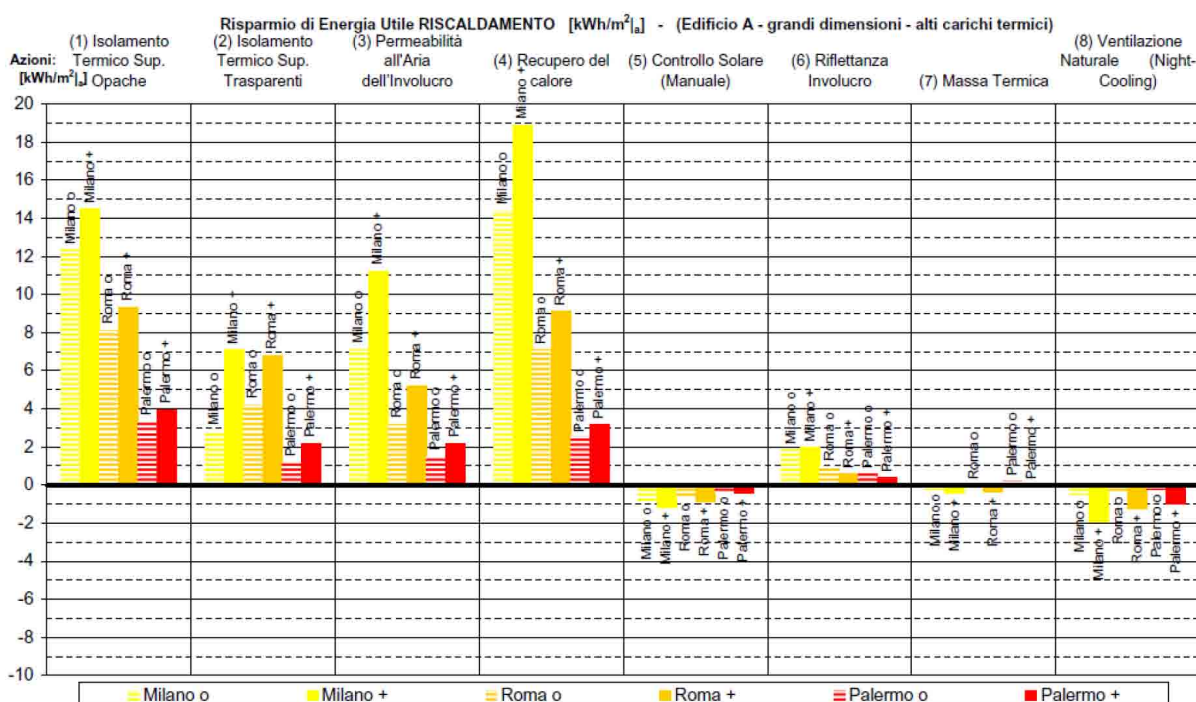


Figura 126. Risparmio di energia utile – Riscaldamento; Edificio di tipo A

In generale, risulta che il maggiore potenziale di risparmio per riscaldamento è dato dall'aumento dell'isolamento termico delle superfici opache e dell'introduzione del recupero del calore dall'aria di ventilazione (con risparmi di energia utile per il riscaldamento maggiori del 25%, rispetto ai corrispondenti casi base).



Per quanto riguarda il raffrescamento, i potenziali di risparmio più elevati sono dati dall'introduzione della ventilazione notturna e dalle misure di controllo solare. Introducendo la ventilazione notturna nel periodo di raffrescamento si può ridurre la richiesta di energia utile in percentuali che vanno dal 15 al 35%, con il livello medio ("o") di ventilazione notturna, e dal 30 al 65% con il livello alto ("+" ). Che corrispondono a risparmi che vanno da 3 a quasi 7 kWh/m<sup>2</sup><sub>a</sub> con il livello medio ("o"), e da 5 a quasi 13 kWh/m<sup>2</sup><sub>a</sub> con il livello alto ("+" ).

Si può osservare come un maggiore isolamento delle pareti opache porti ha innegabili benefici sul fabbisogno invernale, mentre sembrerebbe avere un effetto non univoco sull'andamento del fabbisogno estivo.

In entrambi gli edifici e per tutti i climi analizzati, il fabbisogno invernale può essere ridotto di molto attraverso un maggiore isolamento dell'involucro opaco, anche in edifici con un rapporto superficie disperdente su volume climatizzato relativamente basso come quelli considerati. Il valore di trasmittanza del caso base è piuttosto elevato e in linea con quello del parco edilizio italiano. Il primo miglioramento porta il valore della trasmittanza ai limiti recentemente imposti attraverso il Dlgs 311, che saranno in vigore a partire dal 2010 per gli edifici di nuova realizzazione. Con questo miglioramento si ottengono risparmi che vanno dal 20% fino al 35%, corrispondenti a riduzioni di energia utile per il riscaldamento compresi tra 3 e 14 kWh/m<sup>2</sup><sub>a</sub>.

Questi risparmi possono essere incrementati portando la trasmittanza a 0,2 W/m<sup>2</sup>K, valore 4-5 volte inferiore a quello di partenza, raggiungendo risparmi percentuali che variano tra il 25 e il 60%, corrispondenti a riduzioni di energia utile per il riscaldamento compresi tra 4 e 18 kWh/m<sup>2</sup><sub>a</sub>.

Per quanto riguarda, invece, il periodo estivo, si osserva che nel caso dell'edificio con alti carichi termici (Edificio A) un incremento del livello di isolamento porta, per i climi di Roma e Palermo, ad una limitata variazione del fabbisogno per il raffrescamento, mentre per il clima di Milano il fabbisogno rimane circa costante. I risultati mostrano, per l'edificio con bassi carichi termici (Edificio B), un andamento diverso: l'aumento dell'isolamento porta ad un aumento sensibile del fabbisogno per il raffrescamento.

Questa differenza di andamento può in parte essere spiegato con le differenze esistenti tra i due edifici in termini di frazione vetrata, massa termica efficace, carichi interni.

Al di là di queste differenze, il risultato sulla relazione tra livello di isolamento e carichi di raffrescamento va però valutato con attenzione, considerando tutte le ipotesi in cui è ricavato. In particolare, mezzi di smaltimento dei carichi interni e solari comunemente disponibili sono esclusi nella simulazione del caso base e della sua variazione con maggiore isolamento.

In particolare, nel caso base che stiamo discutendo, la ventilazione meccanica viene interrotta di notte (tra le ore 21.00 e le ore 7.00) e non viene attuato nessun tipo di ventilazione naturale notturna (le finestre sono mantenute chiuse sia di giorno che di notte).

Gli obiettivi di una strategia di contenimento del fabbisogno energetico di raffrescamento (contenimento dei guadagni attraverso l'involucro e scarico di quelli residui e dei guadagni interni verso pozzi freddi esterni) non possono che essere ottenuti con una strategia integrata che metta in gioco tutti gli elementi.

L'isolamento delle parti opache durante il giorno rallenta la penetrazione di energia termica dovuta a differenza tra la temperatura aria-sole delle superfici esterne e la temperatura dell'aria di setpoint interna.

Ovviamente durante la notte se la temperatura dell'aria si abbassa sotto il set point risulta favorevole mettere in contatto l'aria esterna con quella interna e la zona interna delle pareti che ha accumulato energia durante il giorno. Questo contatto potrebbe certo essere ottenuto con una riduzione di isolamento delle pareti (che però peggiorerebbe la loro prestazione diurna), ma può essere molto più efficacemente ottenuto portando aria fresca esterna nell'interno dell'edificio, attraverso ventilazione naturale se si sono predisposte le condizioni di sicurezza e controllo adeguate, o attraverso l'azionamento della ventilazione meccanica.

In generale, i risultati che in taluni casi mostrano un aumento del fabbisogno di energia utile per il raffrescamento in corrispondenza di un incremento dell'isolamento termico dell'involucro opaco, confermano semplicemente l'utilità di adottare l'aumento di isolamento termico dell'involucro edilizio (parti opache e trasparenti), congiuntamente all'adozione di strategie di controllo degli apporti solari ("controllo solare") o di controllo e dissipazione dei carichi termici interni ("ventilazione diurna", "ventilazione notturna"). In questo rapporto le singole tecnologie sono considerate una ad una per consentire l'analisi dei loro effetti singoli, tipologia di analisi concordata nel piano di lavoro.

Il risultato conferma che è vantaggioso considerare pacchetti di azioni migliorative delle prestazioni energetiche che agiscano complessivamente e in modo completare per riscaldamento e raffrescamento.

I risultati mostrano che l'applicazione di trattamenti superficiali, come pitture o rivestimenti, atti all'aumento della riflessione della radiazione solare dalla superficie esterna dell'involucro edilizio produce alcuni benefici nella



stagione di raffrescamento. Benefici quantificabili dal 5% al 10%. Tali risparmi non sono molto marcati tuttavia si può considerare che adottare diverse azioni migliorative nello stesso intervento di riqualificazione, per motivi di opportunità da un punto di vista tecnico-operativo può agevolare non solo l'applicazione di più di un'azione nello stesso intervento, ma anche può completare un'azione più efficace con azioni che danno meno benefici, ma comunque utili: ad esempio quando si realizza l'aumento dell'isolamento termico delle superfici opache dell'involucro edilizio, intervenendo sulle pareti perimetrali, con cappotto esterno, e/o sulla copertura con il rifacimento del manto, può essere comodo completare questi interventi con i trattamenti superficiali che aumentano la riflessione della radiazione termica dalla superficie esterna dell'involucro.

Si nota una maggiore efficacia e potenzialità della ventilazione notturna in climi "più freddi". Risalendo l'Italia, da Sud a Nord, aumenta il potenziale di risparmio di energia per raffrescamento della ventilazione notturna. Questo andamento è più marcato per l'edificio con carichi termici più bassi (Edificio A).

Necessità di adottare strategie di controllo per la ventilazione notturna, adatte per i diversi contesti climatici, allo scopo di massimizzarne i benefici energetici e di comfort, minimizzare il consumo elettrico e di evitare un eventuale impatto negativo sulla richiesta energetica per il riscaldamento. A tal fine si può agire sul periodo di attivazione della ventilazione notturna durante l'anno in modo da consentirle soltanto nel periodo di raffrescamento, e predisporre un controllo in funzione delle temperature all'esterno e negli ambienti confinati.

Per quanto riguarda l'utilizzo di un recuperatore di calore, il suo impatto è sicuramente positivo in inverno, dove può portare a riduzioni del fabbisogno superiori al 20% e con punte di 40%, mentre in estate appare, a prima vista, sfavorevole. In realtà durante l'estate l'uso del recuperatore è corretto (dal punto di vista termico, ma andrebbe confortato col suo costo meccanico) durante il giorno, quando consente di ridurre la temperatura di immissione dell'aria esterna, mentre durante la notte e le prime ore del mattino, in generale quando l'aria esterna è più fresca, il recuperatore è dannoso perché riduce l'energia rimossa dall'edificio dall'aria di ricambio.

Pertanto, in presenza di un recuperatore di calore nel sistema impiantistico, per ovviare l'aumento di consumo in periodo estivo, è ovviamente opportuno predisporre componenti per bypassare i componenti di recupero di calore nell'impianto di ventilazione, per alcuni periodi di raffrescamento, in funzione di controlli di temperatura sull'aria esterna ed interna.

L'incremento della capacità termica degli elementi costruttivi (solai e pareti) non produce grandi benefici. Tuttavia, si deve considerare che sono state applicate variazioni di massa areica degli elementi realizzabili con interventi di ristrutturazione, pertanto le variazioni di capacità termica dell'intero edificio non è risultata molto ampia. Inoltre gli elementi costruttivi degli edifici base presentano già in partenza un valore di capacità termica effettiva medio, e non basso.

Si deve anche considerare che la presenza di pareti e solai più massivi, può portare a benefici maggiori se il calore accumulato nelle masse dei componenti edilizi può essere rimosso con un adeguata strategia di ventilazione.

Pertanto per sfruttare al meglio i benefici energetici per il raffrescamento apportati da un incremento di capacità termica dell'edificio, si deve associare ad un incremento di massa termicamente efficace un incremento della ventilazione (nelle ore in cui la temperatura dell'aria esterna è sufficientemente bassa per asportare parte del calore accumulato nelle masse dell'edificio).

## ANALISI EDIFICI ADIBITI A SCUOLE - Consumi energetici delle scuole primarie e secondarie

La ricerca di dati riguardanti i consumi energetici delle scuole primarie e secondarie delle regioni d'Italia è stata avviata contattando le Amministrazioni comunali e provinciali delle regioni italiane.

Per ciascuna scuola si è deciso di considerare:

- dati climatici: regione di appartenenza, zona climatica, gradi giorno;
- dati geometrici: superficie utile, superficie disperdente, volume lordo riscaldato, fattore di forma S/V;
- consumi termici ed elettrici.

In base alle informazioni reperite per ciascun istituto, sono stati poi inseriti altri dati utili alla definizione del sistema edificio-impianto.

L'indagine ha consentito di ottenere un primo censimento dello stato energetico degli edifici scolastici.

Un edificio è tanto più efficiente quanto più è compatto. In altre parole quanto più è piccolo il rapporto S/V ovvero quanto è minore la superficie disperdente rispetto al volume che racchiude. Solamente il 4% degli edifici scolastici

con il maggior numero di dati disponibili presenta un rapporto di forma S/V minore di 0,3 (Figura 127), questo significa che mediamente gli edifici hanno una grande superficie disperdente.

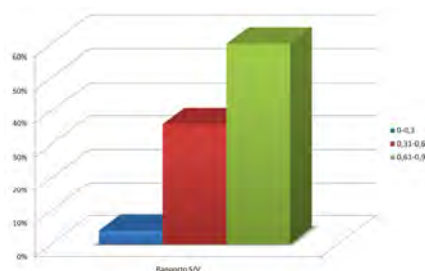


**Figura 127. Incidenza del rapporto S/V su edifici scolastici (72 scuole)**

A differenza di edifici passivi residenziali, quelli scolastici dovrebbero essere riscaldati a regime intermittente (riduzione del riscaldamento nelle ore senza lezione). Il regime intermittente porta ad una temperatura interna media inferiore a quella di progetto e, con l'abbassamento della temperatura, si ridurrebbero anche le perdite di calore.

I primi beneficiari dell'uso razionale dell'energia nelle scuole sono gli alunni e gli operatori scolastici per quanto riguarda il miglioramento del comfort ambientale e le amministrazioni per quanto riguarda il contenimento della spesa energetica. Nel caso delle scuole statali i beneficiari diretti sono i comuni, le province e le istituzioni scolastiche delegate, che hanno la competenza della gestione degli uffici scolastici.

Il percorso di ricerca seguito ha evidenziato la necessità di sensibilizzare le amministrazioni e i dirigenti scolastici in modo da suscitare interesse e attenzione verso le soluzioni tecnologiche più efficienti.

## ANALISI DI EDIFICI RESIDENZIALI

L'attività di ricerca relativa è stata suddivisa in due parti che coprono rispettivamente i seguenti aspetti:

- ricerca e definizione di dati disponibili riguardanti il monitoraggio dei consumi finali di energia nel settore residenziale;
- elaborazione dei dati disponibili con l'individuazione di indici e livelli di consumo di energia.

In particolare sono stati considerate ricerche relative a campagne di acquisizione dati sui consumi finali di energia nel settore residenziale, (progetti Save Eureco, Ecodrome, Micene) nonché alla definizione delle variabili che ne influenzano i valori. In questa fase sono stati individuati i principali indici proposti ed i livelli di consumo medi in riferimento alle seguenti categorie: riscaldamento, condizionamento, ventilazione, illuminazione, elettrodomestici, apparecchi elettronici.

Il diffondersi di un numero sempre maggiore di apparecchi elettrici all'interno delle abitazioni in conseguenza sia di un maggior benessere economico che dello sviluppo delle tecnologie, ha portato ad un incremento pressoché continuo dei consumi per usi elettrici obbligati dal 1990.

I Decreti del 20 luglio del 2004 hanno introdotto l'obbligo, per le Aziende di Distribuzione dell'Energia Elettrica e del Gas, di realizzare Progetti per l'Incremento dell'Efficienza Energetica, con l'obiettivo di ridurre il consumo di energia primaria attraverso la riduzione dei consumi negli usi finali.

L'andamento dei consumi per usi elettrici obbligati, sempre crescenti nella UE, è il risultato da un lato della sempre maggiore penetrazione di applicazioni elettriche nel settore residenziale e dall'altro dell'immissione sul mercato di tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico.

In questa ottica, negli ultimi anni in tutta l'Unione Europea, è stata posta particolare attenzione a promuovere politiche volte a favorire l'efficienza e il risparmio di energia elettrica. La crescita della domanda è costante in tutti i settori dell'economia, anche se è molto differenziata dall'uno all'altro. Nel periodo 1999-2004 il maggior incremento di domanda elettrica nell'UE è stato registrato nel terziario (+ 15,6 %), seguito dal residenziale (+ 10,8 %) e del settore industriale (9,5 %).

Per quanto concerne il settore residenziale, i motivi che portano ad un costante aumento della domanda sono numerosi, tra questi sono da considerare introduzione di nuovi apparecchi elettronici, aumento del numero di apparecchi per singola famiglia, l'uso generalizzato della funzione stand-by.

Nel corso dell'attività è stata messa a punto una metodologia di analisi scegliendo la categoria degli elettrodomestici e degli apparecchi elettronici, per la quale erano disponibili informazioni più complete per i consumi energetici. Si è dunque dapprima preceduto ad una classificazione dettagliata dei singoli apparecchi appartenenti alle classi considerate (refrigerazione, lavaggio, information technology e intrattenimento) e successivamente, per ogni tipologia considerata e per ogni indice di consumo individuato, si sono confrontati tra loro i dati acquisiti dalle diverse fonti bibliografiche; ciò ha consentito di individuare le principali variabili di influenza sui consumi energetici considerati, ed ottenere un valore medio del consumo.

Per ognuno dei componenti considerati sono stati inoltre approfonditi gli aspetti tecnologici, i dati sociologici-statistici sulla loro diffusione ed i principali riferimenti legislativi.

A titolo di esempio nel seguito si riporta lo studio relativo alla lavabiancheria, elettrodomestico presente nella quasi totalità delle abitazioni. Per le analisi relative ad altri elettrodomestici ed apparecchi elettronici si rimanda al documento completo disponibile sul sito ENEA.

#### Aspetti merceologici

Analizzando il quadro europeo di alcuni paesi (Olanda, Danimarca e Belgio) si nota che vi è una percentuale maggiore di diffusione di lavatrici di classe A/A+, come riporta la Figura 128 riferita all'anno 2004.

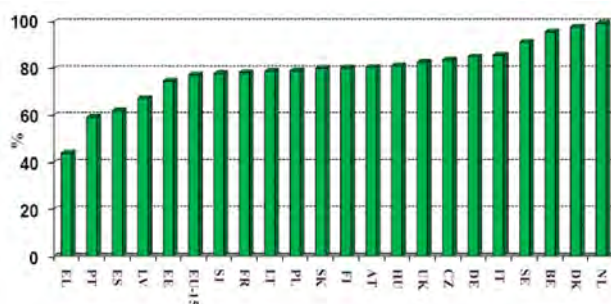


Figura 128. Direttiva Europea: introduzione di etichette A/A+ per lavatrici (2004)

La vendita di lavatrici di classe A risulta essere superiore al 50% già nel 2004 in nazioni come la Germania, i Paesi Bassi, il Belgio, la Francia, l'Austria, la Svezia, il Regno Unito, il Portogallo, la Spagna, la Svezia e l'Italia. In alcune nazioni come l'Austria, il Belgio, la Francia, la Germania, la Svezia, il Regno Unito e i Paesi Bassi vi è un aumento di vendita di lavatrici nel 2005 di classe A+, mentre nazioni come l'Italia, il Portogallo e la Spagna vedono una diminuzione di vendite di lavatrici di classe A+ nel 2005 rispetto al 2004 (Figura 129).

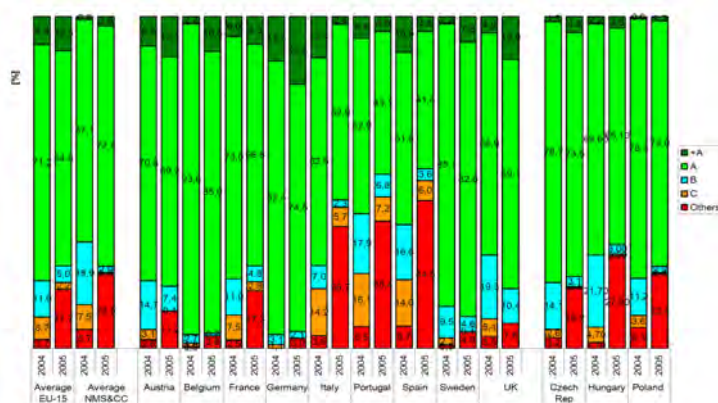


Figura 129. Vendite di lavatrici: confronto tra 2004 e 2005 per classi energetiche<sup>2</sup>

In ambito nazionale, da fonte: Istat e Federcomin, risulta che la lavatrice è uno degli elettrodomestici più diffusi presso le famiglie: dopo avere avuto un forte incremento dal 1996 in poi, l'introduzione si aggira oggi intorno al

<sup>2</sup> Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union: Status Report 2006, condotto dall'Istitute for Environment and Sustainability (IES) del Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione Europea

97%, mentre l'introduzione della lavastoviglie è invece più bassa (intorno al 41%) ed è aumentata in media di 1,5 punti percentuali all'anno.

### Aspetti legislativi

Gli apparecchi per il lavaggio domestico sono caratterizzati da un'etichetta obbligatoria dal 1999 (Figura 130). A differenza degli apparecchi per il freddo che hanno un'etichetta divisa in 5 settori, per questi elettrodomestici l'etichetta è più complessa e comprende 7 settori.

Il settore 1 identifica l'apparecchio, il modello ed il produttore, il settore 2 riporta le classi di efficienza energetica ed evidenzia a quale classe appartiene l'elettrodomestico in esame, così come per gli elettrodomestici per il freddo è rappresentato da frecce di lunghezza decrescente, ognuna di colore differente. Il settore 3 indica il consumo energetico, espresso in kWh per ciclo di lavaggio. È una misura di laboratorio calcolata sul ciclo normale del cotone ad una temperatura di 60°, secondo una procedura standardizzata e valida per tutta l'Unione Europea che prevede il confronto con una macchina campione. Il consumo effettivo dipende dalle modalità con cui l'apparecchio viene utilizzato e può discostarsi sensibilmente da quanto misurato.

Il settore 4 indica la classe di efficacia del lavaggio con lettere che vanno da A (efficienza massima = più pulito) a G (efficienza minima = meno pulito). Anche qui le prove per valutare l'efficienza di lavaggio sono condotte in laboratorio, per il ciclo normale del cotone a 60 °C, secondo una procedura standardizzata in base alla quale vengono confrontati i risultati del lavaggio con quelli offerti da una macchina di riferimento in termini di pulizia e di bianchezza del bucato.

Il settore 5 indica la classe di efficacia della centrifugazione con lettere che vanno da A (efficienza massima = meno acqua residua nel bucato) a G (efficienza minima = più acqua residua nel bucato). Come nei casi precedenti, le misure sono effettuate in laboratorio.

Nel settore 6 vengono indicati la capacità di scarico ed il consumo idrico per ciclo di lavaggio, riferito a misurazioni effettuate su un ciclo normale eseguito alla temperatura di 60 °.

Il settore 7 indica la rumorosità dell'apparecchio durante le fasi di scarico dell'acqua e di centrifuga.

È evidente che i settori 1, 2, 3, 6, 7 delle etichette sono uguali sia per le lavatrici che per gli elettrodomestici per il freddo.

### Consumi energetici

Naturalmente il consumo di una lavabiancheria dipende fortemente dal tipo di ciclo di lavaggio che viene scelto e soprattutto dalla temperatura selezionata.

I dati di monitoraggio del progetto MICENE<sup>3</sup> stabiliscono che il consumo medio annuo misurato per le lavabiancheria è pari a 224 kWh/anno. La Figura 131 mostra l'andamento della curva media giornaliera della potenza assorbita dalle lavabiancheria. Viene evidenziato un picco principale alla 10:00 del mattino (circa 90 W).

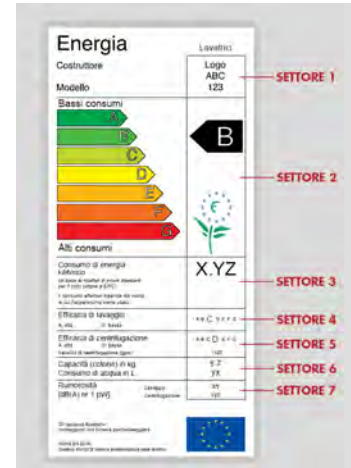


**Figura 130. Etichetta energetica presente sugli elettrodomestici per il lavaggio e l'asciugatura della biancheria per uso casalingo**

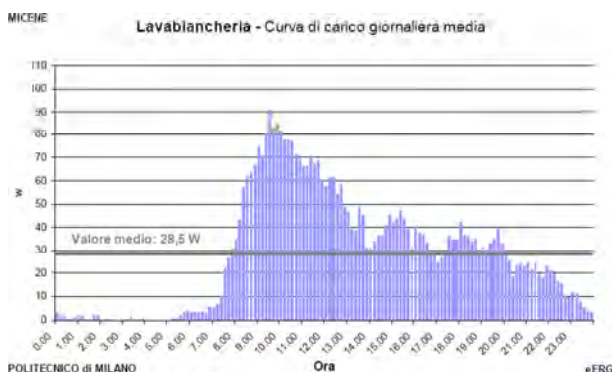


**Figura 131. Curva di carico giornaliera media relativa a tutti i giorni dell'anno**

<sup>3</sup> eERG, end-use Efficiency Research Group, Dipartimento di Energetica Politecnico di Milano, Micene, Misure dei Consumi di Energia Elettrica in 110 abitazioni Italiane, Curve di carico dei principali elettrodomestici e degli apparecchi di illuminazione. Settembre 2004

In Figura 132 si riporta la stessa curva mediata, rispettivamente sui giorni feriali e sui giorni festivi. L'andamento della curva di carico relativa ai giorni feriali ricalca quello della Figura 131. Nei giorni festivi, invece, si riscontra lo spostamento del picco principale (centrato sulle ore 12:00) e di quello secondario (ore 16:00). Si nota, inoltre, un incremento della potenza assorbita intorno alle 19:00.

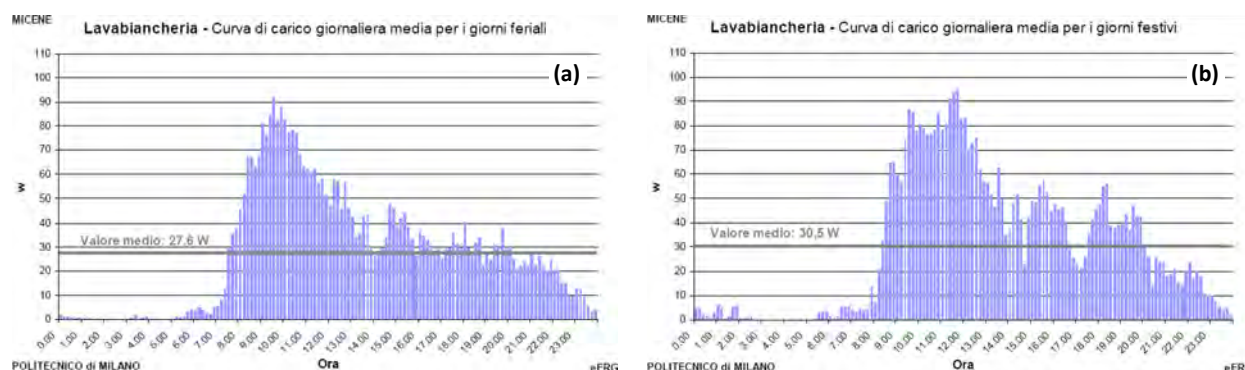


Figura 132. Curva di carico giornaliera media relativa ai giorni feriali (a) e festivi (b)

## DEFINIZIONE DEGLI INDICI E DEI LIVELLI DI FABBISOGNO DEI VARI CENTRI DI CONSUMO ENERGETICO DEGLI EDIFICI E VALUTAZIONE DEI CONSUMI NELL'EDILIZIA ESISTENTE

Sono state quindi sviluppate delle prime linee guida di sintesi per il legislatore riportanti le linee di intervento più significative per il contenimento dei consumi energetici degli edifici nuovi ed esistenti.

### Prime linee guida di sintesi per il legislatore riportanti le linee di intervento più significative per il contenimento dei consumi energetici degli edifici esistenti

La legislazione nazionale è ormai condizionata o quanto meno largamente influenzata dalle direttive europee anche in materia di prestazioni energetiche degli edifici. E' necessario quindi riferirsi innanzitutto all'evoluzione di quanto si prevede di attuare a livello europeo, individuando il riflesso di tali provvedimenti sulla legislazione nazionale e le posizioni nazionali al riguardo.

La Direttiva 2002/91/CEE è il documento legislativo europeo di base collegato a varie altre direttive. A diversi anni dalla sua emanazione, la Comunità ha in progetto la sua revisione per rendere più incisivo l'intervento di riduzione dei consumi, anche a fronte di perplessità che emergono sulla possibilità di raggiungere i traguardi previsti nel 2020.

In Italia il recepimento della Direttiva è stato attuato con due provvedimenti fondamentali:

- il DLgs 19 agosto 2005 n. 192;
- il DLgs 29 Dicembre 2006 n. 311(integrativo al precedente decreto).

I due decreti si inseriscono nel quadro degli altri provvedimenti legislativi precedenti. Ne risulta un quadro legislativo complesso che riguarda tutti gli aspetti dei consumi di energia degli edifici, limiti di prestazione, incentivi, ecc.

L'emanazione della nuova Direttiva EPDB richiederà ulteriori adeguamenti del quadro legislativo attuale, come pure la direttiva RES sulle energie rinnovabili.

I pilastri fondamentali della legislazione in materia di contenimento dei consumi energetici riguardano:

- i requisiti energetici degli edifici;
- la procedura di calcolo e di verifica dei requisiti energetici;
- il campo di applicazione agli edifici anche per quanto riguarda la soglia di superficie e gli interventi di ristrutturazione;
- la certificazione energetica;

### *Requisiti energetici degli edifici*

Attualmente i requisiti energetici di prestazione degli edifici per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria sono diversi nei vari Stati Membri.

Le proposte per la revisione prendono in considerazione varie opzioni al riguardo tra cui in primis l'adozione di livelli minimi di prestazione su base europea tenendo conto delle condizioni climatiche. Ciò porterebbe ad un livellamento su base più bassa per quegli Stati che hanno livelli minimi di prestazione più elevati (ciò riguarda anche l'Italia).

Un provvedimento di questo tipo viene però considerato dalla Commissione di difficile introduzione in relazione alle conseguenze sulle legislazioni nazionali e per la complessità della sua definizione.

Le opzioni prese in considerazione dalla Commissione in merito ai requisiti di prestazione energetica sono:

- introduzione di limiti su base europea;
- introduzione di un sistema di *benchmarking* per la valutazione costi/benefici nell'adeguamento dei limiti alle situazioni nazionali e locali;
- imposizione di uno schema di progressivo miglioramento della qualità degli edifici esistenti;
- la definizione di requisiti molto bassi o zero per le case passive.

Alla prima opzione viene attribuito il massimo potenziale effetto sulla riduzione di consumi.

L'opzione relativa alla definizione di *benchmarking* per valutare in modo omogeneo negli Stati Membri l'effetto di un rafforzamento di requisiti minimi tenendo conto delle situazioni climatiche e locali in relazione al rapporto costi/benefici è ritenuto quello più facilmente praticabile. In altre parole, in questo modo la definizione dei requisiti minimi resterebbe a discrezione degli Stati nazionali ma con un collegamento tra requisiti, costi e benefici ottenibili secondo procedure definite a livello europeo.

Per quanto riguarda l'Italia si deve considerare che i limiti di fabbisogno energetico sono stati definiti da alcuni anni or sono e prima della introduzione delle relative metodologie di calcolo. Dovrebbero quindi essere prese in considerazione le seguenti azioni:

- una verifica del posizionamento dei limiti nazionali nel quadro europeo anche in relazione alle condizioni climatiche molto differenziate del Paese;
- una verifica dei livelli di prestazione energetica con le metodologie e strumenti di calcolo successivamente introdotti.

In altri Stati Membri è previsto un monitoraggio sui limiti di prestazione e una loro eventuale revisione quinquennale. Su questo punto è necessario anche in Italia un effettivo monitoraggio anche in relazione alle tecnologie edilizie ed impiantistiche.

La differenziazione dei metodi di valutazione al livello locale crea ostacoli al riguardo.

Le restanti due opzioni riguardano gli edifici esistenti e gli edifici nuovi. I risultati ottenibili in termine di riduzione dei consumi sono molto elevati ma la Commissione ritiene che i provvedimenti in materia debbano essere demandati ai governi nazionali e inseriti nel piano delle attività richieste dalla Direttiva 2006/32/EC.

Relativamente all'Italia il campo di applicazione agli edifici esistenti riguarda circa 10 milioni di alloggi di bassissima qualità energetica costruiti tra il 1945 e il 1976. Per gli edifici nuovi la definizione dei requisiti energetici dovrà tenere conto degli edifici a bassissimo consumo in base a quanto esposto più avanti.

### *Procedura di calcolo e di verifica dei requisiti energetici*

Le proposte di revisione prevedono che la direttiva imponga una metodologia unica di calcolo su base europea che dovrà essere disponibile entro il 2010.

In Italia, pur in presenza di diversificazioni regionali, esiste un riferimento univoco costituito dalla UNI TS 11300. Tale approccio al problema della univocità è stato affrontato in modo analogo in altri Stati Membri, pur facendo riferimento al pacchetto di norme EPDB.

Sono in corso e proseguiranno seminari, forum di discussione e audizioni al riguardo ed è necessaria una partecipazione nazionale qualificata anche per presentare istanze nazionali.

*Campo di applicazione agli edifici anche per quanto riguarda la soglia di superficie e gli interventi di ristrutturazione*

La direttiva EPBD ha introdotto una soglia di 1.000 m<sup>2</sup> di superficie utile nel caso di ristrutturazione di edifici. Tale soglia è attualmente in discussione per la revisione della direttiva e sono state esaminate tre opzioni :

- riduzione della soglia a 500 m<sup>2</sup>;
- riduzione della soglia a 200 m<sup>2</sup>;
- eliminazione della soglia.

A livello europeo si valuta che una soglia al di sopra di 1.000 m<sup>2</sup> interessi mediamente solo il 7% degli edifici e si considera che solo con un annullamento della soglia si possano raggiungere risultati significativi nel contenimento dei consumi.

Rispetto ad un risparmio nel 2020 pari a 3 Mtep/anno con la prima opzione (500 m<sup>2</sup>) e si stima una riduzione di 20 Mtep con la terza opzione (assenza di soglia).

Tale valore varia nei vari Stati Membri. In Italia pur con una maggiore incidenza di edifici plurifamiliari sul numero complessivo degli alloggi, si deve considerare che, assumendo la superficie media di riferimento di 80 m<sup>2</sup>, il numero di alloggi in un edificio di 1.000 m<sup>2</sup> è già tra 12 e 13.

Anche il legislatore nazionale non può non prendere in considerazione con provvedimenti adeguati questo punto in relazione ad un più incisivo intervento sugli edifici esistenti.

#### *La certificazione energetica*

La Direttiva attuale prescrive che la certificazione energetica sia obbligatoria:

- per gli edifici di nuova costruzione;
- per gli edifici interamente ristrutturati entro i limiti prescritti;
- in caso di transazioni immobiliari o di locazioni.

L'ultimo punto è l'unico obbligo previsto nel caso di edifici esistenti. Come già detto, in Italia il parco edilizio comprende una elevata percentuale di edifici di bassissima qualità energetica.

Deviazioni nazionali da quanto prescrive la direttiva escludono questi edifici dagli effetti derivanti dalla certificazione energetica non consentendo di intervenire sull'area più promettente per la riduzione dei consumi energetici. Ciò anche perché la quantità delle ristrutturazioni e la conseguente riduzione dei consumi è minore nel nostro Paese rispetto a quanto avviene in altri Paesi europei.

A livello europeo si considera infatti una durata di vita degli edifici di 25 anni prima di ristrutturazioni importanti o di demolizioni. In Italia tale durata è maggiore e ciò porta ad una ulteriore esclusione di interventi sul parco edilizio esistente.

Altro punto riguarda la qualità della certificazione energetica e la revisione della Direttiva prevede di intervenire attuando un maggior rigore sulla qualità dei certificati.

Vengono esaminate le seguenti opzioni di intervento:

1. definire requisiti per la qualità dei certificati;
2. prescrivere che le raccomandazioni contenute nei certificati relative a interventi idonei a ridurre i costi energetici siano effettuate entro un certo periodo di tempo dalla data di rilascio del certificato stesso;
3. prescrivere che i certificati siano una parte integrante degli annunci di vendita e/o dei rogiti nei casi di vendita;
4. stabilire un collegamento tra il certificato e altri dispositivi di supporto o dissuasione.

Il maggior potenziale di risparmio energetico viene attribuito all'opzione 1. Elevato è anche il risultato ipotizzato con l'opzione 2.

La qualità dei certificati energetici è un punto di cruciale importanza anche in Italia. La qualità dei certificati energetici è collegata ad aspetti fondamentali quali:

- le disposizioni legislative al riguardo;
- i metodi di calcolo e di valutazione;
- la qualificazione degli operatori.

Nei riguardi dei certificati energetici si deve fare una netta distinzione tra:



- edifici di nuova progettazione;
- edifici esistenti.

Nel primo caso deve essere disponibile un progetto completo di tutti i dati geometrici e termofisici dell'edificio, dei dati e degli schemi degli impianti. La verifica dei requisiti energetici è una diretta conseguenza della progettazione e dimensionamento del sistema edificio-impianto.

Nel secondo caso il certificatore si trova di fronte ad opere prive spesso di qualsiasi documento o di documenti non attendibili. Alcuni schemi di certificazione richiedono per gli edifici esistenti la realizzazione di disegni e la verifica dei componenti in opera. Nella vigente legislazione nazionale vi sono alcune indicazioni al riguardo.

La UNI TS 11300 parti 1 e 2 ha introdotto criteri di valutazione per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici sia di nuova progettazione che esistenti.

Tuttavia, in ambito legislativo si intende minimizzare i costi della certificazione anche adottando procedure fortemente semplificate. Ciò può essere valido per un primo screening degli edifici ma non risponde a requisiti di qualità energetica dei certificati.

La legislazione vigente assegna un ruolo più approfondito alla diagnosi energetica, ma i ruoli di certificazione e diagnosi dovrebbero essere distinti e ulteriormente chiariti.

Alcuni Stati Membri hanno definiti livelli diversi di intervento basati sulla qualità energetica degli edifici stabilendo graduatorie di applicazione prendendo come base i livelli più bassi. In Italia di fronte ad un 60% circa di abitazioni di qualità bassa e media il potenziale di riduzione dei consumi attuando efficaci interventi è molto elevato.

Da tutto ciò consegue che la legislazione nazionale dovrebbe porsi come obiettivo la riduzione dei consumi nell'edilizia esistente che è condizionata dalla qualità delle certificazioni e delle ispezioni.

Infine, la preparazione dei certificatori dovrebbe essere a livello della qualità delle certificazioni che si vuole ottenere, con una netta diversificazione di qualificazione professionale tra certificazione e diagnosi.

## *ENERGIE RINNOVABILI*

Nella revisione della Direttiva si pone in evidenza la necessità che l'utilizzo di impianti ad energie rinnovabili (solare termico, pompe di calore, geotermico) siano progettati e realizzati da tecnici qualificati al riguardo.

Anche a livello legislativo nazionale questo aspetto dovrebbe essere adeguatamente considerato. Alcune disposizioni nazionali in vigore prescrivono che per queste tipologie di impianto venga effettuata una preventiva valutazione in merito alle soluzioni da adottare (ad esempio il tipo di sorgente fredda in impianti a pompa di calore tenendo conto delle condizioni climatiche e del sottosuolo, delle aree disponibili).

Si dovrebbe inoltre considerare la verifica tra dati di progetto e risultati in opera dopo un determinato periodo di esercizio (da 1 a 3 anni). Un adeguato monitoraggio degli impianti dovrebbe essere sostenuto.

Il processo realizzativo degli impianti ad energie rinnovabili richiede:

- la disponibilità di dati certificati o comunque attendibili dei prodotti (componenti);
- metodologie per una valutazione pre progettuale delle soluzioni ipotizzabili;
- norme tecniche per la progettazione ed esecuzione;
- norme di collaudo.

Tutto ciò si collega a quanto proposto per la revisione della Direttiva.

In merito ai prodotti si deve rilevare che la disponibilità di dati idonei per la progettazione degli impianti è insufficiente, in particolare per le pompe di calore con sorgente fredda idraulica, geotermica e idrotermica.

In relazione al potenziale di sviluppo di queste tecnologie, i laboratori di prova sono in numero inadeguato sia per le verifiche che per lo sviluppo.

Si deve d'altro lato considerare che anche in questo campo entrano in Italia prodotti non certificati da Paesi extracomunitari cosa che avviene già da tempo in larga misura per i componenti tradizionali.

In sintesi l'attenzione del legislatore in questo campo dovrebbe considerare:

- la certificazione dei prodotti (pompe di calore, collettori solari, kit solari, unità di micro e piccola cogenerazione);
- il riferimento a documenti normativi per le valutazioni e progettazione;

- procedure per la verifica dei risultati rispetto ai dati certificati.

Prerequisito per lo sviluppo nell'utilizzo di energie rinnovabili è che gli impianti realizzati forniscano i risultati previsti, preoccupazione come già evidenziato espressa per la revisione della Direttiva.

A livello nazionale, per quanto riguarda la produzione di acqua calda sanitaria, le disposizioni legislative vigenti prescrivono che una quota pari al 50% del fabbisogno annuo di energia primaria per tale servizio sia coperta da solare termico. Nella pratica applicazione di tale disposizione si confonde spesso energia primaria con energia termica utile ottenuta dai collettori solari.

Nella parte 4 della UNI TS 11300 - in fase di preparazione - si dimostra che la copertura del 50% di energia primaria richiede una produzione di energia solare pari al 60-65 %. Ciò crea notevoli difficoltà nel dimensionamento tenendo conto dei fabbisogni di energia termica utile specificati nella normativa. Per risolvere tale difficoltà regolamenti locali prevedono un abbattimento dei fabbisogni di energia termica utile del 20%. In sede legislativa si dovrà tenere conto di queste incongruenze.

La copertura imposta dovrà essere chiaramente riferita a "energia rinnovabile" anche in accordo con quanto previsto dalla Direttiva RED. In tal modo la copertura prevista potrà essere ottenuta con sistemi a pompe di calore che non prelevino energia termica della sorgente fredda da recuperi provenienti da energie fossili e che rispettino il modello di calcolo della quota assimilata a rinnovabile.

Ulteriori aspetti nei quali occorrerà tenere conto riguardano i sistemi di generazione diversi dalla combustione a fiamma. Questi casi riguardano, oltre al solare termico già citato:

- solare fotovoltaico;
- combustione di biomasse;
- micro e piccola cogenerazione;
- teleriscaldamento;
- pompe di calore.

Tutti i suddetti sottosistemi di generazione sono generalmente inseriti in sistemi polivalenti e plurienergetici. Ciò deve essere quindi considerato anche sul piano legislativo in accordo con la normativa tecnica. Unitamente a questo vanno anche considerati i fattori di conversione in energia primaria per i vari vettori energetici.

In conclusione le aree di intervento per la riduzione dei consumi energetici in edilizia riguardano:

- la costruzione di nuovi edifici di alta e altissima qualità energetica avvalendosi delle nuove tecnologie edilizie e impiantistiche e con valido ricorso ad energie rinnovabili;
- l'adeguamento totale o parziale degli edifici esistenti.

Il primo tipo di interventi si applica a volumi relativamente limitati e gioca un ruolo più ridotto nell'abbattimento dei consumi, ma è essenziale per lo sviluppo del Paese e dell'industria nazionale.

Il secondo tipo di interventi si applica ad un parco edilizio di grandi dimensioni e di diversa qualità energetica e il grande potenziale di riduzione dei consumi è in quest'area.

### **C. Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati**

#### **ANALISI DI EDIFICI OSPEDALIERI**

Il patrimonio immobiliare ospedaliero gestito dalle aziende sanitarie è particolarmente ampio e variegato, con fabbricati di epoche differenti e destinazioni sanitarie diversificate. Questi edifici presentano ampi margini di risparmio energetico, conseguibili sia attraverso un miglioramento dell'efficienza dei sistemi edificio-impianto, sia tramite una gestione più oculata dell'energia, che purtroppo di rado si registra in una struttura pubblica.

Per affrontare un'analisi dettagliata della spesa energetica degli ospedali è fondamentale cercare di delineare un quadro nazionale dei consumi in questo settore. Purtroppo dati disaggregati sono di difficile reperibilità, principalmente perché i soggetti che li hanno raccolti, generalmente tramite affidamento di specifici incarichi contrattuali, non intendono divulgarli oppure sono tenuti a mantenere il segreto statistico. Un'ulteriore difficoltà nella raccolta d'informazioni dalle aziende sanitarie è dovuta allo scarso interesse che la dirigenza solitamente mostra nei confronti del problema del consumo energetico. Infatti, alla luce della bassa incidenza di questa spesa all'interno dell'economia complessiva di un'azienda sanitaria, essa può risultare poco propensa a interventi migliorativi. In particolare, nel bilancio complessivo del Sistema Sanitario Nazionale l'approvvigionamento di combustibile (escluso quello per il trasporto a motore) e il rifornimento di energia elettrica incidono per circa il

2%. Queste due spese infatti corrispondono, rispettivamente, al 5% e al 2,2% della quota di bilancio relativa a beni e servizi, la quale, a sua volta, è pari al 27% della spesa totale. A livello regionale questi valori si discostano di poco. Abbiamo dunque a che fare con una spesa per l'energia relativamente bassa, ma significativa in senso assoluto per il Paese, poiché corrispondente a quasi due miliardi di euro annuo. Non va inoltre dimenticato che un miglioramento dell'efficienza energetica non deve per forza tradursi soltanto in un vantaggio economico rilevabile in bolletta, ma può essere anche impiegato per incrementare il benessere termoigrometrico e la salubrità degli ambienti, a maggior ragione visto il fine stesso degli edifici in esame e la particolare condizione in cui si trovano i propri utenti.

In un diverso studio relativo alla sola regione Emilia Romagna e riferito a 22 aziende ospedaliere, si passa dalle 5.6 alle 34,6 tep per posto letto, a conferma della scarsa attendibilità di questo parametro. In conclusione si può affermare che, sebbene di facile reperibilità, il posto letto non risulta idoneo come indicatore di consumi specifici per la valutazione dell'efficienza energetica di un edificio ospedaliero. D'altra parte, anche indicatori apparentemente più adatti come il volume riscaldato e la superficie in pianta presentano limiti notevoli, non affrontando il problema di un'attenta caratterizzazione della destinazione d'uso dei singoli locali costituenti il complesso edilizio e del loro specifico contributo al consumo complessivo di energia.

### *Simulazioni dinamiche di due ospedali tipo e confronto con i consumi reali*

Una via alternativa per la valutazione dei consumi, prevista pure nelle direttive europee sull'efficienza energetica, è il cosiddetto approccio "bottom-up", che consiste nell'identificazione di tipologie costruttive particolarmente significative e frequenti nel parco edilizio nazionale e, per ciascuna di queste classi, nell'analisi dettagliata di un singolo fabbricato, da utilizzare come benchmark per una successiva estensione dei risultati ottenuti e delle conclusioni tratte.

In assenza quindi di dati capillari non solo sui consumi, ma anche sulle soluzioni strutturali e impiantistiche utilizzate e sugli effettivi modelli occupazionali, si è deciso di analizzare con accuratezza due ospedali significativamente diversi, in termini di dimensioni, funzioni e anno di costruzione. Due tipologie costruttive particolarmente significative per l'edilizia ospedaliera nazionale sono infatti quella di una struttura grande, moderna e polivalente, al servizio di un distretto sanitario, e quella di un ospedale piccolo, di vecchia fabbricazione, ad uso prevalentemente ambulatoriale, collocato in un centro urbano di dimensioni ridotte. All'interno di queste classi di edifici, sono stati selezionati per essere utilizzati come banco di prova, rispettivamente, il Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio a Firenze e l'Ospedale degli Infermi a San Miniato, Pisa.

Il Nuovo Ospedale di Firenze è stato inaugurato nel 1982. Il suo principale bacino d'utenza è rappresentato dai quartieri della zona sud-ovest di Firenze e dai comuni limitrofi, dispone di 367 posti letto tra ordinari e day hospital. Nell'ospedale sono presenti tutte le discipline mediche di base, oltre a molte specialistiche; è dotato inoltre di tecnologie sanitarie e servizi diagnostico-terapeutici moderni. Il complesso ospedaliero è composto da un unico fabbricato che si sviluppa su sei piani rialzati, oltre al seminterrato, al piano terra e alla copertura, per un totale di 30.200 m<sup>2</sup> in pianta.

L'Ospedale degli Infermi è invece costituito da due edifici principali, un ex-sanatorio risalente agli anni Trenta e un ex-convento del Settecento, più volte ampliato e ristrutturato. La struttura sanitaria è situata a San Miniato Alta, ad una quota di circa 140 m sul livello del mare. Il complesso fornisce principalmente servizi ambulatoriali; inoltre è specializzato nella dialisi e nella riabilitazione dei pazienti. Complessivamente ha una disponibilità di 64 posti letto e una superficie in pianta di 7.550 m<sup>2</sup>.

Queste due strutture sanitarie si sono rese disponibili a collaborare, fornendo una serie d'informazioni tecniche fondamentali per l'analisi dei consumi energetici e relative a: geometria del complesso ospedaliero, materiali impiegati nell'edificio per pareti e infissi, impianti installati e loro condizioni di funzionamento, modelli dei singoli locali, in termini di orari di occupazione per il calcolo degli apporti interni e per il controllo di temperatura, umidità e ricambi d'aria. Ci sono inoltre stati consegnati gli storici dei consumi di energia elettrica, combustibili e acqua, rilevati con cadenza mensile. Queste informazioni, necessarie per la successiva simulazione numerica di tipo dinamico degli edifici, ci sono state gentilmente comunicate, per ciascun ospedale, dal relativo responsabile dell'uso dell'energia, dalla direzione sanitaria o dall'ufficio tecnico competente; altrimenti sono state rilevate direttamente sul campo, durante i vari sopralluoghi che abbiamo effettuato.

Dal punto di vista meteorologico, le zone di Firenze e Pisa non presentano prerogative particolari, trovandosi anzi in un contesto climatico medio e comune per l'Italia. Come parametri climatici esterni, si è sfruttato il TMY locale, che fornisce con dettaglio orario: temperatura e umidità dell'aria, direzione e intensità del vento, posizione del sole e grado di nuvolosità.

Tutti questi dati rappresentano le condizioni d'ingresso per simulare gli andamenti dinamici di temperatura e umidità nei vari locali che costituiscono i fabbricati. Un calcolo accurato del comportamento dinamico è indispensabile non solo per determinare correttamente il fabbisogno complessivo di energia primaria, ma anche per valutare il contributo delle singole zone funzionali dell'ospedale e l'efficacia di determinati interventi operativi di riqualificazione energetica.

Per la simulazione del sistema edificio-impianto ci siamo avvalsi di due software evoluti e globalmente riconosciuti come EnergyPlus (Dipartimento di Energia degli Stati Uniti) e TRNSYS (Università del Wisconsin – Madison). Entrambi i codici non hanno un'interfaccia grafica di facile fruibilità, perciò ci si è avvalsi del supporto di software specifici per costruire il modello della struttura come DesignBuilder e Mc4Suite.

Allo scopo di semplificare la modellazione, è stata condotta la suddivisione degli edifici in zone composte da più locali, assimilabili sulla base della stessa destinazione d'uso e conseguente specificità degli apporti termici interni, dei ricambi d'aria necessari, dei terminali d'impianto presenti e del loro sistema di regolazione. Per il calcolo del fabbisogno di combustibile, una volta ottenuta via software l'energia fornita dai terminali d'impianto nel periodo invernale, sono stati utilizzati i rendimenti di emissione, regolazione, distribuzione e produzione, secondo la normativa UNI/TS 11300 del 2008, parti 1 e 2. Sempre sulla base della stessa norma, abbiamo corretto le dispersioni dalle pareti per tener conto dei ponti termici (stima del 10% aggiuntivo) e si è valutata l'energia primaria impiegata per la produzione annuale d'ACS. Per la stima del fabbisogno di energia elettrica per la climatizzazione estiva, in mancanza di un apposito riferimento normativo, ci siamo invece limitati ad utilizzare l'EER del gruppo frigorifero installato nell'Ospedale Nuovo di Firenze, stimato tramite la norma provvisoria europea prEN 14511, parti 1-5. Per quanto riguarda l'Ospedale di San Miniato, non è presente un impianto di raffrescamento, ad esclusione di split autonomi, posizionati in alcune degenze, in alcuni studi e uffici e nelle palestre per la riabilitazione. Non si è potuto dunque confrontare i consumi rilevati dalla simulazione con i reali consumi elettrici, imputabili solo in minima parte al condizionamento dei locali.

Preliminarmente abbiamo verificato che, a parità di dati d'ingresso, i due software forniscono praticamente gli stessi risultati, con uno scarto del 2%, ottenuto su un semplice edificio di riferimento. Per entrambi gli ospedali inoltre è adeguatamente bassa la deviazione nella richiesta di energia termica tra quanto ottenuto dall'integrazione dei risultati della simulazione nell'arco temporale di un anno e gli effettivi consumi, documentati per l'anno 2007.

La differenza rilevata tra consumi simulati e consumi reali è più che accettabile e comunque giustificabile da tutta una serie d'incertezze presenti, che vanno dall'inesattezza sulla stratigrafia ipotizzata per le pareti, all'imprecisione sui dati inseriti in termini di schemi occupazionali, fino alla differenza dei parametri climatici tra il TMY e l'anno 2007 reale.

I contributi ai bilanci energetici stagionali dei termini di ventilazione per i ricambi d'aria, dispersione dalle pareti, apporti interni di persone, illuminazione e apparecchiature, apporti solari tramite le superfici vetrate e riscaldamento o raffrescamento da parte dei terminali d'impianto sono espressi in Tabella 58, insieme al consumo annuale di ACS. Il rendimento globale medio stagionale dell'impianto di riscaldamento vale 0,66 per l'Ospedale Nuovo e 0,60 per l'Ospedale degli Infermi. L'EER del gruppo frigorifero dell'Ospedale Nuovo per il calcolo estivo è stato stimato in 2,75, mentre per gli split elettrici dell'Ospedale degli Infermi si è ipotizzato un EER di 2,9.

**Tabella 58. Separazione dei contributi al bilancio energetico stagionale per i due ospedali analizzati**

|                           | Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio,<br>Firenze [TEP] | Ospedale degli Infermi, San Miniato<br>[TEP] |
|---------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Ventilazione invernale    | 411                                                  | 9.81                                         |
| Dispersione invernale     | 216                                                  | 30.7                                         |
| Apporti interni invernali | 116                                                  | 8.94                                         |
| Apporti solari invernali  | 41.4                                                 | 5.27                                         |
| Riscaldamento invernale   | 470                                                  | 26.3                                         |
| Ventilazione estiva       | 391                                                  | -7.88                                        |
| Dispersione estiva        | -288                                                 | -25.5                                        |
| Apporti interni estivi    | 355                                                  | 25.2                                         |
| Apporti solari estivi     | 156                                                  | 26.4                                         |
| Riscaldamento estivo      | 71.9                                                 | n.a.                                         |
| Raffrescamento estivo     | 686                                                  | 18.2                                         |
| ACS annuale               | 21.1                                                 | 2.49                                         |

Un altro tipo d'informazione che si può ottenere dalla simulazione dinamica è lo sfasamento temporale della risposta in termini di temperatura dell'aria interna rispetto all'onda termica giornaliera esterna. Questo ritardo è dovuto alle caratteristiche capacitive degli edifici e basate principalmente sulle relative masse frontali.

### *Prodotti della ricerca e sviluppi previsti*

Nonostante la complessità delle strutture ospedaliere e la diversificazione delle destinazioni sanitarie, entrambi i codici di calcolo utilizzati, TRNSYS ed EnergyPlus, si sono rivelati assolutamente adatti a simulare la dinamica degli edifici, in termini di temperatura, umidità e potenze fornite per il riscaldamento e il raffrescamento delle singole zone di controllo, in due tipologie costruttive particolarmente significative per questo settore edilizio. Avendo a disposizione per due ospedali gli storici dei consumi di combustibile e di energia elettrica, si è potuto quindi effettuare una validazione di massima, che ha evidenziato la bontà delle approssimazioni effettuate per costruire i modelli dei due sistemi edificio-impianto, con le relative schede di utilizzo, e per simulare il clima esterno. I tempi di calcolo non si ritengono altresì particolarmente onerosi: circa 20 minuti per la simulazione annuale dell'Ospedale Nuovo con TRNSYS e 4 ore per quella dei due fabbricati dell'Ospedale degli Infermi con EnergyPlus, utilizzando personal computer di prestazioni medie.

Un'analisi parametrica basata su modelli di calcolo validati specificamente sulla realtà ospedaliera consentirà di predisporre linee guida per il risparmio energetico in questo settore e individuare precisi indici di riferimento per la valutazione delle prestazioni energetiche, utilizzabili in leggi, regolamenti, normative, coerentemente con le direttive europee in tema d'usi finali dell'energia.

Dall'analisi sui due edifici benchmark risulta evidente la differenza tra le varie zone funzionali dell'ospedale in termini di consumi specifici (per metro quadrato di superficie in pianta) termici ed elettrici. La chiave per una corretta valutazione della spesa energetica e per la definizione di un parametro di riferimento di prestazione appare dunque la caratterizzazione delle diverse destinazioni d'uso con specifici requisiti all'interno della struttura: ambulatori, degenze, sale operatorie, ambienti per la ristorazione, ecc.

Si sottolinea infine che la disponibilità dimostrata dall'ASL 11 di Empoli non si limita al supporto fornito per l'Ospedale di San Miniato, ma si potrebbe estendere anche all'Ospedale San Giuseppe di Empoli, già oggetto da parte nostra d'indagine preliminare con vari sopralluoghi. Questo grande ospedale è particolarmente ben progettato in termini d'involucro e presenta soluzioni impiantistiche interessanti, specialmente per gli aspetti di regolazione, con unità di controllo ambiente presenti in ogni locale. Da evidenziare è poi il monitoraggio capillare che viene effettuato sulle temperature dei locali e la rilevazione di temperature e portate in tutti i settori dei circuiti idraulici ed aereali.

L'accesso ai dati operativi ci potrà essere fornito in varie finestre temporali, per seguire le fasi di messa a punto e gestione degli impianti. La maggiore risoluzione spaziale e temporale delle variabili termotecniche che avremo a disposizione ci consentirà di ottenere una validazione più robusta dei codici di calcolo. A sua volta, questo aprirà la strada all'effettiva implementazione e verifica di soluzioni di gestione che si sono dimostrate efficaci nell'ambiente simulato.

### *Definizione degli indici e dei livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici e valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati*

Attualmente in Italia non esiste alcun benchmark nazionale dei consumi energetici distinti per categorie di edifici. Per quanto riguarda i modelli di valutazione del sistema elettrico, non esistono studi organici che consentano al legislatore di ottenere tutte le informazioni necessarie per poter indirizzare le politiche di risparmio energetico, promuovere le azioni più efficaci e snellire le procedure o rimuovere gli ostacoli tecnico-amministrativi. Nel corso delle attività si sono riscontrate notevoli difficoltà di reperimento dei dati di consumo per tutti i sotto settori dovuti principalmente alla scarsa disponibilità dei soggetti responsabili contattati e dalla poca propensione a denunciare i dati a disposizione, dove potenzialmente disponibili.

Le attività svolte sono:

1. una indagine sugli edifici "centri commerciali", in base alla quale è stato determinato il numero di edifici "campione" di riferimento, a livello nazionale, sui quali effettuare le valutazioni sui fabbisogni energetici con l'ausilio di codici di simulazione dinamica;
2. la definizione delle tipologie edilizie e delle caratteristiche prestazionali di involucro più ricorrenti in base all'indagine di cui sopra.

Il lavoro svolto ha previsto:

- o la definizione degli edifici e livelli di fabbisogno dei centri di consumo energetico degli edifici adibiti a centro commerciale, svolta seguendo i seguenti step successivi:

- individuazione di edifici campione;
  - definizione delle tipologie edilizie e caratteristiche prestazionali di involucro più ricorrenti;
  - determinazione della densità edilizia;
  - indagine statistica per la determinazione dei consumi in relazione alla tipologia edilizia per fasce climatiche;
  - determinazione degli indicatori di riferimento;
  - valutazione per dati di fabbisogno;
  - simulazioni energetiche in tre località: Milano, Napoli e Palermo.
- o la valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati, con:
    - definizione della metodologia di benchmarking;
    - definizione di edifici esemplificativi;
    - caratterizzazione di soluzioni costruttive e tecnologiche in grado di raggiungere specifici livelli prestazionali;
    - definizione di scale prestazionali per la certificazione energetica delle diverse tipologie edilizie.

Tutto ciò per arrivare alla definizione di un riferimento tecnico-pratico per le amministrazioni, i progettisti, gli investitori ed i singoli utenti. Si propongono:

- indirizzi che possono ridurre il consumo energetico dei centri commerciali, in particolare per la parte elettrica;
- indicazioni su quanto l'elettrico incida sui consumi globali dei centri commerciali;
- segnalazioni delle principali criticità e dei metodi per intervenire.

#### Individuazione di edifici campione

Per una serie centri commerciali sono state reperite alcune informazioni relativamente alle tecnologie costruttive adottate.

La definizione delle tipologie edilizie e le caratteristiche prestazionali di involucro più ricorrenti sono state definite, pertanto, da quelle disponibili integrate con dati di riferimento rilevati. Si è quindi passati ad una fase di elaborazione per cui è stato possibile determinare la frequenza percentuale con cui è stato utilizzato un particolare sistema costruttivo. Sono state considerate i seguenti fattori.

1. Struttura di elevazione
2. Le tipologie più frequenti delle chiusure orizzontali superiori
3. Le tipologie più frequenti delle chiusure verticali opache
4. Le tipologie più frequenti delle chiusure orizzontali inferiori
5. Le tipologie più frequenti delle chiusure verticali trasparenti

A titolo esemplificativo nelle Figure 133 e 134 si riportano i dati relativi alle chiusure verticali trasparenti.

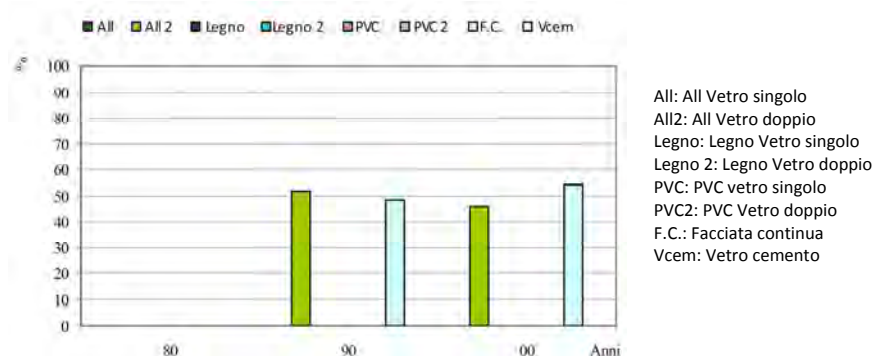


Figura 133. Frequenza percentuale per epoche costruttive delle chiusure verticali trasparenti

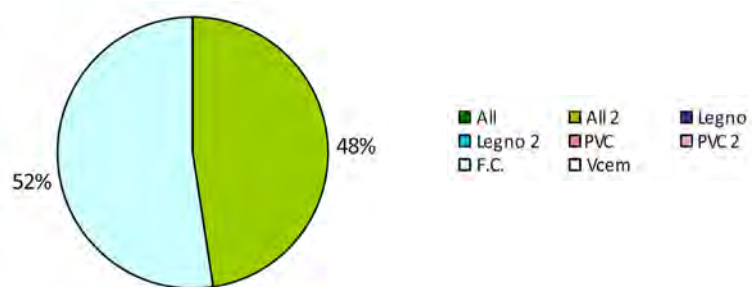


**Figura 134. Frequenza percentuale tra tutti gli edifici analizzati delle chiusure verticali trasparenti**

### *Definizione metodologia di benchmarking*

L'attività di benchmarking permette di confrontare le prestazioni energetiche di un edificio sulla base di una scala di prestazione di riferimento. La possibilità di confrontare indicatori energetici standardizzati (espressi per esempio per metro quadrato di pavimento o per ore di occupazione) permette di comparare edifici diversi secondo la stessa scala di benchmark.

Valutare la qualità energetico - ambientale di una costruzione in base ad una metodologia rigorosa e riconosciuta consente di:

- dimostrare in maniera oggettiva alle autorità pubbliche la superiore qualità ambientale dell'edificio rispetto agli standard di riferimento;
- aumentare il valore di mercato dell'immobile, essendo dimostrabili i minori costi di gestione, la maggiore durata nel tempo, il migliore comfort degli ambienti indoor;
- rendere l'edificio maggiormente appetibile agli operatori immobiliari dato il minor livello di rischio dell'investimento e la sua maggiore "eticità".

L'attività di benchmarking può riguardare tutti gli aspetti legati all'edificio, come l'impatto ambientale, economico e sociale, ma anche gli aspetti energetici. Riguardo a questi ultimi l'International Energy Agency ha evidenziato come ci siano ancora molti aspetti poco chiari e interpretabili in maniera ambigua, che possono portare a valutazioni non confrontabili a livello internazionale e nazionale. In particolare si possono sintetizzare alcune problematiche:

1. non è chiaro il significato di consumo energetico:
  - è necessario specificare se ci si riferisce al fabbisogno di energia netta, legata quindi alle prestazioni di involucro, o al fabbisogno di energia primaria, legata cioè alla tipologia di impianto e di vettore energetico;
  - è necessario trovare un metodo comune per confrontare diversi tipi di vettori energetici.
2. confusione nella classificazione e definizione degli usi energetici:
  - è importante fare delle classificazioni non solo per destinazione d'uso ma anche per caratteristiche costruttive e morfologiche;
  - è necessario chiarire quali usi energetici rientrano nel fabbisogno dell'edificio e quali no;
  - servono indicatori prestazionali a livello nazionale.
3. bisogna uniformare gli indici di prestazione:
  - definire cosa si intende per area di pavimento;
  - definire un indice adeguato in base al tipo di consumo energetico a cui ci si riferisce;
  - definire un indice specifico in base alla destinazione d'uso dell'edificio.

### *Panoramica delle metodologie di benchmarking*

Attualmente esistono numerosi metodi di valutazione del livello di sostenibilità ambientale degli edifici (non solo relativa agli aspetti energetici ma anche a quelli sociali, economici e ambientali) concepiti e organizzati con prospettive differenti. Per mettere ordine tra le attività in atto si propone una classificazione di strumenti e metodologie considerando tre livelli.



- Livello 1: Confronto tra prodotti e risorse d'informazioni (es. l'americano BEES, le "Guide Verdi" per la scelta dei prodotti da costruzione, sviluppate in varie configurazioni da associazioni ed enti pubblici e privati,...). Gli strumenti di questa categoria sono utilizzati nella fase di approvvigionamento e consentono di tenere in considerazione sia gli aspetti ambientali che economici.
- Livello 2: Progetto dell'intero edificio o strumenti di supporto alle decisioni (es. l'olandese EcoQuantum utilizzato per valutare materiali, componenti, edifici, piani urbanistici attraverso check-list ambientali, il britannico Envest per stimare l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita degli edifici, ...). Sono utilizzati come strumenti di confronto fra diverse soluzioni nella fase progettuale e possono determinare dati di input per gli strumenti del successivo livello 3. Hanno obiettivi molto concreti e definiti, quali la determinazione di specifiche conseguenze sull'ambiente, costi implicati e consumi energetici.
- Livello 3: Strutture o sistemi di valutazione dell'intero edificio (es. SBTool, BREEAM, LEED, ...). Questi strumenti tendono a coprire tutti gli aspetti che caratterizzano le varie fasi necessarie alla realizzazione degli edifici (approccio olistico). Essi considerano sia dati oggettivi che soggettivi, e possono portare all'assegnazione di un punteggio o alla certificazione del livello di sostenibilità (o compatibilità) ambientale del progetto

Sono sinteticamente presentati gli strumenti più diffusi a livello internazionale che considerano la valutazione dell'intero ciclo di vita dell'edificio e degli aspetti ambientali, economici e sociali implicati tra cui:

1. Il britannico BREEAM (British Research Establishment Environmental Assessment Method) è stato uno dei primi sistemi di valutazione ed ha costituito la base per lo sviluppo di metodologie analoghe in altri paesi ed è in fase di continuo aggiornamento per adattarsi alle mutate indicazioni delle leggi e norme vigenti. Definisce criteri costruttivi eco-compatibili e sensibili al miglioramento della qualità dell'ambiente indoor per il benessere degli occupanti. L'applicazione del metodo è volontaria e le relative valutazioni sono eseguite da ispettori specificatamente autorizzati dal BRE (British Research Establishment); al termine della procedura viene rilasciato un certificato che attesta le prestazioni dell'edificio e della sua gestione;
2. L'americano LEED Rating System (Leadership in Energy and Environmental Design), sviluppato dall'USGBC (United States Green Building Council), è un sistema di auto-valutazione ideato per classificare edifici nuovi ed esistenti. Stabilisce degli standard relativamente a quello che può essere definito un "edificio verde" e valorizza il tentativo di bilanciare la buona pratica costruttiva attuale e le soluzioni ed i concetti più innovativi. L'autocertificazione prodotta è volontaria.
3. GBC e GBCTool è gestito attualmente dall'International Initiative for Sustainable Built Environment (iISBE) con il Natural Resources Canada e il contributo del US Department of Energy (DoE) e della Novem. Consente di effettuare la valutazione dell'impatto ambientale di una costruzione durante le diverse fasi del ciclo di vita attraverso l'attribuzione di un punteggio di prestazione e la successiva classificazione in una scala di qualità. Il GBTool si è evoluto modificando la struttura e integrando aree tematiche che valutano aspetti sociali ed economici, diventando l'SBTool;
4. Il metodo più recente è infine SBTool (Sustainable Building Tool), strumento informatico di valutazione e certificazione sviluppato insieme ad un nuovo approccio metodologico, SBMethod, all'interno di un processo internazionale di R&D, Green Building Challenge, gestito da iISBE (International Initiative for a Sustainable Built Environment) a cui partecipa anche l'ITC-CNR. Lo strumento consente una classificazione degli edifici valutandone non solo l'impatto ambientale, ma anche la sostenibilità globale, restituendo come output valori assoluti finali confrontabili tra edifici realizzati in differenti contesti geografici. Lo strumento SBTool nasce e si sviluppa a partire dal GBTool, predisposto dal Green Building Challenge, di seguito GBC.

### **SBTool (Sustainable Building Tool)**

Sistema di valutazione sviluppato all'interno del processo internazionale GBC (Green Building Challenge) il quale si pone come obiettivo quello di definire una base di riferimento per un sistema di certificazione volontario e contestualizzabile nelle diverse realtà nazionali in base al contesto climatico, ambientale, economico, culturale e tecnologico. SBTool, precedentemente GBTool (Green Building Tool), valuta non solo l'impatto ambientale, ma anche la sostenibilità globale degli edifici e restituisce come output valori assoluti finali rendendo possibile il confronto tra edifici realizzati in differenti contesti geografici. La certificazione avviene in base a 7 aree di valutazione: impatto sul sito, consumo di risorse, carichi ambientali, qualità dell'ambiente indoor, gestione degli impianti tecnici, performance nel lungo termine, aspetti socio-economici.

Lo strumento di Sbttool è suddiviso in tre parti:

1. SBT07-A viene utilizzato dagli enti regionali per stabilire gli obiettivi, i pesi ed i benchmark validi per quello specifico territorio.
2. SBT07-B permette ai progettisti di raccogliere informazioni sulle caratteristiche del contesto e del progetto.
3. SBT07-C serve ad effettuare le valutazioni basate sui dati inseriti nei file A e B.

Il principale vantaggio è che SBtool, sviluppato con un linguaggio che rispecchia le problematiche e le caratteristiche del luogo dove viene applicato, risulta essere più efficace e sensibile ai problemi delle realtà locali rispetto ad altri sistemi. Il sistema è capace di effettuare valutazioni per le quattro fasi del ciclo vita dell'edificio utilizzando benchmark specifici per ogni fase.

In base alle caratteristiche del contesto vengono aggiornati i pesi così come vengono fornite informazioni sul contesto, utili agli utenti dello strumento. Il sistema può essere applicato a progetti molto grandi o a singoli edifici, residenziali o commerciali, di nuova costruzione, ristrutturazioni o entrambi contemporaneamente.

SBtool può fornire valori approssimati sull'energia inglobata dei materiali da costruzione. I progettisti possono specificare limiti di prestazione e possono effettuare un'autovalutazione. I certificatori possono accettare le autovalutazioni sulle prestazioni dei progettisti o possono modificarle.

In Tabella 59 viene riportata la tabella con individuate le aree di valutazione le categorie di edificio ed i pesi di valutazione.

**Tabella 59. Aree di valutazione, categorie di edifici e pesi - SBTool**

| Area di valutazione          | Categoria di requisito                                   | Peso       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| Consumo di risorse (R)       | R1 Consumo netto di energia primaria nel ciclo di vita   | 20         |
|                              | R2 Uso del territorio a cambiamenti qualitativi          |            |
|                              | R3 Consumo netto di acqua potabile                       |            |
|                              | R4 Riutilizzo di strutture/materiali presenti in sito    |            |
|                              | R5 Quantità e qualità dei materiali non presenti in sito |            |
| Carichi ambientali (L)       | L1 Emissioni di gas serra                                | 25         |
|                              | L2 Emissioni di sostanze dannose per l'ozono             |            |
|                              | L3 Emissioni di gas acidificanti                         |            |
|                              | L4 Emissioni di foto-ossidanti                           |            |
|                              | L5 Emissioni eutrofizzazione (non valutato)              |            |
|                              | L6 Rifiuti solidi                                        |            |
|                              | L7 Rifiuti Liquidi                                       |            |
|                              | L8 Rifiuti pericolosi da ristrutturazione/demolizione    |            |
|                              | L9 Impatti ambientali e sulle proprietà adiacenti        |            |
| Qualità ambiente interno (Q) | Q1 Qualità dell'aria e ventilazione                      | 20         |
|                              | Q2 Comfort termico                                       |            |
|                              | Q3 Luce naturale ed illuminazione                        |            |
|                              | Q4 Rumori ed acustica                                    |            |
|                              | Q5 Inquinamento elettromagnetico                         |            |
| Qualità del servizio (S)     | S1 Flessibilità e adattabilità                           |            |
|                              | S2 Controllabilità dei sistemi                           |            |
|                              | S3 Prestazioni nel tempo                                 |            |
|                              | S4 Privacy, luce del sole e viste                        |            |
|                              | S5 Qualità delle attrezzature e sviluppo del sito        |            |
|                              | S6 Impatto sulle proprietà adiacenti                     |            |
| Aspetti economici (E)        | E1 Prestazioni economiche                                | 10         |
| Gestione e manutenzione (M)  | M1 Pianificazione del processo di costruzione            | 10         |
|                              | M2 Messa a punto delle prestazioni                       |            |
|                              | M3 Pianificazione della gestione dell'edificio           |            |
| Trasporti (T)                | T1 Emissioni di gas serra                                | 0          |
|                              | T2 Emissioni di gas acidificanti                         |            |
|                              | T3 Emissioni foto-ossidanti                              |            |
| <b>Totale</b>                |                                                          | <b>100</b> |

Alcuni degli aspetti analizzati non fanno strettamente riferimento a caratteristiche dell'organismo edilizio, come ad esempio l'inquinamento causato dai mezzi di trasporto, la presenza di attrezzature e servizi, il rapporto con le proprietà adiacenti, che potrebbero essere considerati elementi di valutazione del contesto. Tuttavia l'ottica di indagine è quella di considerare gli impatti globali sull'ambiente e la qualità complessiva offerta agli abitanti,

ovvero in che modo la presenza dell'edificio incide sul flusso veicolare pubblico e privato; quali servizi, spazi e attrezzature sono disponibili per gli utenti; quali conseguenze determina sugli edifici circostanti la realizzazione del nuovo edificio, e così via.

Il sistema gestisce sia dati numerici provenienti da programmi di calcolo esterni, sia valutazioni qualitative. I punteggi ottenuti rispetto a ogni criterio o sottocriterio vengono pesati e aggregati per determinare quelli delle categorie, a loro volta combinati per determinare quelli delle aree e di performance.

#### *Impostazione metodologica per la definizione di una scala prestazionale per la valutazione delle prestazioni energetiche di centri commerciali esistenti*

La definizione dei benchmark di consumo energetico può avvenire in due modi:

- attraverso la simulazione dinamica di un edificio tipo rappresentativo della configurazione standard e di un edificio rappresentativo del livello "miglior pratica costruttiva" o del livello "eccellenza";
- attraverso un'indagine statistica di numerosi edifici campione distribuiti sul territorio nazionale.

#### *Definizione della scala di benchmarking attraverso simulazioni dinamiche*

L'approccio metodologico segue quanto specificato nella metodologia SBTool: le scale prestazionali di confronto vengono definite sulla base dei consumi storici di centri commerciali esistenti INRES-COOP e dei risultati di simulazioni dinamiche.

L'attività di benchmarking prevede la definizione del "livello zero" ("standard practice") e del "livello tre" ("best practice") sulla base della normativa vigente nella zona in cui il progetto (nuovo o di recupero) verrà realizzato o sulla base di simulazioni dinamiche eseguite su edifici rappresentativi.

Il livello "standard practice" è stato definito attraverso simulazioni dinamiche svolte in seguito alla raccolta di dati tecnici sulle modalità costruttive e sulle tipologie impiantistiche maggiormente diffuse nella pratica edilizia. In seguito ad una analisi delle principali criticità e all'individuazione di interventi migliorativi, è stato ricreato un edificio rappresentativo della "best practice" e attraverso le simulazioni dinamiche è stato definito il corrispondente livello di benchmark.

Nello specifico si possono individuare le seguenti fasi:

- valutazione del comportamento energetico del modello di base, o "standard practice", definito adottando soluzioni architettoniche, tecnologiche, impiantistiche e di controllo standard; questo livello rappresenta il confronto a cui rapportarsi;
- elaborazione dei dati e valutazione dei risultati finalizzata ad individuare quali siano le principali fonti di consumo dell'edificio;
- definizione di ipotesi migliorative, e valutazione delle prestazioni degli organismi "migliorati" dal punto di vista energetico, rispetto all'edificio scelto come *Benchmark*.

Le ipotesi migliorative possono essere di differente natura, come:

- scelta di elementi di impianto (*equipment*) alternativi;
- set point di funzionamento diversificati, con sistemi di start/stop di ottimizzazione per i tempi di accensione/spegnimento;
- utilizzo di sistemi di recupero del calore, *free-cooling*, ecc.;
- ricorso alle fonti energetiche rinnovabili o a sistemi di involucro passivi riconducibili per semplicità allo schema del muro di Trombe ecc.;
- aggiunta di sistemi schermanti fissi o mobili che ottimizzano l'intervallo di insolazione.
- sistema automatizzato di controllo delle aperture + recuperatori di calore a flusso incrociato dell'aria in uscita in corrispondenza dei mixer aria interna esausta in uscita/aria esterna in entrata;
- utilizzo di un impianto fotovoltaico da 10 kW ;
- sostituzione delle vetrate di ordinaria pratica costruttiva con vetrocamera a film basso-emissivo;
- variazione dello spessore dell'isolante d'involucro;
- incremento del valore del COP dei *chiller*;

- sovradimensionamento degli impianti di produzione dell'acqua fredda e calda per il riscaldamento/raffrescamento.
- dimerizzazione delle luci presso l'area vendita;
- sistemi di recupero del calore per il riscaldamento dell'acqua sanitaria dalle centrali di produzione del freddo per le celle frigo BT e TN;
- integrazione di un sistema di controllo start/stop di alcune componenti d'impianto.

Nell'ambito della presente attività di ricerca, sono state escluse le schede non strettamente legate ai consumi impiantistici dell'edificio e sono state analizzate le schede relative alla valutazione delle prestazioni energetiche dei centri commerciali. Partendo dal sistema di valutazione complessivo sono state estrapolate le schede relative alla categoria "Energia e consumo di risorse":

- B.1.2a: fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale;
- B.1.2b: fabbisogno di energia primari per la climatizzazione estiva;
- B.2.1: energia elettrica, richiesta di picco nella fase operativa;
- B.3.1: energia rinnovabile prodotta fuori dal sito;
- B.3.2: energia rinnovabile prodotta in sito.

| CRITERIO B.1.2a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | AS BUILT                                                       | N/A   | Sistema di valutazione |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------|-------|------------------------|
| Previsione del fabbisogno di energia primaria utilizzata in fase operativa per la climatizzazione invernale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                                                                |       |                        |
| AREA VALUTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | CATEGORIA                                                      |       |                        |
| B. Energia e Consumo di Risorse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | B1. Energia non rinnovabile richiesta durante il ciclo di vita |       |                        |
| ESIGENZA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | PESO DEL CRITERIO                                              |       |                        |
| Ridurre il consumo annuo di energia primaria                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | 0,00%                                                          |       |                        |
| INDICATORE DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | UNITÀ DI MISURA                                                |       |                        |
| Rapporto percentuale tra il valore di Energia Primaria per la climatizzazione invernale (EPi) calcolato per l'edificio e il valore limite previsto dalla legislazione vigente (Dlgs 311/06)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | %                                                              |       |                        |
| SCALA DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                                                |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | %                                                              | PUNTI |                        |
| NEGATIVO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | >100                                                           | -1    |                        |
| SUFFICIENTE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 100                                                            | 0     |                        |
| BUONO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | 55                                                             | 3     |                        |
| OTTIMO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | 25                                                             | 5     |                        |
| METODO E STRUMENTI DI VERIFICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                                                                |       |                        |
| Il Calcolo dell'indicatore viene effettuato mediante simulazione con specifico software                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                                                                |       |                        |
| RIFERIMENTI LEGISLATIVI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                                                                |       |                        |
| L. 10/91 "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo di fonti rinnovabili di energia"<br>DPR del 26 Agosto 1993 n°412 "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"<br>Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 su rendimento energetico nell' edilizia Dgs 192/05 - Decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante: "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia Dlgs 311/06 - Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311, recante: 'Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2002 n. 192: recarne attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. |  |                                                                |       |                        |
| RIFERIMENTI NORMATIVI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                |       |                        |
| Quadro normativo CEN in corso di definizione su mandato della Commissione Europea (M 343) a supporto dell'implementazione della direttiva 2002/91/CE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                                                                |       |                        |
| <b>Benchmarking:</b> la scala prestazionale è stata definita calcolando i livelli 0 e 3 e ricavando gli altri per interpolazione lineare. Il benchmark 0 corrisponde ad un EPi pari al valore limite vigente imposto dal Dlgs 311/06, il livello 3 corrisponde ad un EPi pari al valore limite imposto per il 2010.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |                                                                |       |                        |

| CRITERIO B.1.2b                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | AS BUILT                                                       | N/A   | Sistema di valutazione |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------|-------|------------------------|
| Previsione del fabbisogno di energia primaria utilizzata in fase operativa per il raffrescamento                                                                                                                                                                                                            |  |                                                                |       |                        |
| AREA VALUTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | CATEGORIA                                                      |       |                        |
| B. Energia e Consumo di Risorse                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | B1. Energia non rinnovabile richiesta durante il ciclo di vita |       |                        |
| ESIGENZA                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  | PESO DEL CRITERIO                                              |       |                        |
| Ridurre il consumo annuo di energia primaria                                                                                                                                                                                                                                                                |  | 0,00%                                                          |       |                        |
| INDICATORE DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | UNITÀ DI MISURA                                                |       |                        |
| Energia primaria per il raffrescamento (EPr)                                                                                                                                                                                                                                                                |  | kWh/m <sup>3</sup> anno                                        |       |                        |
| SCALA DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                                |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  | %                                                              | PUNTI |                        |
| NEGATIVO                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  | >27,56                                                         | -1    |                        |
| SUFFICIENTE                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | 27,56                                                          | 0     |                        |
| BUONO                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | 12,44                                                          | 3     |                        |
| OTTIMO                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | 2,37                                                           | 5     |                        |
| METODO E STRUMENTI DI VERIFICA                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |                                                                |       |                        |
| Il Calcolo dell'indicatore viene effettuato mediante simulazione con specifico software                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                |       |                        |
| RIFERIMENTI LEGISLATIVI                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                |       |                        |
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |                                                                |       |                        |
| RIFERIMENTI NORMATIVI                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                                                                |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                                                                |       |                        |
| <b>Benchmarking:</b> la scala prestazionale è stata definita calcolando i livelli 0 e 3 e ricavando gli altri per interpolazione lineare. Il livelli 0 e 3 sono stati calcolati in seguito all'analisi delle prestazioni energetiche relative alla climatizzazione estiva di opportuni edifici caso studio. |  |                                                                |       |                        |

| CRITERIO B.2.1                                                                                                                                                                                                                                               |  | AS BUILT                                                            | N/A   | Sistema di valutazione |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|
| Energia elettrica: richiesta di picco durante la fase operativa                                                                                                                                                                                              |  |                                                                     |       |                        |
| AREA VALUTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                             |  | CATEGORIA                                                           |       |                        |
| B. Energia e Consumo di Risorse                                                                                                                                                                                                                              |  | B1. Energia elettrica: richiesta di picco durante la fase operativa |       |                        |
| ESIGENZA                                                                                                                                                                                                                                                     |  | PESO DEL CRITERIO                                                   |       |                        |
| Ridurre la richiesta di picco di energia elettrica                                                                                                                                                                                                           |  | 0,00%                                                               |       |                        |
| INDICATORE DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                    |  | UNITÀ DI MISURA                                                     |       |                        |
| Valore massimo della media mensile dei picchi giornalieri di domanda elettrica                                                                                                                                                                               |  | W/m <sup>2</sup>                                                    |       |                        |
| SCALA DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                         |  |                                                                     |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                              |  | %                                                                   | PUNTI |                        |
| NEGATIVO                                                                                                                                                                                                                                                     |  | >161,6                                                              | -1    |                        |
| SUFFICIENTE                                                                                                                                                                                                                                                  |  | 161,6                                                               | 0     |                        |
| BUONO                                                                                                                                                                                                                                                        |  | 135,6                                                               | 3     |                        |
| OTTIMO                                                                                                                                                                                                                                                       |  | 118,3                                                               | 5     |                        |
| METODO E STRUMENTI DI VERIFICA                                                                                                                                                                                                                               |  |                                                                     |       |                        |
| Il Calcolo dell'indicatore viene effettuato mediante simulazione con specifico software                                                                                                                                                                      |  |                                                                     |       |                        |
| RIFERIMENTI LEGISLATIVI                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                                                     |       |                        |
| -                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                                                                     |       |                        |
| RIFERIMENTI NORMATIVI                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                                     |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                              |  |                                                                     |       |                        |
| <b>Benchmarking:</b> la scala prestazionale è stata definita calcolando i livelli 0 e 3 e ricavando gli altri per interpolazione lineare. Il livelli 0 e 3 sono stati calcolati in seguito all'analisi del picco elettrico di opportuni edifici caso studio. |  |                                                                     |       |                        |

| CRITERIO B.3.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  | AS BUILT                | N/A   | Sistema di valutazione |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------|-------|------------------------|
| Energia rinnovabile prodotta fuori dal sito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                         |       |                        |
| AREA VALUTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  | CATEGORIA               |       |                        |
| B. Energia e Consumo di Risorse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | B3. Energia rinnovabile |       |                        |
| ESIGENZA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | PESO DEL CRITERIO       |       |                        |
| Incoraggiare l'uso di energia da fonti rinnovabili                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 0,00%                   |       |                        |
| INDICATORE DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  | UNITÀ DI MISURA         |       |                        |
| Percentuale di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili e prodotta fuori dal sito calcolata rispetto al fabbisogno elettrico totale annuo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  | %                       |       |                        |
| SCALA DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                         |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  | %                       | PUNTI |                        |
| NEGATIVO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | < 16                    | -1    |                        |
| SUFFICIENTE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | 16                      | 0     |                        |
| BUONO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | 25                      | 3     |                        |
| OTTIMO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  | 31                      | 5     |                        |
| METODO E STRUMENTI DI VERIFICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                         |       |                        |
| <p>Il calcolo dell'indicatore avviene mediante la seguente procedura:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- quantifica del contributo di energia elettrica da fonte rinnovabile prodotta fuori dal sito</li><li>- calcolo della percentuale di energia elettrica da fonte rinnovabile prodotta fuori dal sito sul totale dei consumi elettrici stimati</li></ul> <p>Inserire il valore calcolato all'interno della cella corrispondente al "VALORE INDICATORE DI PRESTAZIONE" della presente scheda</p> |  |                         |       |                        |
| RIFERIMENTI LEGISLATIVI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |                         |       |                        |
| DIRECTIVE 2001/77/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                         |       |                        |
| RIFERIMENTI NORMATIVI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                         |       |                        |
| <p><b>Benchmarking:</b> Livello 0: valore corrispondente alla percentuale di energia elettrica rinnovabile già presente nel mix elettrico nazionale; Livello 3: valore in accordo alle indicazioni della Direttiva 2001/77/CE</p>                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                         |       |                        |

| CRITERIO B.3.2                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | AS BUILT                | N/A   | Sistema di valutazione |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------|-------|------------------------|
| Energia rinnovabile prodotta in situ                                                                                                                                                                                                                                             |  |                         |       |                        |
| AREA VALUTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | CATEGORIA               |       |                        |
| B. Energia e Consumo di Risorse                                                                                                                                                                                                                                                  |  | B3. Energia rinnovabile |       |                        |
| ESIGENZA                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | PESO DEL CRITERIO       |       |                        |
| Favorire la produzione di energia da fonti rinnovabili in situ                                                                                                                                                                                                                   |  | 0,00%                   |       |                        |
| INDICATORE DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                        |  | UNITÀ DI MISURA         |       |                        |
| Percentuale di energia proveniente da fonti rinnovabili prodotta in sito calcolata rispetto al fabbisogno annuo totale                                                                                                                                                           |  |                         |       |                        |
| SCALA DI PRESTAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                         |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | %                       | PUNTI |                        |
| NEGATIVO                                                                                                                                                                                                                                                                         |  | -                       | -1    |                        |
| SUFFICIENTE                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | 0                       | 0     |                        |
| BUONO                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 60                      | 3     |                        |
| OTTIMO                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | 100                     | 5     |                        |
| METODO E STRUMENTI DI VERIFICA                                                                                                                                                                                                                                                   |  |                         |       |                        |
| Il calcolo dell'indicatore avviene con la seguente procedura:<br>- quantificazione del contributo di energia rinnovabile prodotta in sito<br>- quantificazione della percentuale di energia rinnovabile prodotta in sito calcolata sul fabbisogno energetico annuo               |  |                         |       |                        |
| RIFERIMENTI LEGISLATIVI                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                         |       |                        |
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                         |       |                        |
| RIFERIMENTI NORMATIVI                                                                                                                                                                                                                                                            |  |                         |       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                         |       |                        |
| <b>Benchmarking:</b> Livello 0: Il livello zero corrisponde alla situazione in cui non vi sia, in sito, produzione di energia da fonti rinnovabili. Livello 5: Il livello cinque corrisponde alla situazione in cui tutta l'energia prodotta in sito deriva da fonti rinnovabili |  |                         |       |                        |

### Benchmarking semplificato

L'analisi e la catalogazione di dati relativi ai consumi ed alle caratteristiche tecniche ed architettoniche di numerosi edifici distribuiti sul territorio nazionale può permettere di definire una scala di benchmark relativa ai consumi energetici dei centri commerciali. Un esempio è la metodologia di benchmarking in corso di aggiornamento all'interno del progetto europeo "EL-TERTIARY", sviluppato grazie alla collaborazione di partner europei con l'obiettivo di ridurre i consumi elettrici nel settore terziario. L'attività ha portato alla creazione di un database in continuo aggiornamento in cui ogni stato membro si impegna alla catalogazione di edifici suddivisi per superficie netta di pavimento ( $m^2$ ), consumo energetico complessivo e parziale, suddiviso per sistemi di raffrescamento, ventilazione, illuminazione, apparecchiature ecc.

La scala di valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici è stata creata sulla base dei risultati ottenuti dall'auditing che hanno svolto. Sono stati definiti 3 livelli.:

- livello ottimo: primo quartile
- livello "standard": secondo quartile
- livello basso: terzo quartile.

I quartili ripartiscono una serie di dati in quattro parti di pari frequenze.

### Considerazioni finali

L'attività di ricerca condotta ha consentito di presentare le principali metodologie di benchmarking diffuse attualmente e di evidenziare alcuni fattori chiave su cui intervenire per progettare e realizzare centri commerciali caratterizzati da un elevato livello di compatibilità ambientale. Particolare attenzione è stata posta al processo metodologico per il calcolo degli indicatori prestazionali relativi al fabbisogno energetico. Da un lato, la maggiore consapevolezza della metodologia di calcolo permette di capire quali sono i parametri che maggiormente



influenzano le prestazioni energetiche di un edificio, dall'altro, il controllo continuo del livello di prestazione dell'edificio aiuta a comprendere i margini di miglioramento di determinati comportamenti o di specifici interventi localizzati, favorendo una progressiva riduzione dei consumi energetici. La classificazione di un edificio secondo una scala di benchmarking è uno stimolo a diffondere e promuovere le migliori pratiche costruttive disponibili sul mercato: è una attività quindi che necessita di continui aggiornamenti. E' stata pertanto proposta una metodologia i cui margini di sviluppo vengono definiti in base ai casi studio che potranno essere catalogati e classificati, alla qualità di edifici che sarà possibile analizzare con l'ausilio di programmi di simulazione dinamica e ai confini geografici specifici.

#### **D. Creazione di un database di sistemi e tecnologie di generazione distribuita**

L'attività ha riguardato la realizzazione un database dei principali sistemi di microcogenerazione, con l'indicazione dei componenti del sistema di conversione energetica, evidenziando i principali indici di prestazione energetica.

Sono stati individuati i dispositivi già in commercio o in fase di ricerca e sviluppo, dai dati disponibili nella letteratura tecnica e scientifica e dalle informazioni reperibili dai costruttori. In particolare, sono state classificate le principali tecnologie dei sistemi di microcogenerazione, con riferimento alle diverse tecnologie utilizzate per il motore primo (motori alternativi a combustione interna, celle a combustibile, motori Stirling, turbine a gas, ecc.).

E' stato prodotto il manuale di istruzioni per l'utilizzo del database ed il relativo software di consultazione corredato da numerose schede tecniche identificative della tipologia di macchina e delle sue caratteristiche tecnico prestazionali .

### **PRINCIPALI SOGGETTI COINVOLTI**

#### **Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia**

Le attività sviluppate dal Politecnico di Milano sono state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento per gli edifici a destinazione d'uso uffici, mediante codici di calcolo dinamici.

Per la determinazione di edifici campione è stata condotta una ricerca sullo stock degli edifici il cui comportamento prestazionale è stato valutato in tre zone climatiche C, D, ed E.

#### **Università di Pisa - Dipartimento di Energetica "L. Poggi"**

L'attività concerne di nuovo la definizione dei fabbisogni energetici nel settore edilizio, in questo caso riferito alla tipologia ospedaliera.

Sono state individuate due tipologie edilizie ospedaliere significative per il territorio italiano: un grande ospedale, relativamente moderno, che serve una città o un distretto sanitario e uno di dimensione più ridotta e più vecchio, collocato in una cittadina e su questi sono state effettuate le simulazioni con codici dinamici.

#### **Università Roma TRE- Facoltà di Architettura**

Le attività sviluppate dall'Università di Roma TRE state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici termici ed elettrici nel settore delle scuole dell'obbligo facendo riferimento ai consumi ricavati da "bolletta".

#### **Università La Sapienza di Roma Dipartimento Ingegneria Elettrica**

Le attività sviluppate dall'Università di Roma La Sapienza di Roma state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici termici ed elettrici nel settore degli uffici facendo riferimento a edifici campione su cui sono state condotte indagini mirate alla definizione dei consumi energetici.

#### **Università di Napoli- RIAS**

Le attività sviluppate dall'Università di Napoli state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici termici ed elettrici nel settore del residenziale con particolare approfondimenti su quelli relativi agli elettrodomestici ed agli usi obbligati.

### Università del Sannio

L'attività dell'Università del Sannio ha avuto come oggetto la creazione di un database di sistemi di microgenerazione. per i quali sono stati indicati i principali parametri di prestazione energetica, che fanno riferimento al comportamento in condizioni reali di funzionamento

Sono state avviate inoltre attivate collaborazioni con alcuni operatori per la compiuta esecuzione delle attività. In particolare:

- Il **FIRE** ha svolto l'attività riguardante l'analisi della normativa vigente in ambito nazionale ed europeo
- Il **Comitato Termotecnico Italiano** ha condotto l'attività riguardante l'analisi dei consumi energetici su edifici a destinazione d'uso alberghiero
- L'**Istituto per le Tecnologie della Costruzione ITC del CNR** si è occupato dell'attività riguardante la definizione degli indici e dei livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico dei centri commerciali e il benchmark dei consumi nell'edilizia esistente mediante codici semplificati.



## **Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e di pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana**

Sul fronte della offerta tecnologica su cui avviare i programmi di intervento c'è ancora molta incertezza dovuta al fatto che benché siano relativamente chiari i costi degli interventi di "efficientamento" di edifici, reti energetiche, cicli produttivi, non sono altrettanto chiari e quantificabili i benefici ottenibili con le tecnologie attualmente disponibili. Questa problematica incide sia sulla scelta degli interventi delle ESCo, che sulle limitazioni che gli istituti di credito impongono al finanziamento di tali opere. La mancanza di strumenti accurati di predizione e qualificazione delle tecnologie fa sì che le scelte di intervento siano molto conservative focalizzandosi su interventi a ritorno economico molto breve e tecnologie già ampiamente consolidate riducendo così il margine di potenziale guadagno sulla efficienza energetica e l'impatto socio-economico sul territorio.

In particolare gli interventi si orientano sulla sostituzione di singole componenti tecnologiche dove è facile una valutazione del risultato economico ma non sugli interventi di "sistema" dove il volume di efficientamento sarebbe molto più elevato. Questo aspetto è dovuto in particolare alla mancanza di diffusione di tecnologie di sistema affidabili e sicure. In particolare mancano:

- a) strumenti di progettazione ottimale assistita al computer con modellistica di simulazione dinamica ed ottimizzazione degli interventi complessivi che possano dare risposte accurate sui risparmi energetici ottenibili e sui tempi di ritorno degli investimenti;
- b) sistemi evoluti per la gestione ottimale di reti energetiche locali di una certa complessità che possano permettere l'ottimizzazione in linea della gestione al variare delle condizioni climatiche, tariffarie, legislative e prestazionali e quindi superare i limiti attuali dove la gestione è generalmente affidata all'operatore o a sistemi di controllo di basso livello che non permettono lo sfruttamento pieno dei potenziali di efficientamento. L'attività mira allo sviluppo di un sistema di combustione ad elevata efficienza di conversione energetica, a basse emissioni di macro e micro inquinanti e di CO<sub>2</sub>, 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.

### **DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ**

Obiettivo di questo progetto è l'analisi di strumenti di promozione e diffusione di tecnologie efficienti per la riduzione dei consumi elettrici. Tale azione si articola attraverso tre linee di attività: la prima intende fornire al legislatore elementi di valutazione oggettivi in sede di definizione 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); la seconda mira alla realizzazione di una rete laboratori di riferimento per l'autenticazione di procedimenti di ecodesign ed etichettatura energetica; la terza, caratterizzata da un aspetto più applicativo, è orientata alla definizione di realizzazioni dimostrative, su due specifiche tipologie di distretto energetico altamente replicabile a livello nazionale e allo studio di strumenti che incentivano una loro ampia presenza nel mercato delle tecnologie.

L'obiettivo, dunque, consiste nella creazione di una pratica esemplare in cui le tecnologie innovative e le forme finanziarie trovino applicazione attraverso azioni in partnership con le aziende dal lato dell'offerta (aziende produttori di componenti e tecnologie) e con gli utenti delle applicazioni stesse (enti pubblici, aziende, cittadini), anche attraverso la costituzione di modelli di partenariato pubblico-privato, come le ESCo.

In questo contesto è fortemente sentita l'esigenza di creare buone pratiche in modo da qualificare direttamente sul mercato soluzioni ed architetture energetiche promettenti, per esempio attraverso un modello di partenariato pubblico-privato che possa mettere in campo tecnologie più innovative, dove il rischio potrebbe essere più elevato, ma con margini di "efficientamento" più elevati e maggiore impatto sociale. A questo vanno associate azioni di analisi e valutazioni per l'abbattimento degli ostacoli e delle barriere quali l'informazione, la formazione e l'accesso ai finanziamenti.

Il progetto si propone di stimolare attraverso azioni dimostrative ed esemplari, una prassi finanziaria, imprenditoriale, tecnologica e metodologica attraverso cui innescare meccanismi virtuosi di coinvolgimento del

capitale privato in azioni il cui scopo è la diffusione delle tecnologie per la efficienza energetica. La strategia di attuazione consiste nel coinvolgere gruppi di ricerca che rappresentino punte di eccellenza nel settore energetico, aziende produttrici di elevata qualità già operanti sul mercato energetico e società esperte in studi finanziari per creare strumenti dedicati ad affrontare un mercato specifico, che richiede soluzioni di grado di innovazione (e quindi di rischio) superiore al normale ambito progettuale di una ESCo convenzionale. A tali soluzioni, individuate come best practices, verrà data massima diffusione attraverso l'organizzazione di seminari e workshop, ed attraverso la redazione di materiale informativo. Gli strumenti ed obiettivi attraverso cui svolgere tale azione sono:

- la costituzione di una “ESCo sperimentale” pubblico-privato che si caratterizzi per la sua capacità di eccellenza innovativa nelle architetture delle reti energetiche e dalla propensione ad accettare sfide a più alto rischio economico finalizzate a più elevate prestazioni di efficienza e di sostenibilità ambientale. La ESCo avrebbe una natura dimostrativa ed esemplare e pertanto con alta propensione alla diffusione dei risultati ottenuti verso le altre aziende e verso la Pubblica Amministrazione, in modo da innescare meccanismi virtuosi di coinvolgimento del capitale privato ed elevate ricadute sul cittadino.
- la definizione di strumenti di pianificazione e progettazione al fine di promuovere l'efficienza energetica nel contesto italiano con particolare riguardo alla generazione distribuita.

La Commissione Europea, in accordo i principi enunciati nella Direttiva 2006/32/CE, si adopera per produrre nuovi strumenti di finanziamento per ottemperare ad uno dei problemi principali: il reperimento del capitale da investire attraverso l'erogazione di aiuti all'investimento ed la creazione di condizioni favorevoli per i prestatori di capitale. Perché anche il sistema bancario diventi strumento per l'efficienza energetica, la Commissione considera le modalità che consentono alle istituzioni finanziarie di concedere prestiti ed emana le norme che permettono di godere di forme di incentivazione e di aiuti in modo che queste stesse possano essere la garanzia per il prestito. La Banca Centrale Europea stringe accordi con le istituzioni finanziarie per la concessione di “Prestiti Globali” che vengono successivamente ripartiti su vari progetti. Alle Pubbliche Amministrazioni si richiede di adottare strumenti finanziari per interventi in campo energetico e ambientali come i Fondi di garanzia, fondi di rotazione, project financing.

Il D. Lgs. 115/2008, in attuazione della direttiva 2006/32/CE e in accordo con le indicazioni contenute nel Piano d'Azione Italiano dell'efficienza Energetica, “al fine di promuovere la realizzazione di servizi energetici e di misure di incremento dell'efficienza energetica” destina una quota di 25 milioni di euro per gli interventi realizzati tramite lo strumento del finanziamento tramite terzi in cui il terzo risulta essere una ESCo, “allo scopo di promuovere un processo di incremento del livello di qualità e competenza tecnica per i fornitori di servizi energetici, approva una procedura di certificazione volontaria per le ESCo”, evidenziandone ancora una volta il ruolo strategico per l'incremento degli interventi di miglioramento energetico.

Per ottemperare a tutto questo, bisogna investire nell'evoluzione della tecnologia energetica che, oltre a rappresentare un'opportunità per lo sviluppo tecnologico, permette il controllo delle emissioni inquinanti. L'investimento in ricerca e sviluppo, è un forte elemento di criticità per l'Italia: il tessuto industriale è caratterizzato da aziende di piccola dimensione, a basso impatto energetico e intensità di spesa in ricerca e sviluppo che si attesta a poco più di metà della media europea. La necessità all'invenzione deriva dall'aver obiettivi ambiziosi come la sostenibilità e l'Italia, caratterizzata da un sistema innovativo arretrato, ha bisogno di una classe politica capace di attuare interventi efficaci. Con una ricerca campionaria, è stato descritto l'atteggiamento degli italiani verso l'innovazione e la cultura del cambiamento: solo il 23% si è schierato completamente a favore, la maggior parte si è dichiarata favorevole al cambiamento ma non ad accollarsi il rischio necessario per ottenerlo, il resto (il 28% degli intervistati) è contrario<sup>4</sup>. Lo Stato deve stimolare, e ha già iniziato questo processo, la sensibilità della popolazione verso la sostenibilità attraverso formazione e informazione e con azioni materiali: incentivi, come ad esempio sgravi fiscali, o un sistema normativo a favore degli innovatori.

La sfida più importante risiede nel superamento del vincolo di bilancio, ossia la promozione di pratiche per facilitare il finanziamento di investimenti per l'efficienza energetica. La rigidità del sistema bancario è stata, fino ad oggi, un fattore limitante perché la possibilità di accesso al credito è strettamente correlata alle garanzie che si possono dare ma, grazie alle politiche incentivanti a seguito delle direttive europee, anche il sistema bancario sta dando segnali di rinnovamento e di interesse.

---

<sup>4</sup> Ricerca effettuata da Astra nel novembre 2006 su un campione di 2200 persone con più di 15 anni rappresentativo della popolazione italiana per “il sole 24 ore”.

La legislazione in materia di efficienza energetica fa seguito alle direttive comunitarie. A livello nazionale un ruolo chiave è giocato dalle regioni che promulgano leggi regionali per definire gli obiettivi e indicazioni concrete per raggiungerli. Lo Stato offre un servizio di assistenza tecnico-scientifica sia alle regioni, in fase di stesura del Piano Energetico Regionale, sia agli enti locali, che partecipano ai Piani Programma.

La stessa Pubblica Amministrazione deve fare uno sforzo per convertire se stessa all'efficienza energetica, in particolare lo stato promuove l'introduzione di tecnologia e criteri di gestione sostenibili.

L'intento è, dunque, di selezionare le tecnologie innovative e le forme finanziarie migliori per la diffusione di interventi di efficientamento energetico attraverso il coinvolgimento dei principali attori del sistema, le aziende dal lato dell'offerta (ESCO ed aziende produttori di componenti e tecnologie) e gli utenti delle applicazioni stesse (enti pubblici, aziende, cittadini).

In tal senso è stato realizzato lo sviluppo di un ambiente integrato per la progettazione di interventi di efficientamento, che tiene conto di una serie di indicatori di valutazione armonizzando tra loro obiettivi di diversa natura quali costi e tempi di ammortamento, costi di gestione e manutenzione, costi del combustibile e della fornitura dalla rete elettrica per fasce orarie, indicatori di impatto ambientale, e costituirà la base del know-how tecnologico innovativo che verrà utilizzato per la realizzazione del dimostrativo esemplare, per poi essere diffuso tra i soggetti interessati. Nella realizzazione di tale ambiente un ruolo importante è stato svolto da un certo numero di Università che svolgeranno soprattutto un'attività di sviluppo e la validazione di modelli relativi a sistemi di impianti.

L'attività ha una durata complessiva di 3 anni, il progetto si articola in due fasi.

1<sup>a</sup> fase di attività - 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).

2<sup>a</sup> fase di attività - 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 sui quattro obiettivi principali di seguito illustrati.

- definire, acquisire e sviluppare le tecnologie ed i 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 eco design ed etichettatura energetica)
- le tecnologie, le architetture energetiche e gli assetti contrattuali e finanziari verranno 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 che verranno 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.

Nel I anno erano previsti i seguenti obiettivi intermedi.

#### **A. Ricognizione del mercato delle ESCO e progetto di una ESCO pubblico-privata**

Ricognizione della attuale situazione delle ESCO, dei settori di mercato più interessanti, delle tecnologie disponibili e di quelle da sviluppare, della normativa, delle attuali barriere per la diffusione delle applicazioni. Analisi delle diverse strategie percorribili per la costituzione di una ESCO pubblico-privata e formulata una ipotesi progettuale di una ESCO sperimentale pubblico-privata (composizione, forma societaria, core business, tecnologie, metodologie).

#### **B. Ricognizione degli strumenti finanziari**

Ai fini della ricognizione degli strumenti finanziari utilizzabili da una ESCO è previsto uno studio degli strumenti più aggiornati. Saranno analizzati i meccanismi di project financing e le principali tipologie di finanziamento tramite terzi, i meccanismi pubblici che fungono da strumenti di supporto alla diffusione del modello delle ESCO e le modalità di accesso delle ESCO a tali fondi e la contrattualistica europea di riferimento per le ESCO.

#### **C. Ricognizione ed identificazione delle tecnologie innovative e progetto di una applicazione dimostrativa**

E prevista una analisi delle tecnologie innovative per le ESCO con particolare riferimento alle tecnologie di sistema. Verranno definite criticità, opportunità e livello di sviluppo delle varie tecnologie identificando il cluster tecnologico strategico necessario alla ESCO. Verrà identificata una applicazione dimostrativa su cui verrà svolta una analisi e simulazione di un intervento di efficientamento ed un progetto tecnico-finanziario.

#### **D. Sviluppo di un ambiente integrato per la progettazione degli interventi di efficientamento**

Sviluppo di un ambiente per la progettazione di interventi di efficientamento di consistente complessità (progettazione di utenze e reti energetiche, insiemi di edifici, power parks e smart grids). Tale ambiente integrato deve tener conto di una serie di indicatori di valutazione armonizzando tra loro obiettivi di diversa natura quali costi e tempi di ammortamento, costi di gestione e manutenzione, costi del combustibile e della fornitura dalla rete elettrica per fasce orarie, indicatori di impatto ambientale, raggiungimento degli obiettivi produttivi di fornitura termica, elettrica, qualità dell'aria e comfort, valutazioni degli incrementi di efficienza energetica ed indicatori contrattuali, normativa ed accesso agli incentivi, qualità della fornitura in termini di stabilità e capacità di recupero dei guasti o dei black out della rete nazionale.

#### **E. Acquisizione degli strumenti per la realizzazione dimostrativa**

Sulla base del progetto sviluppato nell'obiettivo B1, verranno acquisiti gli strumenti per la realizzazione della applicazione dimostrativa e messe a punto le metodologie finanziarie per il conseguimento della realizzazione stessa.

### **RISULTATI DELL'ATTIVITÀ**

#### **A. Ricognizione del mercato delle ESCo e modellazione di una ESCo pubblico-privata**

In Italia il concetto di ESCo ha fatto capolino per la prima volta in modo apprezzabile nell'ambito del disposto normativo di cui ai decreti gemelli dell'Aprile 2001 emanati dal Ministero dell'Industria al fine di incentivare il risparmio energetico negli usi finali dell'energia. Oggi, nonostante siano trascorsi 7 anni dall'entrata in vigore di tali decreti, gli stessi siano stati rivisti ed alcune delibere applicative dell'Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas si siano succedute, il mercato delle ESCo in Italia è ancora in fase embrionale e molto frammentato.

I risultati dimostrano in primo luogo, che la mancanza di una definizione stringente e l'esistenza di associazioni di categoria di giovane età impediscono di fornire una fotografia nitida del mercato; esistono varie fonti accreditate a vario titolo a cui attingere e che descrivono un quadro piuttosto variegato che conta 372 voci, aggregabili in 7 insiemi: Agenzie Save, ESCo, ESCo pubblico private, possibili ESCo, Consorzi d'acquisto, Utility e altro. In secondo luogo, sono state evidenziate le principali criticità che bloccano lo sviluppo del mercato: mancanza di fondi, normativa lacunosa, tipologia di contratti, basso valore dei certificati bianchi, scarsa familiarità degli operatori del settore con gli Energy Performance Contract, poca propensione da parte dei consumatori all'innovazione e alla



comprensione dei vantaggi che possono trarne, diffidenza del mercato di fronte alle nuove forme di investimento proposte dalla ESCo.

La scelta da parte di una Pubblica Amministrazione (ovvero Ente Pubblico) di costituire una società mista poggia in generale sull'implicito riconoscimento della propria incapacità, mera difficoltà o reale impossibilità, ad avviare progetti industriali che richiedano capacità d'impresa, intesa nel senso di disponibilità del know-how tecnico, gestionale e finanziario.

Per quella P.A. che voglia raggiungere in modo tangibile importanti risultati nel settore dell'efficienza energetica con benefici per tutto il territorio dalla stessa amministrato, una ESCo mista può divenire pertanto un fondamentale strumento a sua disposizione; risulta peraltro immediato comprendere come essa debba avere un'idea chiara di cosa sia una ESCo, di come essa operi e di come essa debba essere costituita in modo tale da non limitarne le potenzialità sin dalla fase pre-operativa.

A tale proposito sono stati individuati due diversi modelli per la definizione di una ESCo pubblico-privata che operi nel settore della promozione della efficienza energetica e della realizzazione di interventi di riqualificazione energetica. I modelli organizzativi proposti per la nuova ESCo rispondono al quadro normativo di riferimento del partenariato pubblico privato (PPP) istituzionalizzato. Il primo modello prevede la finalizzazione dell'IPPP ad una missione circoscritta sul piano oggettivo e temporale (ben dettagliata attraverso il bando di gara) ed esclude la possibilità di ulteriori estensioni se non previste dall'originario appalto o concessione. Il secondo modello prevede la costituzione di una società mista (Newco) con un partner selezionato con procedura a evidenza pubblica modellata in rapporto all'oggetto dell'attività che la costituenda società sarà deputata a svolgere; i ricavi da servizi dovranno essere in grado di remunerare gli investimenti effettuati e la loro gestione/manutenzione, nonché coprire i costi fissi e variabili relativi alla gestione della ESCo stessa. In entrambe i casi la selezione del/i partner privato/i è il primo passo organizzativo di un progetto che deve essere funzionale all'idea di sviluppo energetico e ambientale ricercato, che consideri la realtà del territorio di riferimento, gli obiettivi che su quel territorio si vogliono perseguire, e gli interessi diffusi dei vari attori del settore energia.

## **B. Ricognizione degli strumenti finanziari**

L'attività ha prodotto una ricognizione degli strumenti finanziari e dei modelli giuridici utilizzati per l'operatività delle ESCo esistenti e un'illustrazione degli strumenti giuridici ed economico-finanziari utilizzabili in operazioni di partenariato pubblico privato per la produzione di energia e per interventi di risparmio ed efficienza energetica.

L'intento è stato quello di fornire delle linee guida per la costituzione di una società ESCo mista, attraverso un'analisi delle modalità operative di una ESCo mista e della sua organizzazione. Ciò è stato compiuto analizzando dapprima le prescrizioni del D. Lgs. 115/2008 inerenti i soggetti che possono identificarsi e costituirsi in ESCo, in seguito illustrando le modalità di scelta dei partner privati della società. A tal riguardo sono stati forniti degli esempi di bandi di gara tipo che una costituenda ESCo mista può utilizzare come guida per la scelta dei partner privati.

L'attività si è anche focalizzata sull'introduzione del concetto di "misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia sotto il profilo costi e benefici", concetto propedeutico alla vera novità introdotta dalla norma, ovvero la traslazione dal committente alla ESCo del rischio finanziario, totale o parziale, che risulta la discriminante sostanziale tra il tipo di operatività delle ESCo oggi operanti sul mercato e quelle in fieri volute dal legislatore (Energy Performance Contract).

Il risultato dello studio è stato la creazione di due contratti tipo che una costituenda ESCo mista potrà proporre, uno finalizzato al risparmio energetico correlato al miglioramento del sistema di climatizzazione invernale di condomini privati, adattabile alle prescrizioni dell'allegato II al D. Lgs. 115, ed il secondo per la gestione energeticamente efficiente del sistema di pubblica illuminazione di un comune.

E' stata, infine, messa a punto una procedura di calcolo per la valutazione economica degli interventi di efficienza energetica realizzati con approccio ESCo. Tale procedura risulta essere quindi per una ESCo mista appena costituita, come per una qualsiasi società ESCo, un indispensabile strumento di lavoro, in grado di fornire alla società tutti i dati necessari per una valutazione economica della fattibilità di un intervento di riqualificazione energetica focalizzato sull'ottimizzazione della climatizzazione e sulla possibilità di installazione di sistemi di generazione di energia elettrica da fonte rinnovabile come, ad esempio, impianti fotovoltaici.

La regole alla base di tale strumento confluiranno nell'ambiente di progettazione descritto nell'obiettivo D.

### **C. Ricognizione ed identificazione delle tecnologie innovative e progetto di una applicazione dimostrativa**

E' stata prodotta una selezione delle tecnologie reperibili sul mercato caratterizzate da alti livelli di efficienza energetica e utili alla valorizzazione delle risorse rinnovabili localmente disponibili, per la scala di distretto, mettendone in evidenza i concreti ambiti applicativi e analizzando alcuni casi studio relativi alla tecnologie citate. Per ognuna delle tecnologie o soluzioni impiantistiche scelte, sono stati messi in evidenza sinteticamente vantaggi e limiti di applicazione, in modo da ottenere un quadro verosimile e suggerire soluzioni applicabili nel panorama attuale. È stata inoltre svolta una rassegna dei modelli per la simulazione della domanda e della generazione di energia a scala di distretto, che 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. Lo studio svolto nel presente obiettivo pone l'attenzione, in particolare, sugli aspetti tecnologici, ambientali ed economici che caratterizzano i sistemi energetici e cerca di fornire elementi per lo sviluppo di strumenti di supporto alla definizione di strategie utili al cambiamento del sistema energetico alla dimensione di distretto. Tra gli obiettivi del lavoro vi è stato quello di analizzare gli aspetti di complessità che caratterizzano i sistemi energetici territoriali, mettendone in evidenza le potenzialità di modellazione finalizzate all'ottimizzazione dell'uso dell'energia. L'alto livello di complessità si manifesta nel gran numero di parametri che caratterizzano i diversi utenti finali e i diversi componenti del sistema di generazione, stoccaggio e distribuzione dell'energia. La definizione di un modello in grado di gestire tutti questi aspetti in maniera dinamica, con funzione di supporto sia alla progettazione sia alla gestione, peraltro in un quadro di continua evoluzione dei parametri che caratterizzano le tecnologie e il mercato dell'energia, non è ovviamente cosa semplice. In particolare, sono stati forniti alcuni elementi per la definizione delle curve di domanda di energia; passati in rassegna i modelli, attualmente disponibili, che possono essere presi come spunto per lo sviluppo di uno strumento di simulazione a scala di distretto e, infine, forniti degli elementi direttamente utili ad una successiva implementazione nell'ambiente di progettazione ODESSE, descritto nel paragrafo successivo.

In tale contesto è maturato lo studio di fattibilità per la riqualificazione energetico-funzionale di un edificio ENEA localizzato nella Cittadella della Ricerca di Brindisi. Per quanto riguarda tale edificio sono state previste tutte le attività propedeutiche alle fasi di progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva, volte alla fattibilità di un intervento di riqualificazione energetica. Lo studio è stato rivolto all'adeguamento dell'involucro esterno dell'edificio, alle esigenze di comfort interno e di miglioramento dei livelli di consumo energetico attraverso l'impiego di alcune delle soluzioni tecnologiche quali: cappotto di pannelli isolanti in polistirene e grafite schermati da una pannellatura in lamiera stirata fissata alla parete esistente con una sottostruttura in acciaio zincato, copertura coibentata con pannelli isolanti, un sistema di pannelli radianti a soffitto e sistema di ventilazione naturale per una la migliore climatizzazione, impianto fotovoltaico e impianto di solar cooling. Le scelte architettoniche e impiantistiche sono state validate attraverso una serie di simulazioni dinamiche che hanno permesso di quantificare il miglioramento del comfort, il risparmio energetico rispetto allo stato attuale e, quindi, anche la valutazione dei tempi di ritorno dell'impegno economico.

### **D. Sviluppo di un ambiente integrato per la progettazione degli interventi di efficientamento**

E' stato sviluppato uno strumento di modellazione dinamica che consente di stimare la fattibilità tecnico-economica di un intervento per la riqualificazione energetica di un edificio o di un quartiere esistente e vuole essere un supporto determinante nella progettazione di edifici ecosostenibili (piattaforma: Optimal DESign for Smart Energy - ODESSE).

L'approccio metodologico alle origini di una piattaforma complessa come ODESSE deriva dalla visione integrata del "distretto energetico", un'area o insediamento (residenziale, non residenziale, industriale) che costituisce un sistema energetico, la cui efficienza può essere migliorata con un mix di soluzioni tecnologiche che ottimizzino l'interazione tra consumi e generazione locale dell'energia.

È ormai noto che l'impiego di soluzioni innovative con un potenziale di efficientamento più elevato richiede una progettazione ottimizzata e assistita da simulazioni dinamiche del sistema edificio-impianti. D'altra parte gli ambienti di programmazione esistenti, che permettono di costruire modelli dinamici di simulazione, sono sì molto flessibili (ovvero è possibile simulare qualsiasi tipo di processo: ventilazione naturale, ombreggiature, ecc.), ma altrettanto complessi. Essi richiedono infatti un lungo periodo di addestramento e soprattutto un background scientifico di un certo rilievo; sono in generale strumenti di R&S avanzati e destinati ad un'utenza molto specializzata.

La piattaforma ODESSE nasce, dunque, dall'idea di mediare queste due opposte esigenze. Essa è, infatti, in grado di simulare l'esercizio di fonti energetiche funzionanti in generazione distribuita al servizio d'utenze reali (edifici) e con condizioni tariffarie, fiscali e normative reali. Il progettista, tramite una semplice interfaccia e la scelta opzionale di schemi predefiniti, può quindi valutare l'integrazione di più tecnologie ad alta efficienza energetica (fonti rinnovabili, cogenerazione, solar cooling ecc.) in funzione delle caratteristiche meteo del sito e delle richieste del contesto territoriale, in modo da aumentarne la sostenibilità e la competitività.

La costruzione dei modelli matematici è stata realizzata con un insieme di equazioni differenziali nel dominio del tempo a parametri variabili ed è basata sulla conoscenza della fisica che governa i processi di funzionamento delle sorgenti distribuite (incluse le rinnovabili) delle reti e della dinamica di tutte le variabili che influenzano il comfort termico degli edifici presenti all'interno del distretto. La piattaforma software si compone di vari moduli: interfaccia utente (per inserire i dati di ingresso alla simulazione); data base di materiali per opere civili; pre-processore, che calcola i parametri termici fondamentali dell'edificio, i guadagni interni dovuti al profilo di utilizzo degli ambienti e delle apparecchiature elettriche; simulatore dinamico, motore di calcolo per valutare il carico termico orario, il fabbisogno annuo di energia primaria (FEP) delle sorgenti distribuite e i costi annui per la climatizzazione invernale ed estiva.

Lo sviluppo di ODESSE è stato finora realizzato con la collaborazione di varie università italiane (Università di Roma "La Sapienza", Università di ROMA TRE, Politecnico di Milano, Politecnico di Torino, Università di Palermo, Università del Salento, Università di Padova) creando un network di riferimento, che condivide una risorsa nazionale comune, verso cui si intende orientare anche produttori di componenti, operatori del settore (progettisti, costruttori, ESCo, ecc.) e P.A., e che di per sé costituisce un risultato di valore.

## **E Acquisizione degli strumenti per la realizzazione dimostrativa**

E' stata realizzata la progettazione, la valutazione economica e l'approvvigionamento per la realizzazione di impianto di climatizzazione basato sulla tecnologie del *solar-cooling*, che sfrutta il calore prodotto con pannelli solari per alimentare delle macchine ad assorbimento per la produzione di freddo, ed è costituito dai seguenti componenti: collettori solari, pompa di calore ad assorbimento, caldaia di integrazione, fancoils.

L'impianto è in corso di installazione presso l'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia di ENEA.

La ragione di tale scelta risiede nella consapevolezza che la tecnologia del solar cooling può produrre un'immediata riduzione di consumi energetici ed emissioni di CO<sub>2</sub> ed avere considerevoli ricadute industriali sia in Italia che nel resto del bacino Mediterraneo in vari settori di primaria rilevanza economica (climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e climatizzazione veicolare). Tale tecnologia rappresenta pertanto per l'Italia un settore strategico da perseguire prioritariamente, ove peraltro esistono già in essere competenze uniche al mondo sia in campo scientifico-universitario che in quello industriale.

C'è la necessità, quindi, di promuovere lo sviluppo di sistemi integrati che siano competitivi e di riferimento per il sistema "Italia", in riferimento alle condizioni climatiche (centro sud italiano e bacino Mediterraneo) e alle varie tecnologie disponibili, ad esempio analizzando le potenzialità di impiego invernale, e anche attraverso una mirata attività di diffusione che faccia uso di strumenti di incentivazione.

Nella prima fase di attività è stato condotto uno studio che mirava alla caratterizzazione strutturale ed energetica dello stato attuale dell'edificio con l'ausilio di un modello di simulazione dinamico (TRNSYS 16.1), che consente di calcolare il dimensionamento degli impianti, il carico termico degli edifici, le prestazioni delle macchine, a partire dalla descrizione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro dell'edificio e delle condizioni climatiche del sito (temperatura, umidità relativa, radiazione solare, direzione e velocità del vento).

Nella seconda fase, sempre attraverso il modello di simulazione, sono state analizzate diverse possibili soluzioni, sia a livello di involucro (diverse composizioni delle pareti e degli infissi), a livello impiantistico (tipologie di impianti proposti), che a livello gestionale (sistemi di controllo, strategie per il raffrescamento passivo mediante ventilazione notturna ecc.) al fine di determinare gli apporti gratuiti dovuti ai carichi interni (persone, luci ed apparecchi elettrici).

Dal punto di vista impiantistico, in particolare, è stata studiata un'architettura che si basa sulla climatizzazione ad assorbimento assistita da fonti rinnovabili.

Si è passati quindi alla fase di progettazione esecutiva per la realizzazione dimostrativa. Durante tale fase sono state apportate alcune modifiche rispetto al progetto originario.

- Interventi sull'involucro

Si è deciso di intervenire solo sul tetto, e sono state elaborate due ipotesi: la prima, più tradizionale, prevede la posa di pannelli isolanti coperti da un massetto di cemento (con rete metallica) sul quale viene distribuita una vernice a base di urea-formaldeide, questa scelta permette di non smantellare l'attuale parapetto che delimita tutta la terrazza e che costituisce un comodo strumento nella fase di manutenzione ordinaria dell'edificio; la seconda prevede la copertura dei pannelli isolanti con una lamiera zincata elettrosaldata.

- Scelta degli impianti

Le modifiche apportate riguardano sostanzialmente la tipologia di collettori (a tubi evacuati, anziché parabolici) e la macchina ad assorbimento ( $H_2O/LiBr$  acqua-bromuro di litio, anziché  $H_2O-NH_3$  acqua-ammoniaca). L'impianto, infine, è stato dotato di una serie di sensori per la realizzazione di campagne di monitoraggio.

L'impianto, come già indicato, sebbene di tipo sperimentale dal punto di vista tecnico, in realtà viene installato in un edificio che ospita uffici quotidianamente utilizzati. E' stato, dunque, necessario approntare il piano coordinamento per la sicurezza in fase di progettazione per gli impianti e per le opere edili e far sì che la progettazione fosse rispondente a quanto stabilito dalle Leggi Nazionali, Regionali e Comunali e sviluppata secondo le Norme CEI -UNI.

Per tali attività ci si è avvalsi della collaborazione dello società di servizi di ingegneria ENETEC, che vanta un'avanzata esperienza nella progettazione di impianti di climatizzazione assistiti da collettori solari.

Dopo un'attenta indagine delle principali aziende che operano nel settore, si scelto invece per la realizzazione delle opere di incaricare l'azienda Turco Group s.r.l., leader nel panorama italiano per l'utilizzo delle tecnologie solari grazie ad una decennale esperienza, che produce direttamente i propri collettori solari ed è in grado di dare supporto all'installazione e posa in opera con personale specializzato.

I risultati ottenuti nel presente obiettivo, grazie all'attività del primo anno, saranno utilizzati dal nuovo tema di ricerca 5.4.1.3 "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili" del PAR del secondo anno, il cui contenuto è completamente focalizzato sulle tematiche della climatizzazione tramite tecnologie da fonti rinnovabili.

Le azioni sviluppate da ENEA e dai vari partner, pur essendo state suddivise per ragioni di tipo funzionale e amministrativo in diversi sub-obiettivi, sono strettamente correlate fra loro. Esse, infatti, nell'arco temporale di tre anni concorrono sinergicamente al soddisfacimento dell'obiettivo generale che consiste nello sviluppo e diffusione di "soluzioni tecnologiche di sistema" per la riduzione dei consumi nei distretti energetici. La scelta di orientarsi verso interventi di sistema, anziché sulla sostituzione di singole componenti tecnologiche, permette infatti di ottenere un volume di efficientamento molto più elevato. D'altra parte la mancanza di strumenti accurati di progettazione delle tecnologie e la scarsa familiarità da parte di operatori del settore (ESCo, multi-utilities) con strumenti finanziari più adatti ed evoluti (FTT, Energy Performance Contract) fanno sì che le scelte di intervento siano molto conservative, focalizzate su operazioni a ritorno economico molto breve e su tecnologie già ampiamente consolidate, riducendo così il margine di potenziale guadagno sulla efficienza energetica e l'impatto socio-economico sul territorio.

Per modificare tale visione e realizzare l'obiettivo proposto è stato svolto un programma di attività che si articola attraverso le seguenti azioni, con l'intenzione di mettere a disposizione degli operatori del settore strumenti utili per favorire tale cambiamento:

1. progettazione e sviluppo di modelli di analisi energetica a livello di distretto;
2. classificazione delle prestazioni e reali specifiche di mercato delle tecnologie efficienti più promettenti;
3. sviluppo di ambienti semplificati di calcolo per la progettazione ottimale, assistita da simulazioni dinamiche, del sistema edificio-impianto con le tecnologie individuate;
4. realizzazione di un network di riferimento su alcune tematiche afferenti dell'efficienza energetica costituito dalla comunità scientifica nazionale (università e centri di ricerca), produttori di componenti, policy maker e utilizzatori ;
5. progetto e realizzazione di applicazioni dimostrative, per validare con monitoraggi reali i risultati attesi e promuovere la replicabilità dell'esperienza;
6. attività di indirizzamento dell'importante ruolo delle ESCo nel settore della promozione dell'efficienza energetica, per esempio attraverso la costituzione di una ESCo pubblico-privata con lo scopo in primo

luogo trasferire il know-how specifico sviluppato ed in secondo luogo di innescare un meccanismo virtuoso verso l'ottimizzazione dei servizi di energia (uso esclusivo di Energy Performance Contract).

Tale schematizzazione, dunque, evidenzia la chiave di lettura che ha ispirato l'intero programma delle attività e facilita il lettore ad una corretta interpretazione del lavoro svolto.

#### **A. Ricognizione del mercato delle ESCO e modellazione di una ESCO pubblico-privata**

#### **B. Ricognizione degli strumenti finanziari**

*(Organi esecutori: ENEA, UTPF – Presidenza del Consiglio, Università di Padova)*

##### Stato dell'arte

Le Energy Service Companies nascono in Europa più di cento anni fa, ma si sviluppano solo durante gli anni '70 negli Stati Uniti, come soluzione per affrontare il problema energetico. Infatti l'instabilità politica dei paesi dell'Asia sub-occidentale, che spinge i prezzi del petrolio verso picchi storici, e gli alti tassi di inflazione sperimentati dagli Usa creano la necessità di investire in risparmio energetico.

Le prime ESCo sono semplici società che forniscono servizi di consulenza per minimizzare i consumi di energia, ossia Energy Service Provider Company (ESPCo), e spesso sono appendici di società produttrici di sistemi di controllo e regolazione energetica o società produttrici e fornitrici di energia o società che sviluppano soluzioni tecnologiche e operative. Un ulteriore stimolo alla loro evoluzione arriva dalle politiche attuate per la liberalizzazione del mercato del gas e di quello elettrico.

Non esiste una nozione giuridica per le ESCo né una definizione specifica, ma queste società sono chiaramente riconoscibili grazie al tipo di servizi resi. Come le ESPCo, le Energy Service Company offrono al cliente soluzioni per l'efficientamento energetico: un gamma di servizi integrati per conseguire risparmio e migliorare gli standard produttivi. Solamente le ESCo sono però caratterizzate da quel particolare meccanismo di funzionamento che le erge a viatico per la diffusione dell'efficienza energetica, ossia:

- dall'assunzione dei rischi commerciali che garantiscono al cliente il conseguimento dei risparmi;
- dalla possibilità di svolgere il ruolo di finanziatore diretto dell'intervento;
- da una remunerazione legata al risparmio conseguito.

Queste caratterizzazioni hanno infatti la capacità di sopperire alle lacune del mercato che non permettono l'espansione dell'efficienza energetica:

- l'opportunità di compiere un intervento dipende dal rendimento atteso di tutti gli altri possibili investimenti e da quello dello stesso. La mancanza di informazione sulla reale possibilità di risparmio derivante dall'efficientamento energetico rende basse le aspettative di redditività e sconsiglia l'investimento. Le ESCo hanno strumenti e cultura per dare esatta misura del risparmio e capacità di attuazione tale da stipulare con il cliente un contratto in cui si fanno garanti per il conseguimento di tale risparmio;
- L'investimento in tecnologia energeticamente efficiente comporta costi elevati che precludono ai soggetti poco bancabili e con risorse scarse la conversione ad una gestione sostenibile. Le ESCo possono finanziare in prima persona il progetto o comunque concorrere nella formazione del collaterale necessarie per la concessione di un prestito;
- La mancanza di cultura esiste da entrambe le parti del mercato delle tecnologie energetiche: i tecnici mancano di formazione cosicché non possono fungere da promotori di strumenti tecnologici efficienti presso i clienti, i quali allo stesso modo, non sono a conoscenza delle possibilità che offre il mercato. Le ESCo guadagnano sulla loro capacità di generare risparmio e per riuscire in questo devono annoverare nelle loro file personale esperto e capace.

Le ESCo risolvono, in qualità di soggetto privato con fini profit, il dilemma tra interessi personali e benessere globale. Fornendo servizi per l'efficienza energetica garantiscono risparmi per i clienti in termini monetari e a livello globale la tutela ambientale e l'orientamento verso la sostenibilità.

In Europa le ESCo sono promosse dalla Comunità Europea, con Raccomandazione ai Paesi Membri del 29.03.1988 che le propone come valido strumento per il raggiungimento degli obiettivi in termini di risparmio energetico e salvaguardia ambientale.

La direttiva 93/76/CE del 1992 promuove, oltre al ricorso al Finanziamento Tramite Terzi (F.T.T.) nel settore pubblico, iniziative in materia di energia come Save o Thermie per l'utilizzo di tecnologie energetiche e per incoraggiare la ricerca.

Nel 1996 vengono pubblicati 2 tipologie di contratti per le ESCo per il settore delle costruzioni e per quello industriale al fine di creare standard che facilitino la prassi.

Nel 2002, il Greenlight Programme, per le ESCo che intervengono nel settore dell'illuminazione, concede aiuti in termini di supporto tecnico e trasparenza presso gli utilizzatori. Nel 2003, la COM (2003) 739 final, richiede agli stati membri di rimuovere le barriere alle ESCo e al F.T.T. e concede facilitazioni per l'investimento in efficienza energetica.

Nel 2006 il Piano per l'efficienza energetica coinvolge ancora le ESCo nei meccanismi virtuosi che hanno le capacità di ottimizzare i flussi energetici, diminuire i costi di approvvigionamento e ridurre le emissioni inquinanti. Nella direttiva europea n. 32 del 2006 viene fornita una definizione di ESCo: *“persona fisica o giuridica che fornisce servizi energetici e/o altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica nelle installazioni o nei locali dell'utente e, ciò facendo, accetta un certo margine di rischio finanziario. Il pagamento dei servizi forniti si basa sul miglioramento dell'efficienza energetica conseguito e sul raggiungimento degli altri criteri di rendimento stabili.”*

Il D. Lgs. 115/08 “Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici”, costituisce l'ultimo atto normativo in relazione alla materia specifica.

La lista dei servizi integrati forniti dalle ESCo seguono tutto il ciclo di vita dell'intervento con campi applicativi che spaziano da quelli di natura puramente tecnica realizzativa a quelli di carattere manageriale e finanziario, di solito plasmati in base alle esigenze e alle necessità dei singoli clienti, tra gli altri:

- la progettazione tecnica e l'installazione di tecnologia energeticamente efficiente;
- studi di razionalizzazione nell'uso dell'energia;
- la fornitura di energia;
- studi di misura e verifica dei risultati;
- la gestione e la manutenzione della tecnologia.

Le Energy Service Company non sono semplicemente società di consulenza che implementano interventi per un cliente, ma operano con quest'ultimo collocandosi nella demand side management, condividendo gli obiettivi e rispondendo alla necessità di redditività e carenza di fondi del sistema. L'offerta e l'attuazione del miglior intervento significano maggiori guadagni sia per l'utente che per la ESCo: per il primo in termini di efficienza energetica e risparmio, per la seconda perché la sua remunerazione dipende dal risparmio conseguito e perché si assume i rischi commerciali e l'onere finanziario dell'operazione. Le ESCo guadagnano sulla loro capacità di far diventare efficienti le aziende.

Le ESCo sottoscrivono con il cliente un Performance Contract: questo lega la remunerazione della ESCo alle performance in termini di risparmio che l'intervento sarà capace di produrre.

Lo stesso dopo aver indicato tutti gli oneri delle parti, quantifica i risultati attesi di tutti gli scenari possibili di cui la ESCo si fa garante. Questa assicurazione sposta i rischi commerciali dal cliente alla Energy service company: se i risparmi conseguiti saranno minori a quelli attesi saranno le ESCo a coprire la differenza.

Il Performance Contract si caratterizza rispetto al soggetto finanziatore dell'intervento: utilizzando il risparmio garantito come copertura, il cliente o la ESCo possono finanziare l'intervento o con fondi propri o con il Finanziamento Tramite Terzi.

L'unico decreto normativo, che si pronuncia sulle caratterizzazioni delle ESCo, è contenuto nei decreti ministeriali del 24/7/2001 e prevede che la realizzazione di progetti di risparmio energetico possa essere affidata, per godere dei benefici garantiti dai decreti, a società controllate dalle imprese di distribuzione, a società terze operanti nel settore dei servizi energetici, ad imprese artigiane e a forme consortili. Le ESCo in generale sono piccole medie imprese strutturate come: società indipendenti, società fornitrici di tecnologia, società fornitrici di combustibili o energia, joint venture pubblico private, agenzie nazionali e regionali.

Ogni cliente, usufruendo dei servizi resi dalla ESCo, gode non solo del risparmio energetico prodotto, ma anche della possibilità di implementare interventi senza investire capitali, di essere esentati dall'obbligo di sopportare i rischi legati alla tecnologia e al raggiungimento delle performances, di salvaguardare l'ambiente, di utilizzare tecnologia innovativa. Non è solo questo, la conversione all'efficienza energetica provoca una serie di vantaggi che si amplificano tra loro producendo sul cliente un vero e proprio miglioramento qualitativo e quantitativo.

La struttura delle ESCo necessita di un sistema bancario virtuoso, che abbia la possibilità di finanziare progetti basandosi sulla bontà degli stessi, sull'esperienza e sulle capacità tecniche della Energy Service Company e non solo sulle garanzie materiali che questa può dare.

In Europa, lo stato di diffusione delle ESCo e lo sviluppo del loro mercato hanno raggiunto livelli estremamente differenziati tra paese e paese, tanto che non è possibile delineare dei trend descrittivi comuni; nella maggioranza dei casi è ancora ad un livello embrionale anche se è possibile evidenziare la presenza di paesi in cui il mercato è già solido e maturo come Ungheria, Austria e, più di tutti, Germania (500 ESCo con un fatturato annuo di circa 5 miliardi di euro, interessate, in maniera particolare, nel settore industriale e in quello pubblico).

Allo scopo dunque di favorire il mercato delle ESCo come strumento per l'efficienza energetica è necessario attuare, pubblicizzare e sostenere programmi governativi e non, di supporto tecnico e finanziario per le ESCo e di informatizzazione e motivazione per i clienti.

In Italia, la mancanza di una definizione stringente e l'esistenza di associazioni di categoria di giovane età impediscono di fornire una fotografia nitida del mercato; esistono varie fonti accreditate a vario titolo a cui attingere e che descrivono un quadro piuttosto variegato che conta 372 voci, aggregabili in 7 insiemi: Agenzie Save, ESCo, ESCo pubblico private, possibili ESCo, Consorzi d'acquisto, Utility e altro.

L'analisi di questo panorama ha messo in evidenza le principali criticità che bloccano lo sviluppo del mercato:

- mancanza di fondi;
- normativa;
- tipologia di contratti;
- certificati bianchi: il valore del certificato 30-35 € tipo 1 e 80-85 € tipo 2 sono inferiori ai costi a carico del contribuente (100 €)
- scarsissima preparazione tecnico scientifica dei professionisti (le società di ingegneria non hanno familiarità con gli EPC);
- cultura dei consumatori, poca propensione all'innovazione e alla comprensione dei vantaggi che possono trarne, diffidenza del mercato di fronte alle nuove forme di investimento proposte dalla ESCo;
- difficoltà nella definizione dei contratti. Gli energy performance contract sono un mezzo estremamente adatto per lo sviluppo delle ESCo perché danno la certezza al cliente che non spenderà di più di quanto non faccia nella situazione corrente.

D'altra parte la discussione in tavoli tecnici cui ENEA ha riunito vari operatori del settore ha prodotto una serie di proposte per stimolare il mercato:

- incentivi agli interventi con ritorni economici lunghi anche se non possono essere utilizzati come strumento per lo sviluppo delle ESCo perché qualsiasi attività economica deve essere autonoma e redditizia e non può basarsi sugli incentivi o forme diverse di contributi pubblici servono solo da orientamento e non condizionare il mercato.
- snellimento degli iter burocratici per intervenire nel pubblico.
- interventi con funzione di garanzia delle iniziative proposte da tali soggetti per sopperire alla scarsità di risorse finanziarie.

#### Analisi strumenti giuridici di una ESCo pubblico-privata

In questo complesso panorama operano anche delle ESCo miste pubblico-private, nate all'interno di partenariati pubblico privato (PPP) fra Comuni, Province, Agenzie per lo Sviluppo, multiutility, banche, istituti di credito ed ESCo private. Il PPP, attraverso le diverse metodologie attuative, può essere previsto in tutti i casi in cui una pubblica amministrazione intenda affidare ad un operatore privato l'attuazione di un progetto (in questo caso relativo all'efficientamento energetico) per la realizzazione di opere pubbliche e per la gestione dei relativi servizi.

La scelta da parte di una Pubblica Amministrazione di costituire una società mista poggia in generale sull'implicito riconoscimento della propria difficoltà o reale impossibilità, ad avviare progetti industriali che richiedano capacità d'impresa, intesa nel senso di disponibilità del know-how tecnico, gestionale e finanziario.

Per quella P.A. che voglia raggiungere in modo tangibile importanti risultati nel settore dell'efficienza energetica con benefici per tutto il territorio dalla stessa amministrato, una ESCo mista può divenire pertanto un fondamentale strumento a sua disposizione; risulta peraltro immediato comprendere come essa debba avere un'idea chiara di cosa sia una ESCo, di come essa operi e di come essa debba essere costituita in modo tale da non

limitarne le potenzialità sin dalla fase pre-operativa. Ancor prima la P.A. dovrà avere ben chiara la motivazione che la spinge ad intraprendere una simile impresa.

Il vantaggio principale nella costituzione di una ESCo in cui impegnarsi direttamente e tale dunque da caratterizzare la società come una società mista pubblico-privata, rispetto a quello derivante dall'appoggiare la costituzione di una ESCo privata è per la P.A. quello di poter unire il know-how tecnico e le capacità tecniche e finanziarie del/i partner privato/i con la propria conoscenza della realtà socioeconomica locale e la possibilità di pianificazione del territorio (Integrated Resource Planning - IRP) propria appunto del/i partner pubblico/i; ciò al fine di massimizzare i risultati conseguibili in un mercato dell'efficienza energetica che incontra ancor oggi troppi ostacoli al suo sviluppo.

L'esemplificazione più evidente di tale concetto è riscontrabile nell'azione posta in essere da una ESCo mista che realizzi interventi di miglioramento dell'efficienza energetica negli edifici di proprietà della pubblica amministrazione: si potrà infatti garantire oltre ad una "mera" riduzione delle spese energetiche e all'acquisizione di "negajoules", una tangibile e visibile forma di informazione e pubblicità verso la cittadinanza riguardo l'utilità e la fattibilità degli interventi di efficienza energetica aumentando le possibilità di replicabilità di tali interventi. Più ampia risulterà la gamma dei clienti potenziali cui rivolgersi, più una siffatta attività si avvicina all'IRP del territorio; più ampio sarà il recupero della finanza da efficienza e, di conseguenza, più articolato il management e le competenze che il partner privato dovrà avere; maggiore peraltro ed incisivo sul territorio il risultato conseguibile.

Il mercato di una ESCo mista si potrà di conseguenza sviluppare su commesse specifiche volte al conseguimento del risparmio/efficienza energetica secondo tre specifici filoni di attività:

- riduzione dei consumi di energia a parità di utilizzo finale;
- utilizzo di fonti energetiche alternative e distribuite;
- organizzazione dell'uso dell'energia secondo filosofie di DSM (Demand Side Management) ed energia distribuita.

La P.A. secondo il proprio "indirizzo politico" potrà guidare l'attività della ESCo verso una variegata tipologia di "clienti" individuabili in 4 macroaree:

- clienti pubblici (pubblica illuminazione, edifici pubblici, ecc.);
- grandi clienti privati;
- aggregazione di pmi, artigiani, commercio, ecc.;
- aggregazione di utenti finali.

La presenza nella compagine sociale di un partner pubblico implica, peraltro, la necessità di dover rispettare norme e procedure emanate per salvaguardare la tutela della concorrenza e del libero mercato.

La legislazione oggi vigente limita infatti, fortemente, l'operatività di una società mista pubblico-privato al fine di evitare distorsioni del mercato dovute alla presenza di soggetti che, grazie alla possibilità di limitare il rischio di impresa disponendo di rapporti privilegiati con la pubblica amministrazione, ovvia caratteristica propria di ogni società pubblica, si pongano nel mercato in una posizione di vantaggio rispetto ai concorrenti.

E' possibile sintetizzare le prescrizioni delle due leggi in questione e le limitazioni che alcune scelte possono portare all'operatività di una ESCo mista attraverso lo specchio riassuntivo seguente.

Le situazioni che possono presentarsi sono essenzialmente le seguenti:

1. società che nel proprio statuto prevedono la fornitura di servizi strumentali o che forniscono servizi che vengono classificati come strumentali. Rientrano nell'ambito di applicazione del D.L. 223/2006 e non possono fornire servizi ad enti pubblici o privati che non siano costituenti o partecipanti la società stessa;
2. società per la fornitura di servizi pubblici locali di rilevanza economica. Sono escluse dall'ambito di applicazione del D.L. 223/2006, ma devono rispettare le prescrizioni dell'articolo 23-bis del D.L. 112/2008, secondo il quale queste possono operare con qualsiasi ente, ma il conferimento della gestione dei servizi pubblici locali deve avvenire mediante procedure competitive ad evidenza pubblica;
3. società per la fornitura di servizi pubblici locali di rilevanza economica operanti in deroga alle modalità di affidamento ordinario di cui al comma 2 del D.L. 112/2008. Queste sono società che, per motivi particolari che non consentono il ricorso al mercato, hanno ottenuto l'affidamento diretto della gestione di un servizio pubblico locale. Tali società, secondo quanto previsto sempre dal D.L. 112/2008, non potranno operare né con altri enti, sia pubblici che privati, né in ambiti territoriali diversi, né con affidamento diretto e nemmeno con gara.



Per non rientrare nell'ambito di applicazione delle due leggi sopra descritte, e non limitare l'operatività della ESCo mista, bisognerebbe evitare di comprendere nell'oggetto sociale la possibilità di fornitura di servizi strumentali all'attività dei soci e di attività correlate all'erogazione di servizi pubblici locali. Bisogna però fare attenzione anche all'oggetto del contratto col cliente, evitando che il servizio offerto possa essere considerato come servizio strumentale all'attività di un ente.

#### Società ESCo mista: modalità operative e organizzazione

L'operazione di miglioramento dell'efficienza energetica con il ricorso ad una ESCo utilizza, di norma, il c.d. Finanziamento Tramite Terzi (FTT), ovvero un *"accordo contrattuale che comprende un terzo – oltre al fornitore di energia ed al beneficiario della misura di miglioramento dell'efficienza energetica – che fornisce i capitali per tale misura ed addebita al beneficiario un canone pari a una parte del risparmio energetico conseguito avvalendosi della misura stessa"* (art. 3, c. 1, lett. k) Direttiva 2006/32/CE). Nel caso di specie il terzo è una ESCo. Attraverso lo strumento del FTT le ESCo possono favorire gli interventi di razionalizzazione energetica, sostenuti non più da contributi pubblici a fondo perduto o dal credito tradizionale ma da investimenti attivabili con capitale privato, realizzando così una forma di partenariato pubblico-privato (PPP).

Il D.Lgs. 115/2008 ha inoltre ampliato la gamma dei soggetti che possono agire come ESCo: non più solo le "società", ma tutti i soggetti quali "persone fisiche e giuridiche". È la risposta alla necessità di rendere omogenea, a livello Europeo, l'individuazione dei potenziali operatori del mercato dell'efficienza che si organizzino per conseguire efficienza o risparmio energetico.

Le persone giuridiche, secondo quanto previsto dal Codice Civile – Libro Primo/Titolo II: Delle persone giuridiche, Capo I: disposizioni generali – art. 11, art. 12 e art. 13, possono essere di tre fattispecie diverse:

1. Persone giuridiche pubbliche;
2. Persone giuridiche private;
3. Società (società di persone, società di capitali, società miste pubblico privato, ecc.)

Una società mista pubblico privato può quindi, secondo quanto previsto dal D.Lgs. 115/2008 qualificarsi come una ESCo, purché rispetti le leggi in vigore che ne regolano l'operatività commerciale, quali, ad esempio, le leggi sulla concorrenza analizzate nella prima parte della trattazione.

Se pur la "causa" del contratto, il risparmio energetico, o efficienza che dir si voglia, lo rende strumento adatto a creare una convergenza di interessi tra i sottoscrittori, le motivazioni che portano ognuno di loro alla partecipazione in una ESCo mista possono essere diverse e molteplici. Nella costruzione della società il partner privato può essere uno o un aggregato di soggetti con caratteristiche diverse e in sinergia tra loro.

Sia il singolo soggetto che uno scelto tra quelli aggregati, rivestirà il ruolo di partner tecnico di riferimento; a questo sarà affidato l'onere di sviluppare progetti, strategie e programmi di sviluppo della società, come pure il management e l'organizzazione.

La costituzione della ESCo mista è un processo che prevede l'utilizzo di procedure di gara, pubbliche e trasparenti, per la selezione dei partner privati. L'ente pubblico, nella fase di studio dell'organizzazione e della strutturazione sia del bando di gara prima, che della ESCo stessa poi, non può prescindere dalla considerazione dovuta alle motivazioni e alle aspettative dei privati.

Le motivazioni dei partner privati dipendono dalle valutazioni, aspettative e strategie con cui il potenziale partner vi partecipa, driver che molto dipendono dal loro core business e dalla loro operatività industriale. Si avranno così ESCo miste che si costituiranno:

- con produttori e fornitori di tecnologie
- con utilities
- con società di servizi
- con istituti finanziari
- con soggetti indipendenti diversi dai precedenti
- con Agenzie pubbliche e associazioni.

Un elemento cruciale da analizzare nella scelta da parte dell'ente pubblico riguarda il livello di rischio accettabile dai diversi potenziali partner privati. La definizione della matrice del rischio accettabile dai potenziali partner privati offrirà un orientamento per comprendere quali politiche e strategie saranno adottate dal partner tecnico di riferimento della ESCo mista.

In tale senso si riporta, in Tabella 60, un esempio di matrice del rischio accettabile.

**Tabella 60. Matrice del rischio accettabile**

| Tipologie                                             | Grado di rischio accettato su investimenti | Fattispecie contrattuali cui tenderà l'E.P.C.                               |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ESCo con produttori di attrezzature                   | Nulla                                      | Leasing, renting, ecc.                                                      |
| ESCo con utilities<br>ESCo con società di servizi     | Molto basso                                | Leasing, renting e derivati quali global service, facility management, ecc. |
| ESCo con istituti finanziari<br>ESCo con indipendenti | Alto                                       | E.P.C.                                                                      |
| ESCo con Agenzie pubbliche<br>Studi professionali     | Molto basso                                | Consulenza                                                                  |

La selezione del/i partner privato/i è quindi il primo passo di una P.A. verso la costituzione di una ESCo mista. È, di conseguenza, anche il primo passo organizzativo di un progetto che deve essere funzionale all'idea di sviluppo energetico e ambientale ricercato, che consideri la realtà del territorio di riferimento, gli obiettivi che su quel territorio si vogliono perseguire, e gli interessi diffusi dei vari attori del settore energia.

I modelli organizzativi proposti rispondono al quadro normativo di riferimento del partenariato pubblico privato (PPP) istituzionalizzato.

Nel caso di PPP, per quanto concerne la scelta del partner privato, l'art. 1, comm2 del d.lgs. n. 163/2006 e ss.mm.ii. prescrive che *"nei casi in cui le norme vigenti consentono la costituzione di società miste per la realizzazione e gestione di un'opera pubblica o di un servizio, la scelta del socio privato avviene con procedura ad evidenza pubblica"*

In proposito si precisa che la giurisprudenza più recente del Consiglio di Stato in materia di affidamento di servizi pubblici locali di rilevanza economica a società miste (cfr. parere CdS, sez. II, 18 aprile 2007, n. 456 e CdS ad plenaria, sentenza 3 marzo 2008, n. 1) ha ammesso la possibilità di affidamenti diretto (c.d. *in house*) di servizi o lavori alla società mista il cui socio privato sia stato selezionato con procedura di evidenza pubblica e purché siano soddisfatte entrambe le seguenti condizioni:

- il socio privato non è solo un socio finanziario (c.d. socio di capitale), ma un socio imprenditore (c.d. socio di lavoro o socio industriale o socio operativo);
- la procedura di evidenza pubblica abbia selezionato il socio privato sia in base a requisiti finanziari sia in base ad idonei requisiti tecnici in relazione all'oggetto dell'appalto affidato alla società.

In altre parole, secondo il Consiglio di Stato, è possibile utilizzare con la medesima procedura di evidenza pubblica per la scelta del socio privato e per l'affidamento alla società così costituita di una specifica missione. E' però necessario che tale missione sia circoscritta sul piano oggettivo e temporale; al contrario, non essendo invece ammissibile una società mista "aperta" o "generalista".

Tale impostazione sembra trovare conferma nella comunicazione della Commissione europea del 5 febbraio 2008, relativa alle modalità di applicazione del diritto comunitario degli appalti e delle concessioni ai partenariati pubblico privati istituzionalizzati (IPPP). In particolare la Commissione ha specificato che per IPPP si intende un una cooperazione tra parte pubblica e soggetto privato che implica la costituzione di un soggetto a capitale misto, che esegue appalti e concessioni pubblici. L'apporto del privato consiste oltre che nell'apporto di capitali o altre risorse, nella partecipazione attiva ai contratti affidati al soggetto a capitale misto.

La Commissione ha ritenuto esperibile una sola procedura di gara che abbia un duplice oggetto: la scelta del partner privato, di cui vanno fissati requisiti e prestazioni, e l'affidamento a tale partner della missione al cui perseguimento è finalizzato l'IPPP. Nella procedura di evidenza pubblica avente il duplice oggetto di scelta del partner privato e affidamento ad esso della missione occorre rispettare i principi di parità di trattamento, non discriminazione e trasparenza, a tal fine occorre che il bando di gara contenga informazioni sufficientemente dettagliate in merito ai seguenti aspetti:

- appalti e concessioni che saranno affidati alla società mista;
- statuto e atto costitutivo della società mista;
- accordi tra azionisti;
- rapporto tra stazione appaltante pubblica e partner privato;
- rapporto tra soggetto pubblico e futura società mista.

In particolare il rispetto del principio di trasparenza richiede che il bando iniziale indichi eventuali opzionali rinnovi o modifiche dell'originario appalto o concessione, sia l'eventuale opzionale affidamento alla società mista di ulteriori missioni; in caso contrario per l'affidamento di tali incarichi aggiuntivi occorrerà esperire una nuova gara.

Nel caso della costituzione di una società mista (Newco) deputata alla realizzazione di interventi di produzione, risparmio ed efficienza energetica, la pubblica amministrazione è tenuta a selezionare il partner privato con procedura ad evidenza pubblica modellata in rapporto all'oggetto dell'attività che la costituenda società sarà deputata a svolgere.

I ricavi da servizi dovranno essere in grado di remunerare gli investimenti effettuati e la loro gestione/manutenzione nonché coprire i costi fissi e variabili relativi alla gestione della ESCO stessa. Tali ricavi, di cui l'amministrazione sarà destinataria in quota parte, sono determinati in ragione della tipologia e del numero di servizi erogati. In particolare a seconda della strategia commerciale perseguita, la ESCO potrà gestire i servizi energetici derivanti dallo sfruttamento dell'energia di tipo solare - termico, da impianti a biomasse, o da interventi relativi alla illuminazione pubblica, semafori a led, rigenerazione, ecc.

In questo caso il socio pubblico deve provvedere a reperire risorse finanziarie pubbliche da destinare alla capitalizzazione della società mista per la quota di *equity* pubblica, mentre le altre risorse finanziarie deriveranno da risorse private (*equity* privato) e da finanziamenti bancari. In presenza di limitate risorse pubbliche la partecipazione del socio privato al capitale sociale dovrà essere maggioritaria. Sebbene tale strumento sembra essere efficace ed efficiente per il finanziamento e la fornitura di servizi energetici integrati volti al perseguimento di scopi di interesse generale (ampia scelta dei soci, asset flessibile, utilizzo di IRP), occorre tuttavia anche considerare che l'applicazione di tale modello non si accompagna a obiettivi di semplificazione amministrativa e ottimizzazione dei costi. E' infatti quasi del tutto preclusa la possibilità di procedere all'affidamento diretto di forniture e servizi strumentali all'attività dei soci. La convenienza del ricorso alla società mista per il finanziamento, la fornitura di servizi energetici e l'esecuzione degli interventi strumentali alla fornitura di tali servizi deve dunque essere valutata caso per caso.

#### Analisi di strumenti contrattuali e finanziari

Il Decreto Legislativo 115/2008, fornisce precise indicazioni circa le caratteristiche con le quali una vera ESCo deve condurre l'erogazione del proprio servizio. Sotto tale profilo le principali novità apportate possono essere riassunte nei seguenti punti:

- l'introduzione del concetto di "misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia sotto il profilo costi e benefici", concetto propedeutico al punto successivo;
- la traslazione dal committente alla ESCo del rischio finanziario, totale o parziale, che risulta la discriminante sostanziale tra il tipo di operatività delle ESCo oggi operanti sul mercato e quelle in fieri volute dal legislatore.

Allo scopo di evidenziare meglio quanto detto la Tabella 61 evidenzia le principali evoluzioni subite dalla normativa:

**Tabella 61. Evoluzioni della normativa**

| COM(2003) 739                                                                                                                                                                           | Direttiva 2006/32/CE                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| efficienza energetica per le installazioni dell'utilizzatore                                                                                                                            | efficienza energetica nelle installazioni o nei locali dell'utente                                                                                                                            |
| accetta un certo margine di rischio tecnico e, <u>talora</u> , anche finanziario*                                                                                                       | accetta un certo margine di rischio finanziario                                                                                                                                               |
| il pagamento dei servizi forniti si basa (totalmente o parzialmente) <u>sul raggiungimento degli standard di qualità di rendimento e/o</u> sui miglioramenti dell'efficienza energetica | il pagamento dei servizi forniti si basa (totalmente o parzialmente) sul miglioramento dell'efficienza energetica conseguito e sul raggiungimento degli altri criteri di rendimento stabiliti |

\*Se il rischio tecnico corrisponde al classico rischio d'impresa produttrice di beni e servizi espresso, in generale, a livello contrattuale, dalla garanzia data dal fornitore al cliente, il rischio finanziario è in generale e normalmente collegato o alla solvibilità del cliente o al successo dei progetti posti in essere dalla stessa impresa.

L'introduzione di piccole modifiche nella norma impongono alcuni radicali cambiamenti nella gestione dei servizi, ad esempio gli standard di qualità di rendimento sono parametri di "qualità" del servizio reso, non sono parametri assoluti e oggettivi, come le "quantità di consumo ridotte", tanto che non sempre risultano facilmente controllabili dall'utente finale. L'assunzione del rischio finanziario, e la sua misura o margine, diventano elementi contrattuali trasparenti, e devono essere calcolati, e soprattutto condivisi, con e per il cliente sulla misura del risparmio energetico in termini di riduzione quantitativa dell'energia consumata.

Tutto ciò infatti porta all'individuazione di una forma contrattuale, giuridicamente diversa dai contratti di servizi fin qui utilizzati, e ormai tipizzati nella pratica, quali servizio energia, global service, chauffage, facility management, outsourcing, ecc.: l'Energy Performance Contract o E.P.C..

Quanto sopra emerge chiaramente dalla risoluzione della VIII Commissione Permanente del Parlamento Italiano che pone chiaramente l'accento sull'aspetto privatistico del contratto di efficienza energetica proposto dalle ESCo, cogliendone appieno il significato, che lo distingue da tutte le altre forme di contratti per servizi energetici: *“le ESCo effettuano l'intervento, si accordano con l'utente finale (che non paga niente) su quanta parte del risparmio economico ottenuto debba servire a ripagare l'investimento, definendo così il piano di rimborso. Alla fine del periodo di rimborso, l'utente finale diventa titolare dell'intervento e usufruisce in pieno dei risparmi derivanti”*.

L'E.P.C. è, per la componente di alea aggiuntiva che induce parametri e rapporti, assolutamente diverso dai contratti dei servizi energetici noti; questi ultimi sono contratti di scambio, sinallagmatici a prestazioni/obbligazioni corrispettive. L'E.P.C. è un contratto finanziario, condizionato e aleatorio, di natura associativa che prevede una costante interazione tra utente ed ESCo (il trasferimento dell'alea assume rilevanza causale) e in cui esiste una comunione e convergenza degli obiettivi, tra loro non conflittuali.

Quanto fin qui detto si riflette nelle clausole contrattuali dell'E.P.C. che “obbliga”, per la “gestione” o amministrazione del rischio finanziario assunto, ad inserire i parametri di controllo dell'effettivo risparmio conseguito. Clausole utili ad ambedue i contraenti, in quanto consentono la redazione di un “bilancio” periodico dell'andamento reale rispetto a quello “preventivato” in modo che:

- l'utente finale, possa verificare l'effettivo risparmio energetico;
- la ESCo abbia i parametri utili per esigere il pagamento della propria quota annua di risparmio.

La centralità dell'assunzione del rischio finanziario, da parte delle ESCo, così come ora delineata, e il suo diretto rapporto con il conseguimento dell'efficienza/risparmio energetico, è elemento tale da modificare la “causa” stessa del contratto di servizi, incidendo sulla struttura contrattuale sulla sua natura, facendolo rientrare nella fattispecie dei contratti associativi. Genera cioè una netta contrapposizione tra l'E.P.C. e i contratti di servizi a prestazioni corrispettive oggi circolanti sul mercato dell'energia, pur conservando, l'E.P.C., il rischio d'impresa classico collegato, quest'ultimo, alle componenti tecniche.

Naturale conseguenza è la creazione di un nuovo mercato, di nuovi attori, e di una nuova forma contrattuale che meglio si adatta all'obiettivo di massimizzare il rapporto costi benefici previsto dalla nuova normativa.

Potranno quindi convivere sul mercato, fino a quando questo non opererà selezioni (naturali o indotte da un organo di controllo), due tipi di ESCo:

- quelle individuate ai fini della riduzione dei consumi presso gli utenti finali, generate, secondo gli indirizzi dell'AEEG, in forza dei decreti emanati nel 2001 e nel 2004 con cui si istituiva il meccanismo dei certificati bianchi, che utilizzano i contratti di servizio energia “classici” e consolidati nella prassi, rapporti che hanno in comune le caratteristiche dei contratti di scambio, sinallagmatici a prestazioni/obbligazioni corrispettive;
- quelle individuate dalla Direttiva 2006/32/CE e dal D.Lgs. 115/2008 che utilizzeranno nuovi standard contrattuali (gli E.P.C.).

In tale ambito sono stati redatti a scopo esemplificativo: a) un contratto di efficienza energetica rivolto a clienti privati, che può essere utilizzato da una ESCo come contratto tipo per la fornitura di un servizio di risparmio energetico a condomini e può essere considerato un “contratto servizio energia «Plus»” ai sensi del D.Lgs. 115/2008; b) un contratto che una ESCo potrà rivolgere agli enti pubblici per la prestazione di risparmio energetico attraverso la gestione del servizio di pubblica illuminazione.

### **C. Riconoscimento ed identificazione delle tecnologie innovative e progetto di una applicazione dimostrativa**

(Organi esecutori : ENEA, Politecnico di Milano, UNIROMA, UTFP)

#### Strategie e modelli di efficienza energetica alla scala urbana

Uno dei vantaggi nella costituzione di una ESCo esemplare mista pubblico-privata per la P.A. o per l'ente pubblico promotore, è quello di poter sfruttare un know-how tecnico di alto profilo per la diffusione di interventi di efficientamento anche con tecnologie innovative e di avviare progetti a maggior rischio finanziario.

La spinta all'attuazione di programmi più ambiziosi di quanto già messo in campo attraverso l'applicazione di diversi meccanismi incentivanti (certificati bianchi, conto energia, sgravi fiscali, ecc.) mette in evidenza la necessità di definire obiettivi e promuovere iniziative concrete in grado di agire in maniera efficace e sinergica sui

tre principali “lati” del sistema energetico, ovvero: riduzione della “domanda” di energia<sup>5</sup>; 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 e la necessità da parte delle ESCo di ampliare la scala territoriale al fine di raggiungere economie di scala per una gestione delle attività ottimale, coinvolgono necessariamente un modello più ampio e più complesso rispetto a quella del singolo edificio; la dimensione del distretto potrebbe essere il giusto “modulo” per l’effettiva implementazione di un nuovo paradigma energetico.

L’analisi degli aspetti di complessità che caratterizzano i sistemi energetici territoriali, mette in evidenza le potenzialità di modellizzazione finalizzate all’ottimizzazione dell’uso dell’energia. L’alto livello di complessità si manifesta nel gran numero di parametri che caratterizzano i diversi utenti finali e i diversi componenti del sistema di generazione, stoccaggio e distribuzione dell’energia. La definizione di un modello in grado di gestire tutti questi aspetti in maniera dinamica, con funzione di supporto sia alla progettazione sia alla gestione, peraltro in un quadro di continua evoluzione dei parametri che caratterizzano le tecnologie e il mercato dell’energia, non è ovviamente cosa semplice.

Le azioni per il contenimento della domanda possono riguardare singoli edifici, esistenti o di nuova realizzazione, oppure sistemi di edifici di dimensioni variabili, dal quartiere all’area metropolitana vasta.

A livello di singolo edificio, sono ovviamente da privilegiare tutte le strategie finalizzate:

- al miglioramento dell’involucro (massa, trasmittanza, caratteristiche delle superfici trasparenti) in funzione della zona climatica di riferimento e della destinazione d’uso dell’edificio stesso; alla valorizzazione degli apporti solari tramite una corretta forma ed esposizione dell’edificio e grazie all’utilizzo di sistemi adeguati per il controllo della radiazione solare;
- alla valorizzazione dei guadagni interni e al loro corretto smaltimento;
- all’uso di sistemi di ventilazione, ove possibile, di tipo naturale o ibrida, oppure meccanica con recupero di calore dell’aria esausta;
- all’installazione di dispositivi di illuminazione e di apparecchiature elettriche altamente efficienti (eventualmente anche lavatrici e lavastoviglie funzionanti ad acqua calda e non ad acqua fredda riscaldata mediante resistenza elettrica);
- all’uso di sistemi di distribuzione del calore a bassa temperatura e di componenti di impianto altamente efficienti;
- all’uso di sistemi di gestione e controllo finalizzati al risparmio energetico e alla riduzione del picco di domanda, in special modo elettrica.

Ovviamente, non tutte le strategie sono sempre attuabili; molto spesso ci si trova, nel concreto, di fronte a vincoli economico-finanziari e ad un pochissimo numero di gradi di libertà, soprattutto per gli edifici esistenti ove sono già definiti, forma, tecnologia edilizia adoperata ecc.

Le diverse azioni proponibili possono essere riassunte in: riqualificazione energetica degli edifici esistenti; realizzazione di edifici nuovi (solo se) ad alta prestazione energetica. In realtà, già tali strategie possono implicare una visione di scala che va al di là del singolo edificio, suggerendo interventi a scala di quartiere sia per il nuovo sia per l’esistente.

La scala urbana è per natura altamente complessa e, in questo caso, diviene ancora più complicato intraprendere decisioni e, soprattutto prevederne gli effetti. In generale, se si considera la realtà nazionale, ci si trova di fronte a città esistenti, in cui possono essere previsti interventi di rinnovo/conservazione di quartieri esistenti o realizzazioni di nuovi quartieri di espansione (residenze, centri commerciali, poli industriali). In questo caso, il miglioramento della gestione dei servizi energetici può essere più efficacemente messo in atto grazie ad iniziative di tipo modulare.

---

<sup>5</sup> Si tratta non solo di una riduzione a livello quantitativo, ma anche a livello qualitativo, considerando cioè anche il tipo dell’energia (elettricità, calore ad alta temperatura, calore a bassa temperatura).

A tale scala, assumono particolare importanza la corretta progettazione del *lay-out* e la progettazione integrata delle reti e dei servizi. Il primo, qualora applicabile, rappresenta uno strumento con effetti duraturi ed efficaci per la riduzione della domanda di energia e, di conseguenza, delle emissioni inquinanti, grazie alla possibilità di controllare la radiazione solare e l'effetto del vento e di organizzare i modi di spostamento; il secondo può creare sinergie utili alla gestione dei flussi e al miglioramento dell'efficienza del metabolismo urbano.

Il *lay-out* urbano e la tipologia degli edifici dovrebbero abbinarsi correttamente al contesto climatico locale, che, proprio per questo motivo, deve essere studiato a fondo in tutte le sue componenti (preesistenze naturali): radiazione solare, vento, temperatura, umidità. Infatti, tali parametri dovrebbero caratterizzare sia la struttura sia la compattezza dell'insediamento; per esempio, un *lay-out* urbano caratterizzato da una griglia di assi ortogonali Nord-Sud e Est-Ovest ottimizza l'uso dei guadagni solari negli edifici, ovvero consente di massimizzarli in inverno e minimizzarli in estate, migliorando notevolmente le condizioni di comfort termico in entrambe le stagioni. È interessante notare che, infatti, tale layout urbano caratterizza la maggior parte dei più recenti esempi di insediamenti ecologici perché consente di migliorare le condizioni di comfort e di contenere la domanda di energia per riscaldamento e raffrescamento. Inoltre, l'analisi delle superfici colpite dalla radiazione solare e delle ombre e lo studio dei venti sono strumenti importanti nella fase di definizione della forma, dell'orientamento e della distanza da mantenere tra gli edifici al fine di mitigare le condizioni termo-igrometriche sia in inverno sia in estate, garantendo:

- massima radiazione solare in inverno
- minima radiazione solare in estate
- eventuale protezione dai venti freddi
- ventilazione per asportare calore in estate
- mitigazione dell'effetto isola di calore.

Il fenomeno isola di calore, inteso come aumento locale della temperatura nelle aree urbanizzate, rappresenta un importante contributo all'incremento della domanda di raffrescamento estivo ed è a sua volta favorito dalla presenza dei condizionatori estivi che scaricano calore nell'ambiente esterno. Oltre al progetto dell'ambiente costruito andrebbero poi presi in considerazione altri elementi che possono avere effetti importanti sulla determinazione del micro-clima urbano, come le aree verdi e l'acqua.

Un'altra importante strategia utile al contenimento della domanda di energia riguarda la progettazione di un mix ottimale delle diverse destinazioni d'uso degli edifici (Figura 135). Infatti, oltre ad avere importanti effetti sul contenimento della domanda di energia per la mobilità, la sovrapposizione di diverse funzioni sul medesimo territorio può favorire la presenza simultanea di diversi tipi di domanda energetica (elettricità, riscaldamento e refrigerazione) e consentire l'implementazione di configurazioni particolarmente efficienti sotto il profilo energetico, ambientale ed economico (cogenerazione, trigenerazione, stoccaggio ecc.). In conclusione, le strategie di riduzione della domanda risultano essere sicuramente quelle più promettenti, durature e convenienti sia a scala di edificio sia a scala di distretto; tuttavia, la loro implementazione implica una stretta interazione con le caratteristiche del territorio e può necessitare di importanti interventi di carattere infrastrutturale, non sempre compatibili con i vincoli e le pre-esistenze riscontrabili caso per caso.

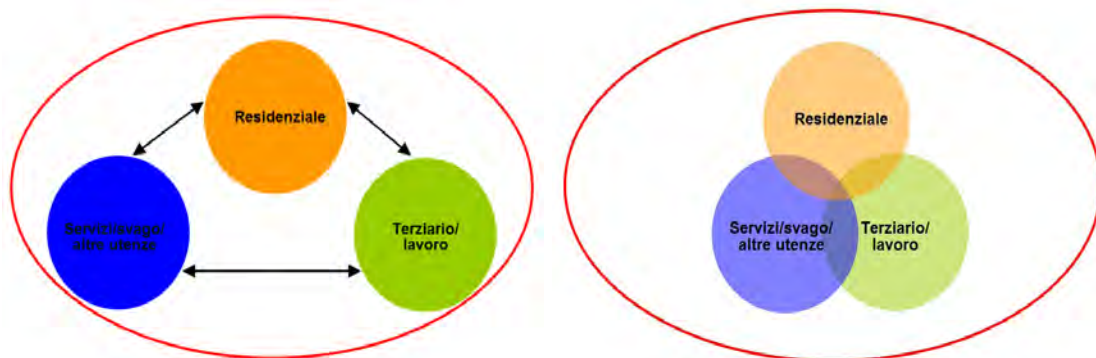


**Figura 135. Benefici di una città compatta e multicentrica rispetto ad una lineare**

### Interventi per il miglioramento della generazione energetica

Se si escludono rare eccezioni, in Italia, l'attuale sistema di approvvigionamento energetico consente di coprire la domanda di riscaldamento mediante l'utilizzo di vettori fossili e la domanda di elettricità (utile, abitualmente, anche al soddisfacimento dell'eventuale domanda di raffreddamento) mediante il parco di generazione nazionale in cui predominano le grandi centrali termoelettriche, basate su combustibili fossili.

Questo quadro si scontra con evidenti emergenze locali e globali che non è più possibile negare o trascurare perché fortemente condizionanti gli stili di vita, presenti e, soprattutto futuri, di ciascuno.

Gli scenari di generazione energetica del futuro dovranno prevedere necessariamente il ricorso a tecnologie altamente efficienti e basate su fonti di energia differenziate e potranno beneficiare dell'alto livello di innovazione tecnologica raggiunto dai diversi componenti. La definizione di nuovi modelli di approvvigionamento energetico e la valutazione della loro fattibilità tecnico-economica, dell'applicabilità all'ambiente costruito e del livello di sostenibilità ambientale-economico-sociale dovrà essere supportata da strumenti opportuni, rispetto ai quali, sulla base delle rassegne condotte, di evidenzia una certa necessità di sperimentazione.

L'utilizzo di fonti di energia localmente disponibili e di facile accesso rappresenta dunque un elemento basilare per la progettazione energetica dei distretti. Fatto salvo il *plafond* di incentivazione all'uso di tutte le fonti rinnovabili, è importante però che i diversi interventi siano valutati, distretto per distretto, in funzione della caratterizzazione quali-quantitativa della domanda di energia e delle diverse peculiarità locali. Ciò per evitare effetti perversi come, ad esempio, prevedere un impianto a biomassa se non è possibile garantire l'approvvigionamento in maniera costante facendo riferimento ad un bacino ragionevolmente contenuto, oppure promuovere impianti mini-eolici se non vi sono le condizioni di vento e di morfologia necessarie per il loro funzionamento ottimale, oppure ancora progettare dei sistemi di climatizzazione a sonde geotermiche se le caratteristiche dell'utenza, del clima e del terreno non sono correttamente abbinate. Tali effetti alimenterebbero infatti, oltre che un grave spreco di risorse, la diffusione di un atteggiamento di sfiducia nei confronti dei sistemi energetici basati su fonti rinnovabili.

Come più volte ribadito, le misure per l'incentivazione all'uso delle fonti rinnovabili andrebbero comunque poste a valle di azioni finalizzate al contenimento della domanda di energia e all'uso razionale dei diversi vettori energetici. Senza tali presupposti infatti, le rinnovabili risulterebbero totalmente sprecate. In tale ambito assumono particolare importanza sia la progettazione edilizia sia la progettazione urbana. Un distretto efficiente sotto il profilo energetico non è "soltanto" un insieme (somma) di edifici efficienti; altri aspetti vanno necessariamente considerati, riguardanti le interrelazioni tra i diversi elementi dell'ambiente costruito, e, più in generale, il metabolismo del distretto stesso.

Ad esempio, strategie per l'integrazione di sistemi solari attivi non potrebbero avere senso in assenza di un orientamento appropriato degli edifici e una morfologia urbana tale da limitare fenomeni di ombreggiamento reciproco.

Le seguenti risorse rinnovabili sono state analizzate nel dettaglio perché particolarmente promettenti per l'impiego in sistemi energetici urbani, alla luce delle caratteristiche climatiche e urbanistiche del territorio nazionale e del contesto tecnologico-economico di riferimento:

- sistemi ad energia solare: solare fotovoltaico; solare termico (inclusi solare ibrido e *solar cooling*);
- sistemi a biomasse;
- sistemi geotermici, in particolare a bassa entalpia.

Per ciascuna risorsa, sono state indagate le caratteristiche fondamentali, le tecnologie di conversione energetica, il livello di diffusione e di maturità tecnologica, gli aspetti economici, le concrete condizioni di applicabilità in contesti urbani e le prospettive future, è stata inoltre condotta una selezione dei casi studio con l'obiettivo di indagare sia applicazioni "famose" (BedZed, Vauban ecc) sia applicazioni meno note. Tale rassegna non è da considerarsi esaustiva e potrebbe essere aggiornata nel tempo. Per alcuni esempi importanti, come Malmö, Göteborg ecc. si rimanda alla lettura di riferimento, mentre alcuni dei casi selezionati fanno riferimento in realtà non ad una singola tecnologia, ma a sistemi di tipo integrato riferibili a più fonti tecnologie energetiche.

### Implementazione della generazione distribuita dell'energia

La generazione distribuita (DG) dell'energia è l'elemento fondamentale del nuovo paradigma energetico. Essa è l'unica forma di generazione, infatti, che consente la diversificazione dei vettori energetici e uno sfruttamento intelligente delle risorse di energia rinnovabile che, a causa della loro scarsa intensità, non potrebbero essere convenientemente impiegate in sistemi di taglia comparabile con quella dei sistemi alimentati ad energia fossile.

Per tale motivo, gli sforzi economici e scientifici andrebbero indirizzati nella creazione di infrastrutture adeguate alla realizzazione dei punti di interscambio e delle micro-reti di trasmissione, nella messa a punto di modelli di simulazione utili alla valutazione/progettazione dei sistemi di DG e nel miglioramento delle prestazioni energetico-ambientali dei componenti utili alla conversione energetica.

#### *Smart grid*

La rete elettrica nazionale attuale risulta inadeguata rispetto alla domanda crescente di energia, inoltre è caratterizzata da sprechi e cali di potenza, dovuti all'obsolescenza tecnologica. L'introduzione della generazione distribuita comporterà di necessità di trasmissione con nuovi standard. In particolare saranno necessari protocolli per la comunicazione ed il controllo dei dispositivi di generazione e, più in generale, di tutte le apparecchiature elettriche presenti.

In tale contesto assumeranno particolare importanza micro-reti intelligenti (*smart grid*), in grado di operare in isola (ad esempio in caso di *black-out*) o in comunicazione con la rete nazionale.

Le micro-reti intelligenti dovrebbero garantire una migliore affidabilità, sicurezza e capacità di gestione, contribuendo a ridurre il livello di criticità delle reti di trasmissione, evitando inutili sovradimensionamenti nella generazione concentrata di potenza e consentendo configurazioni di tipo cogenerativo-trigenerativo favorite proprio dalla piccola taglia e dall'autonomia delle micro-reti stesse.

#### *Impiego di sistemi di generazione altamente efficienti dal punto vista termodinamico*

I nuovi sistemi energetici devono ovviamente prevedere l'impiego di tecnologie in grado di minimizzare il consumo di energia primaria a parità di energia finale resa all'utenza. Ciò è reso possibile grazie all'adozione di macchine di conversione energetica ad alta efficienza e alla generazione di più forme di energia in maniera combinata (cogenerazione e trigenerazione). Entrambe le strategie sono applicabili a sistemi energetici basati su fonti fossili o su fonti rinnovabili e in sistemi a generazione concentrata o a generazione distribuita. Tuttavia, come ribadito più volte, le dimensioni delle utenze termiche rendono le applicazioni della cogenerazione e trigenerazione vicine a quelle tipiche della generazione distribuita.

Nella valutazione delle prestazioni dei sistemi energetici andrebbero considerati però, oltre ai rendimenti di primo principio, anche altri aspetti termodinamici legati alla qualità dell'energia impiegata (rendimento di secondo principio, efficienza energetica ecc). Tali considerazioni implicano di estendere l'analisi dell'efficienza all'intera catena energetica: dalla generazione, alla distribuzione allo stoccaggio, all'uso finale di energia.

In tale direzione, ad esempio, andrebbero scoraggiati gli usi elettrici finalizzati alla climatizzazione e alla produzione di acqua calda sanitaria, andrebbero promossi gli usi di tutti i vettori energetici di scarto e andrebbero suggeriti sistemi a "bassa" temperatura per il riscaldamento e ad "alta" temperatura per il raffrescamento degli ambienti. Tali aspetti dovrebbero essere in qualche modo computati in sede di pianificazione/valutazione di sistemi energetici innovativi.

In tale senso sono state analizzate alcune tecnologie analizzate (cogenerazione (trigenerazione), generazione distribuita, micro-co/tri-generazione distribuita e i relativi componenti: celle a combustibile, motori a combustione interna, motori a combustione esterna, microturbine) e per ciascuna è stata fatta un'analisi sui seguenti punti: descrizione generale, peculiarità tecniche, diffusione, costi associati, applicabilità e prospettive future.

Nella Tabella 62 si riporta una comparazione sinottica delle diverse tecnologie analizzate, che vengono valutate sotto il profilo dei costi e, in generale, dell'applicabilità all'interno dei sistemi energetici urbani.

#### *Stoccaggio/accumulo*

I sistemi di accumulo rivestono particolare importanza sia per il corretto funzionamento della cogenerazione sia per la penetrazione delle fonti rinnovabili.

In riferimento agli accumuli termici, sono stati oggetto di ricerca negli ultimi anni sia gli stoccaggi stagionali, quindi di grandi dimensioni e applicabili alla scala del distretto, sia gli stoccaggi di piccole dimensioni, i quali sfruttano acqua, suolo, materiali a cambiamento di fase, zeoliti, idruri di metallo.

Tutte queste soluzioni costituiscono delle "batterie termiche" che ci permettono abbinare più correttamente domanda e generazione di calore.



**Tabella 62. Confronto delle diverse tecnologie utilizzate**

| Tecnologia                              | Costi                                               | Applicabilità alla scala urbana                                                    |                                                                                     |                                                                                     |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         |                                                     | Aspetti economici                                                                  | Maturità tecnologica                                                                | Altro                                                                               |
| Solare fotovoltaico                     | 4-7 €/Wp                                            |  |  |  |
| Solare termico                          | 500-1.000 €/m <sup>2</sup>                          |  |  |  |
| Solare ibrido                           | 700-1.000 €/m <sup>2</sup> <sup>(1)</sup>           |  |  |  |
| Solar cooling                           | 4-8 €/W                                             |  |  |  |
| Biomasse                                | 5 €/WeI <sup>(2),(3),(4)</sup><br>0,1 €/kg biomassa |  |  |  |
| Geotermia                               | 1.200 - 2.500 €/kWth.                               |  |  |  |
| Celle a combustibile                    | 2.000 - 6.000 €/kW.                                 |  |  |  |
| Motori a combustione interna            | 1.200 - 6.000 €/kW                                  |  |  |  |
| Motori a combustione esterna (Stirling) | 1.200 3.000 €/kWel                                  |  |  |  |
| Microturbine                            | 1.100-1.200 €/kWel                                  |  |  |  |

(1) Circa 100 Wp/m<sup>2</sup> per fotovoltaico.

(2) Ipotesi di impianto di trattamento termico di tipo cogenerativo ad alta prestazione ambientale.

(3) Solo costi investimento.

(4) Benefici del recupero termico non computati.

Le tecnologie per lo stoccaggio di elettricità sono in corso di evoluzione e si presume che possano essere disponibili sul mercato a prezzi competitivi nel breve-medio termine. Tra queste si segnalano: SMES (stoccaggio magnetico tramite superconduttori), supercapacitori, batterie a flusso d'elettrolita, CAES (stoccaggio dell'energia meccanica tramite aria compressa), FES (volani/rotori sospesi nel vuoto tramite cuscinetti magnetici). Tutte queste soluzioni tecnologiche sono disponibili in una grande varietà di taglie, permettendo la loro applicazione in diversi contesti e a diverse scale. Ulteriori modalità di stoccaggio sono offerte dal settore dell'autotrazione.

### Gestione ottimale degli edifici e delle reti

La riduzione dei consumi di energia e dei picchi di potenza assorbita (soprattutto in estate) in ambito urbano rappresentano oggi una necessità universalmente riconosciuta. A ciò si aggiungono gli effetti conseguenti alla liberalizzazione del mercato dell'energia e alla promozione di impianti per la generazione distribuita, dove i meccanismi di interscambio con la rete assumono estrema importanza. In tale contesto, i sistemi di automazione e controllo possono rappresentare un valido aiuto sia sul lato domanda sia sul lato generazione dell'energia, consentendo di ottimizzare il funzionamento degli edifici e la gestione dei carichi sulle reti di generazione e distribuzione dell'energia.

Tale approccio implica una nuova visione dell'edificio: esso si compone di un involucro costituito da diversi elementi, di impianti per la trasformazione dell'energia (centralizzati, autonomi, basati su diverse fonti di energia ecc) con i relativi terminali e di un sistema di automazione e controllo in grado di gestire ed integrare tutte le tecnologie esistenti, con l'obiettivo di creare le migliori condizioni di comfort possibili a fronte della minore spesa energetica possibile.

I benefici ottenibili con il controllo della domanda non riguardano il solo cliente finale ed il distributore del servizio energetico, ma comportano ricadute di natura più ampia: l'appiattimento della curva di prelievo, ossia il differimento dell'uso degli apparati al di fuori del periodo di picco, consente di evitare l'incremento del parco di generazione e di non dimensionare la rete di distribuzione in funzione delle limitate ore annue di criticità della richiesta.

Per la gestione dei carichi elettrici, tre tipi di azioni risultano interessanti: ridurre il prelievo in condizioni di congestione (*curtailment*), svolgendo quindi un servizio a favore sia della rete che dell'utente, la seconda è

differire i carichi nelle fasce orarie più favorevoli (*rescheduling*), la terza è permettere all'utente di conoscere il consumo e l'assorbimento di potenza delle varie apparecchiature elettriche in tempo reale (*power metering*).

Per la gestione dei carichi termici, oltre ai benefici legati alla corretta aggregazione delle domande, le tecnologie di accumulo possono rappresentare un valido aiuto al fine di aumentare le capacità di modulazione del funzionamento degli impianti rispetto ai profili di carico. Attualmente questi dispositivi presentano dei costi elevati, tuttavia è ragionevole attendere una riduzione sensibile di questi nel corso dei prossimi anni.

Per i futuri paradigmi energetici a scala di distretto sono quindi necessari sistemi di gestione evoluti per il dispacciamento locale dei carichi, che siano in grado di determinare il corretto funzionamento coordinato delle tecnologie.

Lo sviluppo di strumenti di simulazione consente insieme alla rilevazione ed il monitoraggio, una più corretta e consapevole progettazione energetica. In tal senso, sulla base della rassegna di alcuni modelli esistenti è stato possibile mettere in evidenza la necessità e l'importanza di sviluppare un nuovo strumento evoluto e interoperabile di supporto per la progettazione e la valutazione di nuovi sistemi energetici urbani.

I sistemi informativi territoriali, ad esempio, sono utili per l'analisi e la rappresentazione dei dati e, per questo motivo, possono fornire un supporto fondamentale a servizio dei distretti, sia nella pianificazione che nella progettazione e realizzazione di tali soluzioni: in primo luogo identificando le condizioni che possono sfavorirne l'installazione (limiti acustici, di emissione, di spazio, ecc.), in secondo luogo permettendo un mappatura degli specifici usi finali di energia presenti nel sito di progetto, sulla base dei quali ipotizzare, in seguito, le configurazioni impiantistiche. Oltre a questi, altri strumenti possono supportare l'identificazione di strategie di generazione energetica a scala di distretto.

Allo stato attuale i diversi strumenti, già sviluppati, sono stati classificati in funzione degli scopi e dei risultati conseguibili nelle seguenti categorie:

- modelli "geografici", per la valutazione della disponibilità di fonti di energia localmente disponibili, della distribuzione e della morfologia dell'ambiente costruito, della localizzazione di impianti e infrastrutture e per la rappresentazione dinamica di dati e risultati;
- modelli "energetici", per la costruzione della curva di domanda di energia delle diverse utenze e per la generazione di scenari di DG facenti capo a differenti mix tecnologici;
- modelli "di valutazione", per l'analisi di altri aspetti legati alla generazione di energia (valutazione degli effetti ambientali, analisi del ciclo di vita, introduzione di aspetti economico-sociali ecc).

L'analisi dei modelli esistenti ha evidenziato la necessità di integrare tra loro le caratteristiche di tutti le classi evidenziate, tramite lo sviluppo di un nuovo strumento interoperabile di supporto la progettazione di sistemi energetici efficienti a scala di distretto in cui, i diversi moduli implementati possano assolvere sia le funzioni di calcolo che quelle di valutazione nel processo di progettazione.

Tralasciando gli specifici algoritmi per l'elaborazione dei dati all'interno degli strumenti GIS ed i protocolli per l'efficienza energetica nella pianificazione della "crescita intelligente" delle comunità, due elementi fondamentali potrebbero essere proposti per la nuova piattaforma: un modulo per l'analisi preliminare e un modulo per la simulazione dinamica.

Il primo dovrebbe essere finalizzato a fornire indicazioni di massima, sufficientemente affidabili, per la progettazione dei sistemi di generazione distribuita; il secondo dovrebbe consentire la corretta simulazione del sistema in regime dinamico, al fine di testare strategie di gestione, regolazione e controllo.

La strategia proposta per la formulazione del nuovo modello vede come elemento di base il modello DER-CAM (Distributed Energy Resource Customer Adoption Models), generalmente utilizzato per la simulazione di sistemi di generazione e cogenerazione distribuita, corredati da micro-reti e dispositivi di stoccaggio.

Le domande di energia considerate sono: riscaldamento degli ambienti, produzione di acqua calda sanitaria, raffrescamento-refrigerazione, funzionamento di luci e apparecchiature. E' escluso il fabbisogno per usi di cucina. La determinazione delle taglie dei diversi componenti tecnologici e delle strategie di dispacciamento dei carichi è riassunta in un'unica funzione, che rappresenta il costo totale della generazione elettrica e termica, da minimizzare rispetto alle condizioni presenti.

Il secondo passo consiste nell'apportare alcuni miglioramenti e nel rivedere integralmente la schematizzazione di calcolo, al fine di poter risolvere il problema con un ottimizzatore multi-criteri. Si considera, in questo modello, che possano essere acquistati dalle reti rispettivamente i vettori energia elettrica, gas metano, idrogeno, calore e che si possano impiegare combustibili di tipo generico per il funzionamento degli impianti. Si impone che siano soddisfatti i diversi tipi di domanda presso l'utenza finale, suddivisa in questo caso in cinque curve (funzionamento

di luci e apparecchiature, climatizzazione estiva degli edifici, produzione di acqua calda sanitaria, climatizzazione invernale, mobilità<sup>1</sup>), minimizzando il costo dell'energia e gli effetti ambientali (in via preliminare, le emissioni di anidride carbonica e di ossidi di azoto). Viene contemplata la possibilità di produrre più energia elettrica di quella che si consuma (dimensionando il sistema sui carichi termici), purché siano rispettati i vincoli ambientali di emissione imposti ed il massimo numero di ore di funzionamento di ogni tecnologia. Infine si prevede la possibilità di stoccare energia elettrica, termica e idrogeno.

Il modello così evoluto renderebbe possibile una vera e propria ottimizzazione economico ambientale dei distretti energetici, consentendo la messa in atto di importanti sinergie legate all'aggregazione delle domande di energia, all'uso di tecnologie di generazione efficienti, ai meccanismi di inter-scambio con la rete e allo stoccaggio di energia.

### Recupero energetico- funzionale di un edificio ad uso terziario

#### *Analisi stato attuale dell'edificio*

Quanto esposto nei precedenti paragrafi è stato propedeutico all'individuazione, definizione e elaborazione progettuale di due applicazioni dimostrative, volte a diffondere su larga scala le nuove tecnologie, favorendo la creazione di un modello di sviluppo basato su insediamenti in cui un mix di soluzioni tecnologiche consenta di ottimizzare l'interazione tra consumo e generazione locale dell'energia, attraverso la riduzione dei consumi e l'uso delle fonti rinnovabili.

Come prototipi di intervento sono stati identificati due edifici presenti in altrettanti centri di ricerca ENEA a Roma, Casaccia, e nella Cittadella della Ricerca di Brindisi.

Per quanto riguarda l'edificio A2 di Brindisi, sono state previste tutte le attività propedeutiche alle fasi di progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva, volte a verificare la fattibilità di un intervento di risanamento. Per l'edificio del centro Casaccia è stato realizzato un progetto per un impianto di climatizzazione caldo/freddo assistito da fonti rinnovabili (tecnologia solar cooling), che verrà descritto nei prossimi paragrafi.

Lo studio del primo prototipo ha comportato l'analisi dello stato attuale dell'edificio da un punto di vista tecnico e l'elaborazione di proposte (applicate per fasi temporali) volte a risolvere le principali problematiche energetiche: rifunionalizzazione delle aree interne dell'edificio, con conseguente aumento di superfici interne, adeguamento dell'involucro esterno dell'edificio alle esigenze di comfort interno e di miglioramento dei livelli di consumo energetico attraverso l'impiego di alcune delle soluzioni tecnologiche individuate dalla ricognizione. Le scelte architettoniche ed impiantistiche sono state validate attraverso una serie di simulazioni dinamiche che hanno permesso di quantificare il miglioramento del comfort, il risparmio energetico rispetto allo stato attuale e, quindi, anche la valutazione dei tempi di ritorno dell'impegno economico.

Il primo approccio all'edificio è stato di analizzare il sito e di indagare a livello costitutivo, costruttivo ed impiantistico lo stato attuale con particolare riferimento alle strutture orizzontali e verticali, al tipo di infissi e al tipo di impianti presenti.

L'edificio, come si evince dalla planimetria e dalla sua sezione (Figura 136) è di forma pressoché regolare, presentando, però, due altezze differenti, una minima di 6,7 m lungo il lato nord-ovest e l'altra massima di circa 9,6 m lungo il lato sud-est. La superficie utile complessiva risulta circa di 4.300 m<sup>2</sup>.



**Figura 136. Planimetria e sezione trasversale dell'edificio**

Esso si sviluppa orizzontalmente nella direzione Est-Ovest per oltre 160 m, con gli uffici sistemati al primo piano e che affacciano verso Sud. Dalle portefinestre dei singoli uffici si accede a un ballatoio con passerella in struttura

metallica adibita a via di fuga per le emergenze. La parte rivolta a Nord è un ambiente a tutto cielo adibito prevalentemente a laboratori, che sono separati tra loro con dei semplici setti di altezza pari a circa 3 m.

L'edificio mostra seri problemi dovuti al surriscaldamento estivo, a causa delle ampie superfici vetrate esposte a Sud, in particolare:

- in corrispondenza del lucernario posto a raccordo tra la copertura della zona uffici e quella della zona laboratori, con la funzione di illuminare naturalmente la zona laboratori.
- in corrispondenza delle facciate degli uffici, interamente vetrate.

L'esito dell'indagine è sintetizzato in Tabella 63.

**Tabella 63. Trasmissione termica dello stato attuale**

| Tipologia                                                                             | W/m <sup>2</sup> K |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Trasmissione termica media delle strutture opache verticali                           | 1,046              |
| Trasmissione termica media delle strutture opache orizzontali (copertura piana)       | 0,556              |
| Trasmissione termica media delle strutture opache orizzontali (copertura inclinata)   | 0,755              |
| Trasmissione termica media delle strutture opache orizzontali (calpestio piano terra) | 0,538              |
| Trasmissione termica media delle chiusure trasparenti                                 | 5,680              |
| Trasmissione termica media delle chiusure trasparenti del primo piano                 | 1,00               |

Nella tabella compaiono due valori di trasmissione termica relativamente alle chiusure trasparenti, dal momento che gli infissi al primo piano e per tutto il prospetto sud-est sono stati sostituiti con altri la cui trasmissione termica, notevolmente più bassa, è pari al valore sopra riportato.

**Tabella 64 . Limiti imposti da Gennaio 2010 - D. Lgs 311/06**

|                                                                            |              |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Zona Climatica                                                             | C            |
| Periodo di riscaldamento                                                   | 5/11 – 31/03 |
| Gradi giorno                                                               | 1083         |
| S/V                                                                        | 0,52         |
| <b>Limite trasmissione termica strutture opache, W/m<sup>2</sup>K</b>      |              |
| Pareti verticali                                                           | 0,40         |
| Coperture                                                                  | 0,38         |
| Pavimenti contro terra                                                     | 0,42         |
| <b>Limite trasmissione termica strutture trasparenti, W/m<sup>2</sup>K</b> |              |
| Chiusure trasparenti                                                       | 2,6          |
| <b>Fabbisogno limite annuo di energia primaria, kWh/m<sup>3</sup>anno</b>  | <b>8,96</b>  |

L'edificio si presenta con valori di trasmissione termica delle chiusure orizzontali e verticali notevolmente superiori ai "valori limite" (indicati dalla normativa vigente e riportati nella Tabella 64).

E' stata effettuata, dunque, una dettagliata analisi delle principali caratteristiche termofisiche delle strutture e degli impianti allo stato attuale (struttura portante verticale, struttura portante orizzontale, ponti termici, prestazioni apparecchi, ecc.). Con i dati raccolti si è costruito un modello su cui sono state eseguite delle simulazioni (su un arco temporale di un anno e con il codice TRNSYS) tenendo conto sia delle condizioni climatiche del sito (temperatura, umidità relativa, radiazione solare, direzione e velocità del vento) che delle specifiche abitative dell'edificio (numero di presenze, il livello di attività delle persone, punti luce ed apparecchiature accese, ecc.).

Nella Tabella 65 sono riportati i valori relativi ai consumi per il riscaldamento ed il condizionamento (differenziati per Fabbisogno Termico Annuo - F.T.A. e Fabbisogno di Energia Primaria - F.E.P.) ed i costi relativi, risulta evidente dal dato corrispondente al F.E.P. (pari a 98,82 kWh/mq) di quanto poco efficiente sia lo stato dell'edificio in esame.

**Tabella 65. Fabbisogno Termico Annuo (F.T.A.), Fabbisogno di Energia Primaria (F.E.P.) e costi relativi ai consumi per riscaldamento e condizionamento**

|               | F.T.A.<br>riscaldamento<br>[kWh/mq] | F.T.A.<br>condizionamento<br>[kWh/mq] | F.E.P.<br>riscaldamento<br>[kWh/mq] | F.E.P.<br>condizionamento<br>[kWh/mq] | F.T.A.<br>totale<br>[kWh/mq] | F.E.P.<br>totale<br>[kWh/mq] | Costo Energia Termica<br>per riscaldamento<br>[€/anno] | Costo Energia Termica<br>per condizionamento<br>[€/anno] | Costo<br>totale<br>Energia<br>[€/anno] |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Stato Attuale | 37,65                               | 32,61                                 | 47,07                               | 51,75                                 | 70,26                        | 98,82                        | 14.561,91                                              | 17.499,89                                                | 32.061,81                              |

#### Proposta di intervento

A valle di questo studio preliminare è stata avviata una collaborazione con lo studio di architettura

Modostudio, che ha condotto la progettazione architettonica, strutturale e la pianificazione delle lavorazioni. Questo studio è stato realizzato al fine di individuare i possibili interventi per:

- adeguare l'involucro esterno dell'edificio alle esigenze di comfort interno e di miglioramento dei livelli di consumo energetico tenendo in debito conto le indicazioni tecniche fornite dai tecnici Enea al fine di individuare le migliori soluzioni;
- aumentare le superfici interne tramite la creazione di soppalchi ad uso ufficio;
- rifunzionalizzare le aree interne all'edificio tenendo in debita considerazione le esigenze attuali dovute ad esistenti strutture di ricerca amovibili.

L'intervento proposto tende a risolvere i problemi sopra citati tramite una serie di azioni da attuare per fasi temporali:

|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Riduzione carico termico o miglioramento comfort ambientale interno | Rivestimento con un cappotto costituito da pannelli isolanti in polistirene e grafite fissati sulla parete stessa e poi schermati da una pannellatura in lamiera stirata fissata alla parete esistente con una sottostruttura in acciaio zincato                                                                                                                        |
|                                                                     | Al primo livello sul lato sud vengono posizionati al bordo esterno della passerella che collega tutti gli uffici verso l'esterno tra di loro una serie di lamelle frangisole verticali posizionate lungo l'asse nord-ovest sud-est al fine consentire il passaggio di luce indiretta ma di impedire il passaggio dei raggi solari nelle ore più calde della giornata    |
| Ottimizzazione illuminazione                                        | Creazione di lucernari posizionati a pavimento del corridoio del primo livello consentono un incremento della illuminazione naturale dei grandi corridoi posti a piano terra                                                                                                                                                                                            |
|                                                                     | Sostituzione degli attuali portoni ciechi con portoni vetrati che garantiscono una maggiore luminosità agli ambiente ed una migliore vivibilità consentendo ai ricercatori di poter lavorare in uno spazio con un contatto visivo verso l'esterno                                                                                                                       |
| Integrazione fonti rinnovabili                                      | Realizzazione di un sistema di aria primaria che dal piano seminterrato attraverso il pavimento galleggiante del piano terra affluisce ai laboratori a doppia altezza, un sistema di pannelli radianti a soffitto ed un sistema di ripresa canalizzato garantiscono la migliore climatizzazione. Le altre aree del fabbricato mantengono il sistema a fancoil esistente |
|                                                                     | Posizionamento sul tetto inclinato di una serie di pannelli fotovoltaici che garantiscono una congrua produzione di energia elettrica                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ottimizzazione lay-out interno                                      | Posizionamento sul tetto inclinato di una serie di pannelli termici che assistono un sistema di climatizzazione ad assorbimento.                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                     | Creazione nella parte nord degli atri di sale meeting e conferenza                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                     | Realizzazione soppalchi che aumentano e aree a disposizione dei ricercatori e creano zone coperte destinate ad ospitare apparecchiatura di precisione                                                                                                                                                                                                                   |

Sulla base delle proposte fatte dagli architetti sono state ripetute alcune simulazioni sul modello dell'edificio modificato e i risultati della variazione di consumo dell'edificio possono evidenziarsi nella penultima colonna della Tabella 66.

**Tabella 66. Risultati delle simulazioni sul modello dell'edificio modificato**

|                       | EnDem_H<br>kWh/a | EnDem_C<br>kWh/a | FEP_H<br>kWh/a | FEP_C<br>kWh/a | FEP_H<br>kWh/m <sup>3</sup> a | FEP_C<br>kWh/m <sup>3</sup> a |
|-----------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Stato attuale         | 2.223,900        | 209,200          | 286,206        | 287,923        | 10,22                         | 10,32                         |
| Interventi necessari  | 180,800          | 170,600          | 165,741        | 81,587         | 5,94                          | 5,61                          |
| Ecobuilding           | 113,200          | 77,100           | 102,676        | 29,669         | 3,68                          | 2,92                          |
| Ecobuilding + PV      | 113,200          | 77,100           | 60,109         | 287,923        | 2,92                          | 2,16                          |
| Ecobuilding + PV + SC | 113,200          | 77,100           | 32,253         | 81,587         | 1,92                          | 1,06                          |

*PV : impianto fotovoltaico, SC: impianto di solar cooling*

Dai risultati espressi in Tabella 66 si vede come l'intervento "Ecobuilding + PV + SC", permette di ridurre in maniera significativa il consumo dell'edificio portando lo stesso da una classe E (FEP= 10,22 kWh/m<sup>3</sup>) ad una classe A+ (FEP=1,92 kWh/m<sup>3</sup>). A proposito dei valori ora espressi si vuole sottolineare che per gli edifici ad uso terziario non esiste una classificazione ufficiale, i valori qui espressi derivano da determinazioni di letteratura, gli unici valori di riferimento per edifici di questa tipologia sono : FEP<sub>lim</sub>= 7,12 kWh/m<sup>3</sup> e limite classe A = 3,56 kWh/m<sup>3</sup>.

L'attività ha fornito inoltre come risultati: disegni e grafici contenenti tutte le informazioni necessarie alla piena comprensione dell'intervento, modello tridimensionale (su PC) del progetto di cui si riportano due immagini in figura, produzione di viste fotorealistiche interne ed esterne delle varie proposte progettuali, quadro economico, plastico di stralcio di fabbricato in scala 1:50 con esecuzione di particolari architettonici per la piena comprensibilità dell'edificio, video in formato PAL risoluzione 720 x 576 (25 fpm) del modello rendering.



**Figura 137. Viste fotorealistiche (esterno) dell'intervento proposto a Brindisi**



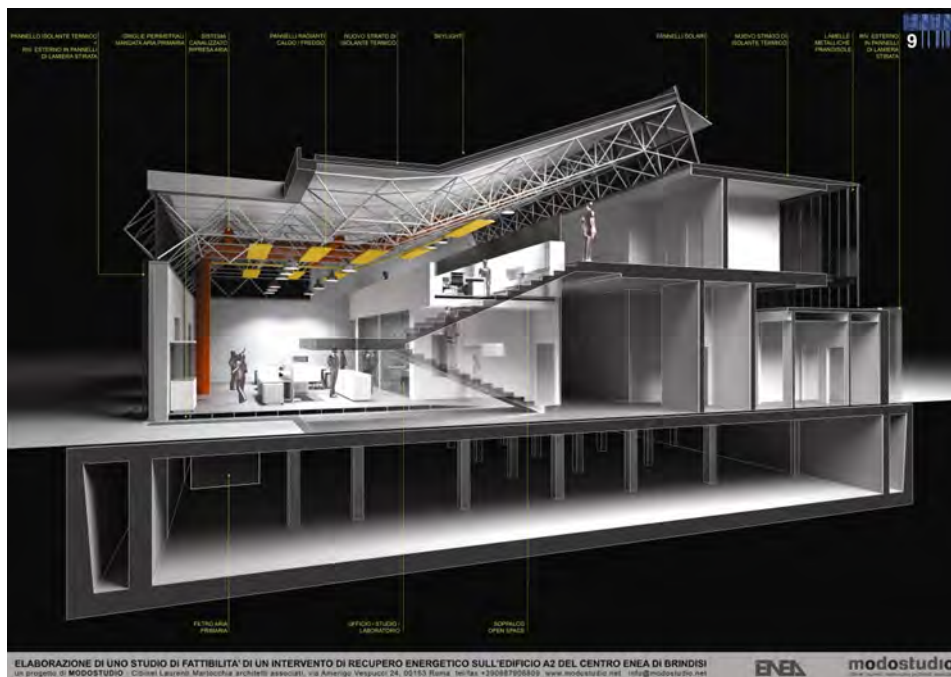


**Figura 138. Vista foto realistica (interno) dell'intervento proposto**

**D. Sviluppo di un ambiente integrato per la progettazione degli interventi di efficientamento**

(Organi esecutori: ENEA, UNIROMA, Università di Palermo, Università. del Salento, POLIMI, Università RomaTRE)

Come già accennato nei paragrafi precedenti il vantaggio da parte di ente pubblico (sia esso un'amministrazione pubblica o un ente di ricerca) di costituire una ESCo mista pubblico-privata consiste nella possibilità di sfruttare il proprio know-how. Nel caso di un ente locale (Comune, Provincia, Regione) tale know-how è rappresentato da un'accurata conoscenza del territorio e delle sue necessità e potenzialità, che può indirizzare e facilitare le attività della società mista. Nel caso di un ente di ricerca il know how è rappresentato dalla conoscenza delle tecnologie già affermate, dallo sviluppo e promozione di altre non ancora diffuse.

In tal senso ENEA si è fatta promotore dello sviluppo di un ambiente integrato di progettazione di interventi di riqualificazione energetica, ODESSE - Optimal DESign for Smart Energy . Tale scelta è nata dalla consapevolezza che per realizzare interventi energeticamente efficaci con l'integrazione di fonti rinnovabili, ovvero per progettare eco-buildings, e in prospettiva distretti energetici, ci si scontra con alcuni problemi di fondo:

- inefficacia degli approcci stazionari quando i sistemi da progettare assumono un consistente grado di complessità;
- mancanza di una tecnologia contenitore dove è possibile analizzare nello stesso momento le interazioni tra edifici, sistemi di generazione dell'energia, utenze termoelettriche variabili, condizioni climatiche variabili, presenza di fonti rinnovabili, problematiche di vincoli prestazionali, valutazioni di carattere normativo ed economico-finanziario.

Nel primo caso, con la progettazione stazionaria non si riesce a valutare con accuratezza le ore lavoro delle varie macchine che compongono il mix energetico e come questo si riflette nelle situazioni di criticità in quanto la progettazione è fatta esclusivamente su alcuni periodi di riferimento maggiormente sollecitati. Questo approccio dà quindi scarsa possibilità di valutare gli aspetti economici degli interventi e le criticità di gestione.

Nel secondo caso il fatto di disporre di tali tecnologie di calcolo soltanto in forma separata, ne limita fortemente sia la valutazione delle interazioni e sia la possibilità di creare un circuito di ottimizzazione progressiva del progetto limitando il calcolo a pochi casi fondati essenzialmente sulla esperienza del progettista.

ODESSE è uno strumento di modellazione dinamica che consente di stimare la fattibilità tecnico-economica di un intervento per la riqualificazione energetica di un edificio o di un quartiere esistente e vuole essere un supporto determinante nella progettazione di edifici ecosostenibili.

L'approccio metodologico alle origini di una piattaforma complessa come ODESSE deriva dalla visione integrata del "distretto energetico", un'area o insediamento (residenziale, non residenziale, industriale) che costituisce un

sistema energetico, la cui efficienza può essere migliorata con un mix di soluzioni tecnologiche che ottimizzino l'interazione tra consumi e generazione locale dell'energia.

Per la gestione ottimale integrata del sistema, è necessario tenere conto di diversi fattori: i consumi delle singole utenze, la produzione locale di energia con l'eventuale integrazione a fonti rinnovabili. Questo comporta una progettazione mirata e contestualizzata, ma anche la definizione di nuove ed organiche relazioni in tutta la filiera, dall'utente, ai produttori, all'integratore, al gestore, al finanziatore, alla pubblica amministrazione, al mondo della ricerca. La piattaforma software ODESSE è in grado di simulare dinamicamente l'esercizio di fonti energetiche funzionanti in generazione distribuita al servizio d'utenze reali (edifici) e con condizioni tariffarie, fiscali e normative reali. Il progettista può quindi valutare l'integrazione di più tecnologie ad alta efficienza energetica (fonti rinnovabili, cogenerazione, solar cooling, etc) in funzione delle caratteristiche meteo del sito e le richieste del contesto territoriale, in modo da aumentarne la sostenibilità e la competitività. La piattaforma ODESSE è costituita da alcuni moduli fondamentali:

- interfaccia utente, utilizzata per inserire i dati di input utili alla simulazione (le caratteristiche fisiche, strutturali e geometriche degli edifici in esame), scegliere il mix e la taglia del sistema di poligenerazione (incluse le fonti rinnovabili), impostare le variabili che si vuole monitorare. L'interfaccia è stata studiata e sviluppata secondo criteri di semplicità, chiarezza e intuitività in modo da semplificarne l'utilizzo anche ad un utente poco esperto di simulazione dinamica;
- data base materiali per opere civili, costruito in conformità alle norme UNI, ampliato con biomateriali innovativi;
- pre-processore, calcola i parametri termici fondamentali dell'edificio, i guadagni interni dovuti al profilo di utilizzo degli ambienti e delle apparecchiature elettriche (PC, illuminazione artificiale), ponti termici;
- simulatore dinamico, motore di calcolo per valutare il carico termico orario, il fabbisogno annuo di energia primaria (FEP) delle sorgenti distribuite e i costi annui per la climatizzazione invernale ed estiva in funzione dell'irraggiamento solare e della temperatura esterna. Per il calcolo della radiazione oraria sull'involucro e la temperatura oraria del sito ODESSE utilizza un sistema di calcolo sviluppato da ENEA (Neural Weather Generator - NWG) che a differenza dei modelli esistenti in cui i dati climatici sono sostanzialmente letti da un database che riporta valori storici di varie località, si basa sulla previsione di tali valori attraverso reti neurali evolutive (ENN);
- post-processore, che fornisce i risultati della simulazione dinamica, espressi in valori orari, e rielaborati sotto forma di diagrammi o indicatori prestazionali del sistema edificio impianto. (es. fabbisogno energetico per il riscaldamento e raffrescamento, fabbisogno annuo netto di energia elettrica, costo totale annuo di combustibile, costo energia elettrica prelevata dalla rete, guadagno annuo per energia elettrica da fonte rinnovabile ceduta alla rete, ecc);

Allo sviluppo dei vari modelli matematici relativi alle sorgenti energetiche e al sistema di distribuzione hanno contribuito attivamente varie università italiane (Roma, Milano, Padova, Palermo, Torino, Lecce) creando un network di riferimento verso cui desideriamo orientare anche produttori di componenti e operatori del settore (progettisti, costruttori, ESCo, ecc.) e che di per se stesso costituisce un risultato di valore.

L'interfaccia provvede a coniugare due aspetti spesso in contrasto tra loro: è semplice da utilizzare per l'utente, ma allo stesso tempo è completa dal punto di vista dei dati richiesti per la caratterizzazione dell'edificio (dati di localizzazione geografica, dati relativi alla composizione delle pareti verticali e orizzontali, diagramma di Glaser, specifiche sulle finestre, ecc.) e degli impianti.

E' stata sviluppata in Java<sup>6</sup>, ciò la rende multiplatforma, ovvero in pratica funziona su qualsiasi calcolatore a prescindere dal sistema operativo utilizzato.

---

<sup>6</sup> Per una descrizione dettagliata si rimanda al rapporto: " Sviluppo dell'ambiente di progettazione ODESSE", I. Bertini, F. Ceravolo, M. De Felice, B. Di Pietra, S. Pizzuti, G. Puglisi, F. Margiotta, ENEA



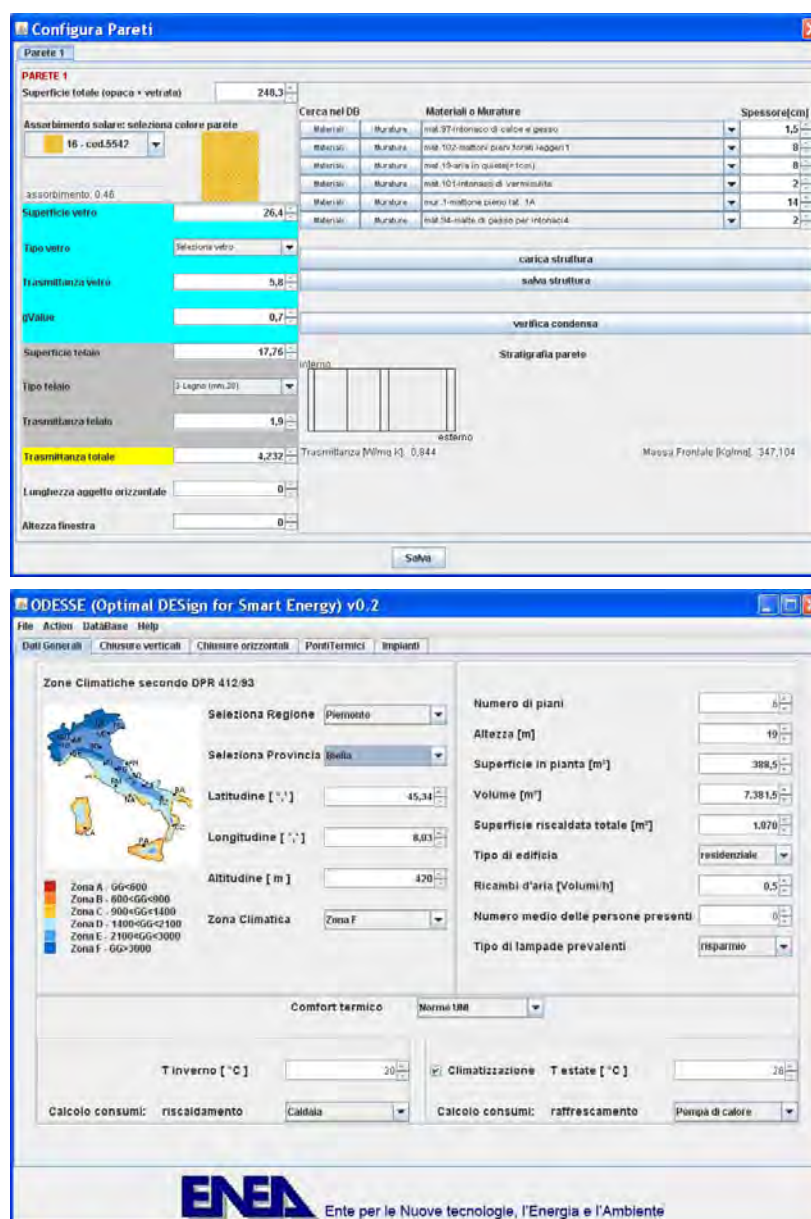


Figura 139. Schermata dell'interfaccia

Nel corso della realizzazione della presente piattaforma è stato sviluppato un modello per la determinazione di dati climatici (NWG), in particolare la temperatura ambientale e la radiazione solare, attraverso l'uso di tecniche di 'soft computing'. In particolare sono state utilizzate reti neurali, algoritmi evolutivi e sistemi 'fuzzy' per stimare i valori di temperatura mensili e giornalieri in specifiche località, dove ovviamente questo dato non viene rilevato attraverso centraline di misura, ed i modelli migliori sono stati utilizzati per la stima del carico termico dell'edificio.

Gli algoritmi di calcolo esistenti si basano sulla lettura di valori climatici da database ed è necessario avere a disposizione una quantità di dati molto grande se si vuole avere una efficace precisione; l'errore di calcolo, dunque, è dovuto alla somma di due componenti: la prima è relativa all'algoritmo di estrazione dei dati orari che ovviamente non è esatto; la seconda è relativa al fatto che possono non essere disponibili i valori di una precisa località e quindi si deve partire dai dati della località più vicina.

L'approccio proposto cerca di ridurre la seconda componente di errore stimando la temperatura media giornaliera attraverso reti neurali (Artificial Neural Network -ANN). Le ANN sono state addestrate con i valori delle medie mensili di radiazione e temperatura, disponibili in molte aree.

In particolare le reti hanno 4 ingressi che sono le coordinate geografiche (latitudine, longitudine e altitudine) della località ed il giorno di riferimento del dato che si vuole ottenere.

Una volta addestrate le reti, è possibile ricavare la stima dei dati giornalieri per qualsiasi località senza utilizzare nessun database. Dai dati giornalieri è poi possibile ottenere i valori orari con un errore potenzialmente minore.

Questo modello di calcolo può essere applicato in tutti i quei casi dove è richiesta la conoscenza di dati di irraggiamento e temperatura, come per la progettazione di impianti fotovoltaici, nei campi riguardanti il solare termico, termodinamico ed in particolare è stato integrato in una piattaforma dinamica per la progettazione di edifici.

Nella maggior parte delle stazioni meteo sono disponibili dati climatici corrispondenti alle medie mensili, che sono valori giornalieri corrispondenti al giorno medio del mese. Da questi dati, per ricavare i valori giornalieri è stato sviluppato un modello basato sulle reti neurali artificiali (ANN). In particolare sono stati confrontati i seguenti approcci :

- tecnica del “*Nearest Neighbor* (NN)”, che consiste nell’assegnare il dato di ogni località, teoricamente sconosciuta, con quella della località più vicina nel training set;
- sistemi cooperativi (ensembling) che combinano modelli neurali e NN tramite logica sfumata;
- le ANN con algoritmo di addestramento back-propagation (BPNN);
- modelli di reti neurali basate su algoritmi d’addestramento evolutivi (ENN);
- reti neurali con modelli di addestramento ibrido (BPGANN).

I dati di training e testing sono stati presi dall’atlante solare sviluppato dall’ENEA e sono disponibili sia in forma cartacea che digitale presso l’indirizzo <http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/Index.htm>

L’intero sistema, il Neural Weather Generator (NWG), è stato implementato in simulink.

I risultati sono stati validati sia facendo un confronto con i dati reali che con altri software di simulazione come Trnsys.

Gli input per tutti i modelli neurali sono sempre :

- latitudine
- longitudine
- altitudine
- giorno dell’anno

poiché tali dati risultano essere la massima informazione sempre disponibile per ogni località.

Per il modello della radiazione solare in fase di addestramento sono stati presi i dati corrispondenti alle 109 province italiane più Aosta (la Valle d’Aosta non ha province). Per ogni provincia si hanno a disposizione 12 dati (le medie mensili). Per il testing sono state prese le medie mensili corrispondenti ad alcuni dei comuni italiani: ne sono stati scelti 50 in tutta l’Italia in modo casuale. Per la radiazione si sono ottenuti risultati ottimi utilizzando un modello neurale globale per tutta l’Italia. Nella Tabella 67 si riportano i valori percentuali dell’errore con riferimento al codice TRNSYS, che utilizza un algoritmo tradizionale.

**Tabella 67. Codice TRNSYS - Valori percentuali dell’errore con algoritmo tradizionale**

|         | Reale | NWG  | Trnsys | Errore assoluto NWG | Errore assoluto Trnsys | Errore relativo NWG | Errore relativo Trnsys |
|---------|-------|------|--------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| Bolzano | 1280  | 1282 | 1332   | 2                   | 52                     | 0.2%                | 4.1%                   |
| Roma    | 1516  | 1594 | 1309   | 77                  | 208                    | 5.1%                | 13.7%                  |
| Palermo | 1631  | 1735 | 1786   | 103                 | 155                    | 6.3%                | 9.5%                   |
| MEDIA   |       |      |        | 61                  | 138                    | <b>3.9%</b>         | 9.1%                   |

La prima sperimentazione ha riguardato lo sviluppo di una rete neurale BP globale per la modellazione della temperatura su tutto il territorio nazionale, che però non ha fornito risultati soddisfacenti. Si è, dunque, proseguito con lo sviluppo di modelli diversi per differenti aree geografiche. In particolare l’intero Paese è stato partizionato come segue:

|        | Regioni                                     | Training set (località) | Test set (località) |
|--------|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Area1  | V.d'Aosta, Piemonte, Lombardia              | 76                      | 17                  |
| Area2  | TrentinoAA, Veneto, FriuliVG, EmiliaRomagna | 161                     | 18                  |
| Area3  | Liguria, Toscana, Umbria                    | 90                      | 11                  |
| Area4  | Marche, Abruzzo                             | 43                      | 13                  |
| Area5  | Lazio, Campania                             | 71                      | 9                   |
| Area6  | Puglia, Molise                              | 66                      | 8                   |
| Area7  | Basilicata, Calabria                        | 53                      | 6                   |
| Area8  | Sardegna                                    | 36                      | 5                   |
| Area9  | Sicilia                                     | 47                      | 10                  |
| TOTALE | 20                                          | 643                     | 97                  |

Sono stati implementati modelli locali (sotto-modelli) e quindi sono state sperimentate varie strategie per la composizione dei sotto-modelli locali; le strategie testate sono:

- media sui due sotto-modelli (avg2);
- media sui due sotto-modelli + il modello 'globale' della zona (avg3);
- ensembling a regole<sup>7</sup> sui due sotto-modelli (ens2);
- ensembling a regole sui due sotto-modelli + il modello 'globale' della zona (ens3);
- ensembling neurale sui due sotto-modelli + il modello 'globale' della zona (neural\_ens);
- ensembling neurale sui due sotto-modelli + il modello 'globale' della zona + un modello neurale che classifica l'affidabilità del modello 'globale' regionale (ens3\_nc).

L'analisi dei risultati di tutte queste sperimentazioni ha permesso di individuare come migliore il modello costituito da un algoritmo di addestramento ibrido Back-Propagation/Genetico su tre zone climatiche (nord-centro-sud) e due stagioni (estate-inverno) per un totale di sei modelli.

**Tabella 68. Analisi risultati (Reti Neurali BPGA3)**

|                | Avg Err ( $\pm \sigma$ )               | Max Err        | Err < 2.0à C | 95%            |
|----------------|----------------------------------------|----------------|--------------|----------------|
| Nord-Estate    | 0,61 °C ( $\pm$ 0.01)                  | 1,8 °C         | 100%         | 1.4 °C         |
| Nord-Inverno   | 0,8 °C ( $\pm$ 0.01)                   | 3,72 °C        | 95%          | 2°C            |
| Centro-Estate  | 0,73 °C ( $\pm$ 0.02)                  | 2,25 °C        | 98%          | 1.7 °C         |
| Centro-Inverno | 0,83 °C ( $\pm$ 0.02)                  | 2,7 °C         | 95%          | 2 °C           |
| Sud-Estate     | 0,52 °C ( $\pm$ 0.01)                  | 1,7 °C         | 100%         | 1.25 °C        |
| Sud-Inverno    | 0,6 °C ( $\pm$ 0.01)                   | 2,17 °C        | 99%          | 1.35 °C        |
| <b>GLOBALE</b> | <b>0,68 °C (<math>\pm</math> 0.01)</b> | <b>3,72 °C</b> | <b>98%</b>   | <b>1.62 °C</b> |

L'errore medio commesso è di 0,68 °C e il massimo errore commesso è pari a 3,72 °C. Gli effetti migliorativi dell'uso di un tale algoritmo nel calcolo del carico termico degli edifici è stato valutato con la seguente procedura.

Sono stati stimati i dati giornalieri con gli ultimi modelli neurali BPGA3 su un anno intero per la città di Roma, in quanto per un confronto si hanno a disposizione i dati reali giornalieri ed orari di temperatura, e tali valori sono

<sup>7</sup> L'ensembling a regole si basa sull'individuazione delle zone in cui ciascun modello lavora *globalmente* meglio, ovvero intersecando le 'zone di affidabilità' di training e testing in modo tale da applicare sempre le stesse regole.

stati usati per la stima del carico termico invernale. In tale calcolo la componente della radiazione solare è stata posta a zero così da osservare esclusivamente l'effetto della temperatura. Tali test sono stati eseguiti simulando edifici con 4 diversi rapporti superficie-volume (0,6, 0,5, 0,4, 0,28) e 3 diverse percentuali di finestre (15%, 30%, 60%), per un totale di 12 tipologie di edifici.

Su tali edifici abbiamo confrontato i risultati ottenuti usando come input per il carico termico i dati reali, le stime giornaliere del modello neurale e le stime del software Trnsys che per tutti giorni del mese assegna lo stesso valore di temperatura. Nella Tabella 69 si riportano i risultati di tale analisi.

**Tabella 69. Risultati analisi**

|              | Reale<br>(kWh) | Neurale<br>(kWh) | Mensile<br>(kWh) | Err ass<br>neurale | Err ass<br>mensile | Err rel<br>neurale | Err rel<br>mensile |
|--------------|----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Building1    | 21719          | 20975            | 20810            | 744                | 909                | 0,034              | 0,042              |
| Building2    | 28012          | 27086            | 26841            | 926                | 1171               | 0,033              | 0,042              |
| Building3    | 38502          | 37250            | 36900            | 1251               | 1601               | 0,032              | 0,042              |
| Building4    | 37315          | 36020            | 35745            | 1295               | 1569               | 0,035              | 0,042              |
| Building5    | 46837          | 45274            | 44878            | 1563               | 1959               | 0,033              | 0,042              |
| Building6    | 64251          | 62135            | 61572            | 2116               | 2679               | 0,033              | 0,042              |
| Building7    | 69954          | 67510            | 66923            | 2444               | 3030               | 0,035              | 0,043              |
| Building8    | 88530          | 85526            | 84739            | 3004               | 3791               | 0,034              | 0,043              |
| Building9    | 120874         | 116831           | 115750           | 4042               | 5124               | 0,033              | 0,042              |
| Building10   | 297469         | 286778           | 284217           | 10691              | 13252              | 0,036              | 0,045              |
| Building11   | 330878         | 319385           | 316655           | 11493              | 14223              | 0,034              | 0,043              |
| Building12   | 396381         | 382988           | 379534           | 13392              | 16847              | 0,033              | 0,043              |
| <b>MEDIA</b> | <b>128394</b>  | <b>123980</b>    | <b>122880</b>    | <b>4413</b>        | <b>5513</b>        | <b>0,034</b>       | <b>0,0425</b>      |

Da tali risultati si può notare che l'errore di stima viene migliorato in termini assoluti mediamente di oltre 1000Kwh ed in termini relativi l'errore passa dal 4,25% al 3,4%, ovvero vi è un abbattimento dell'errore del 20%. Tale modello è stato implementato nella piattaforma ODESSE.

Per quanto riguarda la parte impiantistica, come già detto, una serie di modelli sono stati sviluppati da Università che hanno collaborato strettamente con ENEA, alcuni altri sono stati sviluppati direttamente da ENEA. Nel corso del prossimo anno di attività si procederà all'integrazione software dei modelli che sono stati predisposti e ad una campagna di sperimentazione per la loro definitiva validazione.

## E. Acquisizione degli strumenti per la realizzazione dimostrativa

*(Organi esecutori: ENEA, Università di Palermo, Politecnico Milano)*

### *Caratteristiche generali delle tecnologie solar-cooling*

Come anticipato nella premessa e nel paragrafo C del presente capitolo, nelle intenzioni del programma relativo al presente tema di ricerca si riflette il desiderio di creare applicazioni reali che diano dimostrazione delle prestazioni di promettenti tecnologie per la razionalizzazione dei consumi energetici. La presente attività mira alla validazione e promozione di sistemi efficienti per la climatizzazione del settore civile, responsabile del 30% dei consumi nazionali e del sovraccarico estivo della rete elettrica dovuto alla domanda di condizionamento; i cicli frigoriferi ad assorbimento, infatti, permettono di sostituire energia elettrica con energia termica, ottenibile da sistemi solari o da cascami termici.

A tale proposito si è realizzato il progetto<sup>8</sup> per l'installazione di un sistema di climatizzazione caldo/freddo basato sulla tecnologia del solar cooling. A seguito della fase di progettazione si prosegue con la definizione degli aspetti contrattuali per l'acquisizione dei materiali e apparecchi, e per la predisposizione dei lavori di installazione.

<sup>8</sup> Per maggiori dettagli si rimanda al deliverable: "Studio di fattibilità tecnico-economica: riqualificazione dell'edificio F51 Centro Ricerche ENEA della Casaccia", I. Bertini, M. Citterio, F. Margiotta, B. Di Pietra (ENEA).

Il sistema di climatizzazione proposto (Figura 140) è composto principalmente da un campo solare composto da pannelli a tubi evacuati, da due accumuli, uno per il fluido termovettore solare e l'altro per l'acqua calda o fredda verso l'utenza, da una macchina ad assorbimento monostadio ad Acqua-Bromuro di Litio, da una torre di raffreddamento per lo smaltimento del calore della macchina frigorifera e da una caldaia di reintegro che sopperisce alla mancanza eventuale di radiazione solare.

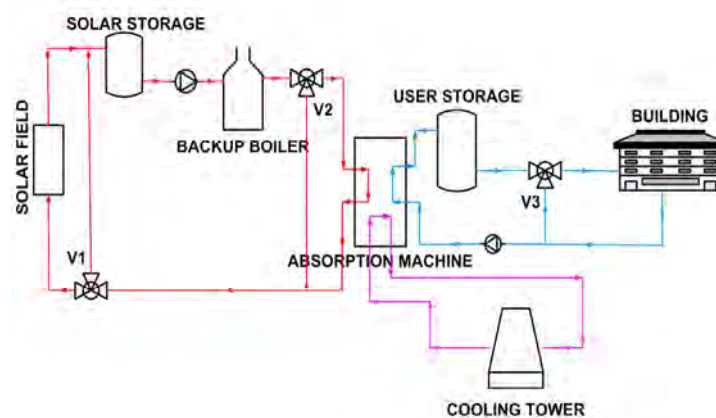


Figura 140. Schema funzionale semplificato

Mentre nel raffrescamento estivo il freddo necessario viene creato dal ciclo frigorifero della macchina ad assorbimento, azionata principalmente dal calore fornito dal campo solare, in quella di riscaldamento invernale la stessa macchina opera esclusivamente come trasferitore di calore verso l'edificio. I vantaggi dell'architettura consistono in un risparmio di energia primaria valutabile intorno al 50% rispetto ad un analogo impianto tradizionale, composto da una caldaia ad alto rendimento e da un condizionatore elettrico a compressione di pari potenza, assenza del rumore dei compressori e dall'impiego di fluidi non climalteranti.

- In tal senso è stata eseguita uno studio sullo stato dell'arte della tecnologie e in particolare delle potenzialità di sviluppo della climatizzazione ad impianti solare, nella consapevolezza che le specifiche di tale tecnologie si adattano bene alle caratteristiche geografiche dell'Italia e dei Paesi del bacino mediterraneo, e che quindi esso può rappresentare un buon modello da industrializzare ed replicare in vari casi simili;
- come è noto, in Italia la quasi totalità dei condizionatori autonomi utilizza l'energia elettrica, con un mercato in forte crescita che ha portato allo spostamento dei picchi di potenza nel periodo estivo. Partendo da una tecnologia di produzione del calore ad emissione zero quale è quella solare, è possibile sviluppare ed integrare diverse tecnologie che abbiano come obiettivo la produzione del freddo.
- la climatizzazione solare, opportunamente sviluppata, consente di ottenere considerevoli risparmi energetici rispetto agli impianti convenzionali. Sicuramente, però, per scegliere il sistema e dimensionare l'impianto occorre una simulazione dinamica dell'andamento delle condizioni climatiche interne a un edificio. In futuro è auspicabile lo sviluppo di dispositivi idraulici e sistemi di regolazione per uno sfruttamento ottimale degli apporti solari disponibili.

In particolare, la climatizzazione ad assorbimento è una delle più promettenti tecnologie termiche di climatizzazione perché consente lo sfruttamento dell'energia solare e quindi un risparmio d'energia primaria più o meno alto. Due fattori rendono tale tecnologia interessante: le basse temperature d'esercizio (da 45 °C a 90 °C) e il fatto che il fluido refrigerante usato è l'acqua e questa non crea problemi per l'ambiente.

Le tecnologie prese in considerazione sono le seguenti:

- sistemi interamente solari (autonomi)
- sistemi solari assistiti da una macchina frigorifera a compressione
- sistemi frigoriferi a due effetti, alimentati da collettori solari ad alto rendimento.

Negli edifici, soprattutto in quelli del settore terziario ampiamente vetrati, spesso in estate si manifestano delle spiacevoli condizioni di surriscaldamento che diminuiscono notevolmente il benessere degli occupanti. In questi casi, la climatizzazione, oltre a garantire il necessario ricambio d'aria, assume la funzione di mantenere la temperatura e l'umidità relativa dell'aria interna ad un livello gradevole. Il controllo della temperatura dell'aria si

può ottenere con una sufficiente ventilazione, oppure raffreddando delle superfici termoattive, per esempio, quelle dei solai e dei pavimenti, ma l'umidità relativa si può regolarla solo tramite il condizionamento dell'aria.

La regolazione della temperatura e dell'umidità dell'aria si ottiene normalmente con un impianto di ventilazione combinato con una macchina frigorifera. Le macchine refrigeranti consumano o energia elettrica o termica. Volendo usare l'energia solare per risparmiare energia primaria (gasolio, gas metano, ecc.), si devono impiegare delle macchine termiche. Volendo non solo raffreddare con il sole, ma anche controllare l'umidità dell'aria e quindi il comfort igrotermico, si possono impiegare tecnologie termiche a processi aperti d'assorbimento. Si ha così ciò che si chiama "climatizzazione ad assorbimento" (CAA).

Le macchine frigorifere termiche a singolo effetto hanno normalmente un COP di circa 0,7; lo stesso COP vale anche per le macchine ad assorbimento e per i processi CAA con deumidificatori a rotazione. Il COP delle macchine a doppio effetto è invece di circa 1,1. Le più moderne macchine frigorifere a compressione raggiungono un COP compreso tra 3,5 e 4,5. Per quanto riguarda il rendimento della produzione di corrente elettrica, si può ipotizzare che con 1 kWh di energia primaria si producano circa 0,36 kWh di energia elettrica.

D'altra parte per ottenere un effettivo risparmio d'energia primaria con la climatizzazione solare è necessario scegliere un adeguato sistema di climatizzazione e concretamente valutare la situazione in base ad un bilancio energetico. Tale bilancio va realizzato in maniera accurata per mezzo di una simulazione dinamica dell'andamento giornaliero delle condizioni climatiche all'interno dell'edificio, che evidenzia quelle ore in cui il comfort igrotermico non è garantito. La simulazione deve essere eseguita considerando l'intero sistema costituito dall'edificio, dall'impianto di ventilazione e da quello del collettore solare.

Un risparmio d'energia primaria lo si può ottenere anche con sistemi a doppio effetto e una copertura solare minore. In questo caso, il COP della macchina frigorifera deve essere adeguatamente superiore. Il mercato offre oggi macchine frigorifere ad assorbimento con un COP tra 1,1 e 1,2, ma non ci sono apparecchi con una potenza frigorifera inferiore a 200 kW. Inoltre queste macchine lavorano generalmente con temperature d'esercizio oltre i 150 °C e pertanto si devono utilizzare collettori solari ad alta efficienza che producono queste temperature. Una soluzione interessante sembra essere l'uso di collettori parabolici, che, oltre ad avere un prezzo conveniente, producono anche acqua alla temperatura desiderata e a costi convenienti. L'uso di questi collettori si presta particolarmente in quelle regioni dove la radiazione globale raggiunge valori elevati e la percentuale di luce diretta è alta.

I benefici di tale tecnologia sono:

- **Ridotti consumi di energia elettrica** - Un assorbitore da 70 kW frigoriferi necessita solo di 0,60 kW elettrici. I gruppi di assorbimento necessitano di pochissima energia elettrica se comparati con gruppi tradizionali a compressore. Di conseguenza non sono necessarie costose ed ingombranti centrali di trasformazione elettrica.
- **Silenziosità e durata** - Il funzionamento dei gruppi assorbitori non richiede parti meccaniche in movimento. Essi risultano pertanto silenziosi e privi di vibrazioni. L'assenza di attriti e conseguenti abrasioni meccaniche si traduce in una maggiore durata della macchina.
- **Ridotti costi di manutenzione** - I costi di manutenzione dei gruppi di assorbimento risultano estremamente contenuti, soprattutto se paragonati a quelli dei tradizionali gruppi elettrici.
- **Installazione all'aperto e dimensioni ridotte** - I gruppi di assorbimento non richiedono particolare riparo al coperto, in quanto sono stati studiati per essere installati all'aperto. Nel caso di collocazione al coperto, le dimensioni assai compatte dei gruppi richiedono minimi ingombri.
- **Parzializzazione e controllo modulare** - Per mantenere sempre elevata l'efficienza di funzionamento degli assorbitori è possibile effettuare per i gruppi modulari (più di una unità) un controllo a gradini, parzializzando il funzionamento degli stessi a seconda del carico termico esistente.
- **Risparmio energetico** - Qualora l'acqua di alimentazione venga prodotta da impianti di cogenerazione o da cascami di calore di qualsiasi provenienza, i gruppi di assorbitori possono essere assimilati a veri *recuperatori di energia* e pertanto godere delle agevolazioni previste dalle leggi vigenti.

Volendo valutare la convenienza economica della climatizzazione con processi termici, bisogna considerare due aspetti:



- sostituendo la convenzionale tecnologia frigorifera alimentata con l'energia elettrica con impianti termici, la convenienza economica dipende, da una parte, dal costo della produzione dell'energia termica e, dall'altra, dal costo dell'energia elettrica che si vuole risparmiare;
- alimentare un impianto di climatizzazione, interamente o parzialmente, con l'energia solare, comporta un aumento del costo d'investimento per il costo dell'impianto solare. In compenso però diminuiranno i costi d'esercizio.

Il futuro della tecnologia dipende, soprattutto, dallo sviluppo di dispositivi idraulici semplici, robusti e ben regolabili; occorrono inoltre sistemi di regolazione che garantiscano, in ogni momento, l'ottimale sfruttamento degli apporti solari disponibili e quindi un minimo impiego d'energia primaria.

#### Descrizione dell'intervento sulle edificio F51

L'edificio in esame F51, destinato ad uffici, presenta una forma rettangolare e si articola su due piani, con una superficie complessiva di circa 600 m<sup>2</sup> (Figura 141). Esso si sviluppa orizzontalmente nella direzione Est-Ovest per circa 50 m; l'ingresso principale è posto sul lato Nord. Come prima fase è stata effettuata un'analisi del sito ed una indagine a livello costitutivo, costruttivo ed impiantistico dello stato attuale, con particolare riferimento alle superfici orizzontali e verticali, al tipo di infissi e al tipo di impianti presenti.



**Figura 141. Prospetto nord e sud dell'edificio F51**

Con i dati raccolti è stato costruito un modello di simulazione dinamico (con l'ausilio di un codice di calcolo commerciale, TRNSYS) per calcolare il carico termico dell'edificio e le prestazioni delle macchine attualmente installate, a partire dalla descrizione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro e delle condizioni climatiche del sito (temperatura, umidità relativa, radiazione solare, direzione e velocità del vento).

I risultati dell'analisi sono riportati in Tabella 70.

**Tabella 70. Risultati analisi dei fabbisogni termici e dei costi per l'edificio F51**

|                  | F.T.A.<br>riscaldamento<br>[kWh/mq] | F.T.A.<br>condizionamento<br>[kWh/mq] | F.E.P.<br>riscaldamento<br>[kWh/mq] | F.E.P.<br>condizionamento<br>[kWh/mq] | F.T.A.<br>totale<br>[kWh/mq] | F.E.P.<br>totale<br>[kWh/mq] | Costo Energia Termica<br>per riscaldamento<br>[€/anno] | Costo Energia Termica<br>per condizionamento<br>[€/anno] | Costo<br>totale<br>Energia<br>[€/anno] |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Stato<br>Attuale | 66,15                               | 8,51                                  | 70,00                               | 13,51                                 | 74,67                        | 83,52                        | 4.908,53                                               | 947,67                                                   | 7.795,05                               |

I risultati ottenuti in termini di riduzione dei consumi sono stati incoraggianti e si è, dunque, passati alla fase di progettazione esecutiva per la realizzazione dimostrativa. Durante tale fase sono state apportate alcune modifiche rispetto al progetto originario che riguardano sostanzialmente la tipologia di collettori (a tubi evacuati, anziché parabolici) e la macchina ad assorbimento (H<sub>2</sub>O/LiBr acqua-bromuro di litio, anziché H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub> acqua-ammoniaca).

Infatti, gli esiti ottenuti da un attività di confronto, svolta da ENEA, tra varie architetture per la climatizzazione ad assorbimento (riportati in :*“Multiple parameters simultaneous optimization of solar heating and cooling plant for a non-residential building in Rome”*, conferenza internazionale ISHPC2008) hanno mostrato che, per il clima di Roma, il minimo tempo di ritorno conseguibile in assenza di contributi dello stato, (circa 10 anni) si ottiene con la configurazione con tubi evacuati e macchina a bromuro di litio a singolo effetto.

Di conseguenza è stato realizzato un progetto che vede il collegamento di collettori a tubi evacuati (30 pannelli Kloben, Turco Group, per un totale di 110 m<sup>2</sup>) ad un gruppo Yazaki WFC SC 20 (bromuro di litio a singolo effetto, potenza frigorifera 70 kW) e la distribuzione avviene tramite un sistema di fan coils.

L'impianto è dotato di una serie di sensori per la realizzazione di campagne di monitoraggio per la validazione delle ipotesi fatte.

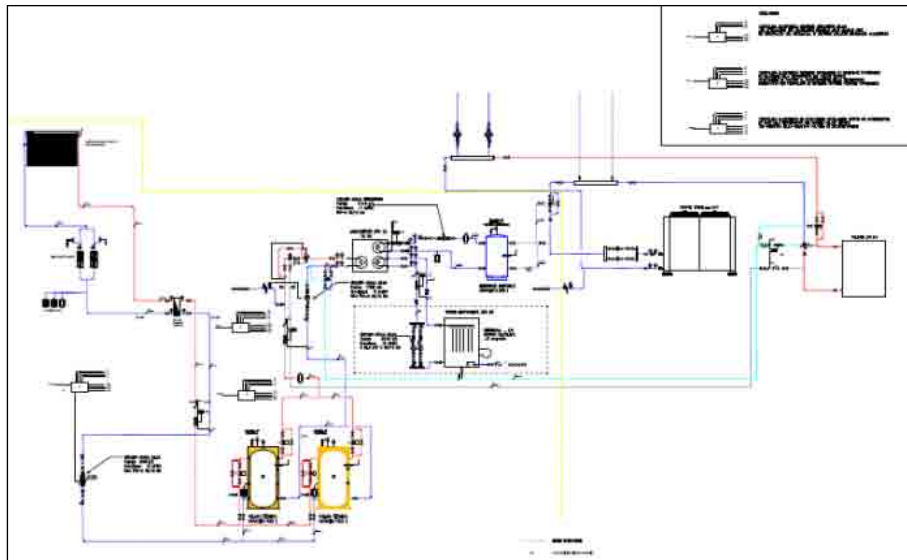


Figura 142. Schema collegamento impianto solar cooling

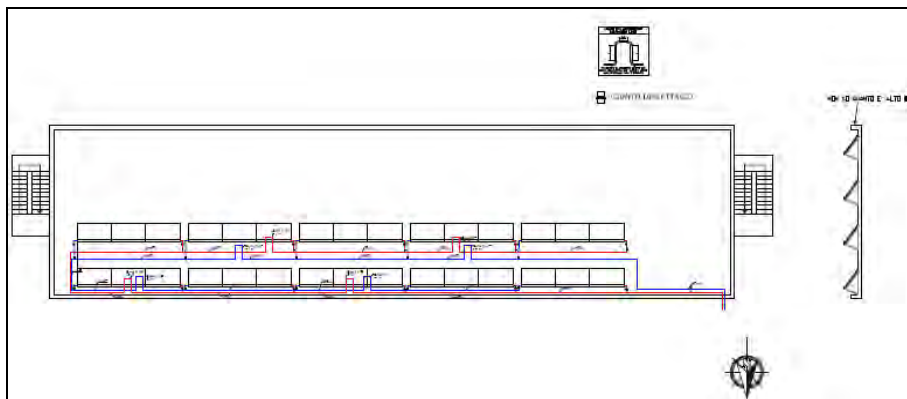


Figura 143. Schema disposizione collettori sul tetto

La fase di approvvigionamento del materiale si è conclusa ed è iniziata la fase di messa in opera; le successive fasi previste di collaudo e di realizzazione di una campagna di monitoraggio dei consumi reali per verificare i dati calcolati con le simulazioni e i risparmi effettivi verranno eseguite nell'ambito del nuovo tema di ricerca 5.4.1.3 "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili" del PAR del secondo anno, il cui contenuto è completamente focalizzato sulle tematiche della climatizzazione tramite tecnologie da fonti rinnovabili.



## **PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI**

### **Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Elettrica (DIE)**

L'attività condotta dal DIE ha avuto come oggetto l'analisi normativa vincoli legislativi alla costituzione di una ESCo mista, la definizione delle modalità operative della ESCo mista e della sua organizzazione, lo studio di degli strumenti contrattuali adeguati per l'utilizzo delle modalità di Energy Performance Contract (EPC).

### **Università di Palermo, Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM)**

L'attività condotta dal DREAM, nel quadro dell'obiettivo D, ha avuto come oggetto la definizione e l'implementazione di modelli relativi alla tecnologia solar desiccant cooling (DEC) da integrare nell'ambiente di progettazione di interventi di riqualificazione energetica. E' stata operata una selezione delle configurazioni che trovano maggiore applicazione e che ad oggi possono essere considerate tecnologicamente mature

L'implementazione dei modelli dei principali componenti del sistema DEC (ventilatore, scambiatore di calore rotativo, batterie ausiliarie di raffreddamento e riscaldamento, valvole divergenti e convergenti, umidificatore, ruota deumidificante, regolazione e controllo) è stata effettuata tenendo conto che essi dovessero essere integrati nell'ambiente di progettazione ODESSE.

### **Università di Roma "La Sapienza" CITERA (Centro Interdisciplinare Territorio Edilizia Restauro Ambiente)**

Allo scopo di proporre modelli territoriali di integrazione tra produzione e consumo energetico che si sostengano dal punto di vista tecnologico ed economico, valorizzando il ruolo dei cosiddetti "distretti" territoriali, l'Università La Sapienza di Roma ha messo a punto un programma energetico che prevede una serie di interventi riguardanti l'uso razionale dell'energia e il risparmio energetico attraverso l'applicazione del modello a generazione distribuita dell'energia. Il programma prevede, infatti, la costituzione di 8 isole energetiche all'interno della Città Universitaria della Sapienza, caratterizzate da interconnessioni tra rete esterna, nodi generazione e nodi utenze (siti all'interno della città universitaria).

In questo contesto le attività CITERA hanno avuto per obiettivo l'analisi energetica di tre isole energetiche, in cui è stata suddivisa la Città Universitaria di Roma, con l'identificazione dei consumi attuali e previsti, dei possibili interventi di riqualificazione, delle condizioni di interconnessione nell'ambito dell'attuale rete di distribuzione dell'energia (cabine elettriche e rete di teleriscaldamento esistente). Le tre isole energetiche selezionate sono:

- Isola 1: Dipartimenti di Farmacologia e di Botanica.
- Isola 2: Palazzo dei Servizi Generali e Dipartimento di Fisiologia generale.
- Isola 3: Palazzo del Rettorato, Facoltà di Lettere e di Matematica e Dipartimento di Chimica Farmaceutica.

### **Università del Salento - Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione**

L'attività svolta si è incentrata nello sviluppo di un tool software (E3: Energy and Economic Evaluation) in ambiente Matlab-Simulink per la valutazione preventiva dei consumi energetici di sistemi geotermici asserviti al riscaldamento e condizionamento degli edifici con tecnologie La prima fase delle attività ha avuto come obiettivo un'approfondita analisi delle varie tipologie di impianti di questo genere e di una loro valutazione in termini di rendimenti e costi.

Lo scopo dello sviluppo di tali modelli sw era quello di poter produrre simulazioni numeriche in contemporanea e/o in anticipo rispetto alla realizzazione degli impianti reali o prototipali, e di integrarli nell'ambiente di progettazione ODESSE.

### **Politecnico di Milano – Dipartimento di Energia**

L'attività di ricerca svolta dal Dipartimento ha previsto l'implementazione di modelli di calcolo in ambiente Simulink di componenti specifici alla realizzazione di impianti di solar cooling, in particolare sono stati sviluppati: modello (Simulink) di collettori solari per la produzione di alimentate termicamente. Tali codici sono stati implementati in modo da integrarsi nell'ambiente di progettazione ODESSE.

### **Politecnico di Milano - Dipartimento BEST (Dip. di Scienze e Tecnologie dell'Ambiente Costruito)**

L'attività svolta ha riguardato la ricerca di modelli di calcolo semplificati per la simulazione di sistemi energetici con tecnologie di generazione distribuita. 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' stata, dunque, realizzata un'analisi comparativa delle tecnologie più adatte ad una diffusione in ambito generazione distribuita.

Dapprima sono state selezionate, tra le tecnologie reperibili sul mercato, quelle caratterizzate da alti livelli di efficienza energetica e utili alla valorizzazione delle risorse rinnovabili localmente disponibili, per la scala di distretto. Nel dettaglio, sono state analizzate le soluzioni tecnologiche comprese nei seguenti macrosettori: geotermia, solare fotovoltaico, solare termico, mini/micro eolico, mini/micro idroelettrico, co-trigenerazione, sistemi a biomassa, celle a combustibile.

#### **Università di RomaTRE - Dipartimento di Informatica e Automazione**

Nell'ambito dell'attività di ricerca l'obiettivo è stato quello di permettere una parametrizzazione dei sistemi di controllo (di tipo PID o di altra natura) dei modelli d'impianto all'interno della piattaforma ODESSE e l'implementazione di un sistema di gestione e ottimizzazione globale dell'intero sistema edificio-impianto.

L'attività si è concentrata nello studio, analisi ed implementazione di metodologie di controllo che permettano di soddisfare i requisiti. Gli impianti presi in considerazione sono stati quelli di una micro turbina a gas e di una caldaia a condensazione

#### **Modostudio Cibinel Laurenti Martocchia Architetti Associati**

Per la realizzazione dell'obiettivo C, *"Progetto di una applicazione dimostrativa"*, ovvero il recupero energetico-funzionale dell'edificio A2 della Cittadella della Ricerca di Brindisi, ci si avvalsi della collaborazione, attraverso un contratto di servizio, della Modostudio Cibinel Laurenti Martocchia Architetti Associati.

Modostudio ha curato l'aspetto architettonico dell'intervento, suggerendo soluzioni che integrandosi con le specifiche impiantistiche dettate da ENEA, valorizzassero gli aspetti funzionali (rifunzionalizzazione degli spazi di lavoro, illuminazione naturale ecc.) ed energetici, in un contesto di moderno design ed impiego di nuovi materiali.

## Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Negli anni '70 e '80, il settore industriale ha ridotto sensibilmente la propria intensità energetica in seguito all'abbandono delle produzioni più energivore, all'automazione dei processi e alle razionalizzazioni. Tuttavia, già a partire dagli anni '90, si è vista una stabilizzazione ed una successiva inversione di tendenza, caratterizzata dalla tenuta delle produzioni a più elevata intensità energetica e dal ridimensionamento delle produzioni a più bassi consumi specifici.

Per alcune produzioni caratteristiche come la carta, l'acciaio ed il cemento, i dati relativi ai consumi energetici unitari dei prodotti italiani mostrano che essi sono un po' più efficienti della media dei prodotti europei. Questo non indica necessariamente una maggiore efficienza energetica di produzioni identiche, quanto piuttosto il fatto che il settore manifatturiero italiano parte, in genere, da semilavorati, mentre in altri Paesi si parte dalle materie prime vergini.

In alcuni settori, i programmi di razionalizzazioni energetiche che prevedono interventi di innovazione di processo e di prodotto devono quindi necessariamente essere collegati anche ad interventi di miglioramento delle prestazioni energetico-ambientali dell'intero ciclo produttivo.

Con riferimento poi ai soli consumi di energia elettrica nel settore industriale, anche le aziende che basano le loro produzioni su tecnologie e processi efficienti hanno buoni margini di intervento; questo succede se si appropria la gestione dei flussi energetici aziendali con una logica di sistema, integrando gli interventi di efficientamento del processo, con interventi sulle tecnologie trasversali, sull'illuminazione, sulla rete locale e, soprattutto, sulla gestione dei carichi, sempre con un occhio all'aspetto economico legato ai contratti in essere tra l'azienda ed i soggetti fornitori.

Nell'intraprendere un programma mirato all'efficienza energetica nel settore industriale, è necessario considerare che il tessuto produttivo nazionale è costituito prevalentemente da piccole e medie aziende, per lo più territorialmente raggruppate in distretti o aree industriali (circa 200 distretti: 124 nel Nord, 60 nel Centro, 16 nel Sud) e che la domanda proveniente dal settore industriale è storicamente molto frammentata.

In alcuni comparti del settore industriale italiano il tradizionale impiego dell'energia termica, ottenuta in genere con impianti di generazione alimentati a gas naturale, può essere sostituito, in termini economicamente vantaggiosi e tecnicamente possibili, con l'impiego di energia elettrica e delle relative tecnologie di utilizzo.

Parallelamente, esistono diffuse applicazioni di mercato di tecnologie elettriche che presentano un potenziale di miglioramento dell'efficienza, sia per quanto riguarda l'installazione di sistemi e componenti efficienti, sia per la gestione integrata del sistema, 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.

Il settore industriale italiano presenta, con riferimento all'efficienza energetica, una bipartizione: se da un lato l'efficienza energetica dei processi produttivi può considerarsi in genere buona, specie nei processi energy 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. 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.

Con riferimento a quanto sopra, tra le tecnologie che presentano potenziali di miglioramento dell'efficienza energetica tali da giustificare studi di approfondimento tecnico-scientifico mediante applicazioni dimostrative reali, le tecnologie afferenti a:

- reti energetiche interattive ad alta integrazione, con inserite unità di produzione locale dell'energia elettrica tramite l'impiego di apparecchiature di micro-cogenerazione ( $\leq 1$  MW<sub>e</sub>) e tecnologie avanzate per il controllo delle reti termica ed elettrica, per applicazioni in complessi residenziali o aziendali; tali reti possono contribuire all'ottimizzazione dei flussi energetici (elettrici e termici) nei processi produttivi, in particolare dei settori energivori, attraverso l'utilizzo di tecnologie elettriche e cogenerative per il recupero del calore, la riduzione dei consumi e l'aumento della efficienza energetica;

- reti di illuminazione ad alta efficienza in applicazioni industriali basate sulle tecnologie innovative (lampade ad alta efficienza, led, regolatori di flusso, sistemi intelligenti di controllo e gestione dei carichi di illuminazione);
- convertitori statici a semiconduttori (IGBT) dotati di accumulo energetico in batteria o in supercondensatori, per il condizionamento della erogazione di energia elettrica (dalla rete) in presenza di carichi discontinui o impulsivi.

## **DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ**

Il prodotto del programma di attività è rappresentato dalla realizzazione e dal successivo monitoraggio di applicazioni sperimentali pilota su scala reale di tecnologie elettriche innovative ad elevata efficienza, che hanno raggiunto un grado di sviluppo completo o prototipale.

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 sperimentali pilota.

L'attività di durata triennale 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 sperimentali pilota: a valle della 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, che 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.

I risultati di questa attività 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.

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 primo anno del progetto prevede i seguenti obiettivi.

**A. Ricognizione delle tecnologie elettriche utilizzate nelle utenze industriali e delle tecnologie termiche potenzialmente sostituibili con tecnologie elettriche innovative**

**B. Realizzazione di una banca dati settoriale, sviluppo di modelli di simulazione per valutare i potenziali di diffusione e costruzione del sito WEB**

**C. Identificazione di progetti dimostrativi (3-4 applicazioni) di miglioramento dell'efficienza; analisi di fattibilità e valutazione ricadute**

**D. Progettazione degli interventi dimostrativi (sistemi di accumulo elettrico, pompe di calore ad alta temperatura, motori elettrici ad alta efficienza), acquisizione della sensoristica**

**E. Modellazione degli interventi dimostrativi e sperimentazione preliminare**

## RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

### A. Ricognizione delle tecnologie elettriche utilizzate nelle utenze industriali e delle tecnologie termiche potenzialmente sostituibili con tecnologie elettriche innovative

#### A1. Tecnologie elettriche nelle applicazioni orizzontali, in particolare nel settore industriale e terziario

L'attività oggetto della collaborazione congiunta di ENEA, del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università degli Studi di Pavia e di FIRE, ha portato alla realizzazione di un documento tecnico che raccoglie i risultati dello studio svolto dall'università di Pavia sulla potenzialità di risparmio energetico di 11 elettrotecnologie (indicate in Tabella 71, con progressivi da 1 a 5 e da 7 a 129 trasversali rispetto ad un identificato numero di utenti finali e prendendo come orizzonte temporale il 2020, e li integra con l'analisi delle barriere e dei possibili strumenti e strategie di intervento.

**Tabella 71. Elenco delle tecnologie considerate con rispettivo identificativo**

| ID | TECNOLOGIA                             | RIFERIMENTO |
|----|----------------------------------------|-------------|
| 1  | Motori alta efficienza                 | Tec. 1      |
| 2  | Inverter su pompe                      | Tec. 2      |
| 3  | Inverter su ventilatori                | Tec. 3      |
| 4  | Inverter su compressori freddo         | Tec. 4      |
| 5  | Inverter su compressori aria           | Tec. 5      |
| 7  | Brushless piccola potenza              | Tec. 7      |
| 8  | Pompe di calore AC/AC (acqua/acqua)    | Tec. 8      |
| 9  | Pompe di calore AR/AR (aria/aria)      | Tec. 9      |
| 10 | MVR= compressione meccanica del vapore | Tec. 10     |
| 11 | IR = infrarossi                        | Tec. 11     |
| 12 | MW=microonde                           | Tec. 12     |

Per lo studio sono stati scelti alcuni settori merceologici sia dell'industria sia del terziario (Tabella 72), che sono responsabili di una maggioritaria quota dei consumi elettrici nazionali.

Per ognuno si è valutato l'impatto su consumi ed emissioni di CO<sub>2</sub> che potrebbe essere rappresentato da una più estensiva applicazione delle singole tecnologie alternative proposte, partendo dalle informazioni attualmente disponibili in termini di consumi elettrici e dati statistici sull'industria, nonché da studi precedentemente prodotti per l'industria nell'ambito del censimento motori, in termini di numeri, potenze e consumi associati.

**Tabella 72. Elenco dei settori o sottosettori merceologici (macro-utente) e dei rispettivi codici ATECO 2007**

| Codice ATECO 2007 Settore | Codice ATECO 2007 Sottosettore | SETTORE MERCEOLOGICO           |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| DA                        | 15.5                           | Alimentare caseario            |
| DA                        | 15.3                           | Alimentare conserve            |
| DA                        | 15.81                          | Alimentare dolciario           |
| DB                        | 17                             | Tessile tessitura              |
| DB                        | 18                             | Tessile finissaggio            |
| DC                        | 19                             | Conciarie                      |
| DD                        | 20                             | Legno pannelli                 |
| DE                        | 21                             | Cartario pulp                  |
| DE                        | 22                             | Cartario cartotecnico          |
| DF                        | 23                             | Petrochimico                   |
| DG                        | 24.4                           | Chimica farmaceutica           |
| DG                        | 24.1                           | Chimica di base                |
| DH                        | 25                             | Lavorazione materiale plastico |
| DI                        | 26.2                           | Ceramica                       |
| DI                        | 26.1                           | Vetro                          |
| DI                        | 26.4                           | Laterizi                       |
| DI                        | 26.5                           | Cemento                        |
| DI                        | 26.6                           | Manufatti cemento              |
| DI                        | 26.8                           | Metalli non ferrosi            |
| DJ                        | 27 + 28                        | Siderurgico                    |
| DK                        | 29                             | Meccanica                      |
| G                         | 51                             | Grande distribuzione           |
| H                         | 55                             | Alberghi                       |
| J                         |                                | Uffici-Banche                  |
| N                         | 85.1                           | Ospedali                       |

Gli scenari prefigurano per il futuro un ampio margine di utilizzo di queste tecnologie, che associano a benefici ambientali, dovuti ad un più efficiente uso dell'energia primaria, anche benefici di gestione: tuttavia essi sono stati creati in ottica di massima cautela, ossia considerando due ipotesi che intendono porsi in un'ottica di sottostima, piuttosto che di "incauto" ottimismo.

Lo studio, nella parte svolta dall'Università degli Studi di Pavia, si è articolato in quattro parti. La prima ha trattato l'analisi delle elettrotecnologie scelte. È stata svolta una ricerca sulle caratteristiche tecniche delle tecnologie in modo da valutarne le possibili applicazioni nei settori industriali e ne sono state analizzate e quantificate le installazioni attualmente presenti. Oltre ad un risparmio energetico diretto alcune elettrotecnologie individuate presentano anche un beneficio indiretto dovuto a tempi di lavorazione ridotti e migliore qualità del prodotto. Dallo studio specifico sulla singola tecnologia e dalle ricerche svolte è stato possibile proporre, per ogni settore merceologico e per ogni tecnologia, un valore percentuale di applicabilità e un valore percentuale di risparmio energetico ottenibile con riferimento all'anno 2020.

I dati sono riassunti in una matrice topologica di sintesi di tipo qualitativo (Tabelle 73-75), a cui risultano però associate schede specifiche di tecnologia e di settore di tipo quantitativo.

**Tabella 73. Matrice topologica del settore industriale (tec 1-5)**

| Tecnologie ►<br>% risparmi ►<br>classe di potenza ►<br>Penetrazione<br>presente/Potenzialità<br>al 2020 ►<br>Settori ▼ | turni | 1                      |               |                 |               | 2                 |               |                 |               | 3                       |               |                 |               | 4                              |               |                 |               | 5                            |               |                 |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------------|---------------|-----------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------------|---------------|------------------------------|---------------|-----------------|---------------|
|                                                                                                                        |       | Motori alta efficienza |               |                 |               | INVERTER SU POMPE |               |                 |               | INVERTER SU VENTILATORI |               |                 |               | INVERTER SU COMPRESSORI FREDDO |               |                 |               | INVERTER SU COMPRESSORI ARIA |               |                 |               |
|                                                                                                                        |       | 2%                     |               | 1,00%           |               | 25%               |               | 25%             |               | 20%                     |               | 20%             |               | 20%                            |               | 20%             |               | <20 kW                       |               | 20%             |               |
|                                                                                                                        |       | <20 kW                 |               | ≥20 kW          |               | <20 kW            |               | ≥20 kW          |               | <20 kW                  |               | ≥20 kW          |               | <20 kW                         |               | ≥20 kW          |               | <20 kW                       |               | ≥20 kW          |               |
|                                                                                                                        |       | Livello Attuale        | applicabilità | Livello Attuale | applicabilità | Livello Attuale   | applicabilità | Livello Attuale | applicabilità | Livello Attuale         | applicabilità | Livello Attuale | applicabilità | Livello Attuale                | applicabilità | Livello Attuale | applicabilità | Livello Attuale              | applicabilità | Livello Attuale | applicabilità |
|                                                                                                                        |       |                        |               |                 |               |                   |               |                 |               |                         |               |                 |               |                                |               |                 |               |                              |               |                 |               |
| alimentare-caseario                                                                                                    | 3     | X                      | XX            | X               | XX            |                   | X             |                 | XX            |                         |               | X               |               | XXX                            |               | XX              |               | -                            |               | X               | X             |
| alimentare-conservie                                                                                                   | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | XXX           | X               | XX            |                         |               | XX              |               | XX                             |               | XX              |               | -                            |               | X               | X             |
| alimentare-dolcifici                                                                                                   | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | XX            | X               | XX            | X                       | XX            |                 |               | XX                             |               | XX              |               | -                            |               | X               | XX            |
| tessile tessitura                                                                                                      | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | XX            | X               | XX            |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            |               | X               | X             |
| tessile finissaggio                                                                                                    | 2     | X                      | X             | X               | X             | X                 | XX            | X               | XX            |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            |               | X               | X             |
| meccanica                                                                                                              | 1     | X                      | XX            | X               | XXX           | X                 | X             | X               | X             |                         | XX            |                 | XX            | -                              |               | -               |               | -                            | XX            | X               | XXX           |
| lavorazione Mat. Pl.                                                                                                   | 3     | X                      | XX            | X               | XXX           | X                 | XX            | X               | XX            |                         | XX            |                 | XX            | -                              |               | -               |               | -                            | XX            | X               | XXX           |
| legno (pannelli)                                                                                                       | 2     | X                      | XX            | X               | XX            |                   |               |                 |               |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            | XX            | X               | XX            |
| siderurgico                                                                                                            | 3     | X                      | XX            | X               | XXX           | X                 | X             | X               | X             | X                       | XX            | X               | XX            | -                              |               | -               |               | -                            | X             | X               |               |
| metalli non ferrosi                                                                                                    | 3     | X                      | X             | X               | X             |                   |               |                 |               |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            | XX            | X               | X             |
| chimica farmaceutica                                                                                                   | 2     | X                      | XX            | X               | XX            | XX                | XXX           | XX              | XXX           | X                       | XX            | X               | XX            |                                |               | X               | XX            | -                            |               | X               | XX            |
| chimica di base                                                                                                        | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | XX                | XXX           | XX              | XXX           | X                       | XX            | X               | XX            |                                |               | X               | XX            | -                            |               | X               | XX            |
| ceramica                                                                                                               | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | XX            | X               | XX            |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            | X             | XX              |               |
| vetro                                                                                                                  | 3     | X                      | XX            | X               | XXX           | X                 | XX            | X               | XX            | X                       | XX            | X               | XX            | -                              |               | -               |               | -                            | XX            | X               | XX            |
| laterizi                                                                                                               | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | X             | X               | X             | X                       | XXXX          | X               | XXX           | -                              |               | -               |               | -                            | -             | -               | -             |
| cemento                                                                                                                | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | XX                | XXX           | XX              | XXX           | XX                      | XXXX          |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            | -             | X               | X             |
| manufatti cemento                                                                                                      | 2     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | XX            | X               | XX            |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            | XX            | X               | X             |
| cartario-pulp                                                                                                          | 2     | X                      | XX            | X               | XXX           | XX                | XXX           | XX              | XXX           | X                       | XX            | X               | XXX           | -                              |               | -               |               | -                            | -             | -               | X             |
| cartario-cartotecnico                                                                                                  | 2     | X                      | XX            | X               | XXX           | X                 | XX            | X               | XX            |                         |               |                 |               | -                              |               | -               |               | -                            | -             | -               | X             |
| acquedotti                                                                                                             | 3     | X                      | XXX           | X               | XXX           | X                 | XXX           | X               | XXX           |                         |               | -               | -             | -                              |               | -               |               | -                            | -             | -               | -             |
| petrolchimico                                                                                                          | 3     | X                      | XX            | X               | XXX           | XX                | XXX           | XX              | XXX           | X                       | XXX           | XX              | XXX           | -                              |               | -               |               | -                            | -             | X               | XX            |
| produzione energia                                                                                                     | 3     | X                      | XX            | X               | XX            | X                 | XXX           | X               | XXX           | X                       | XXX           | XX              | XXX           | -                              |               | -               |               | -                            | -             | X               | XX            |

**Tabella 74. Matrice topologica del settore industriale (tec 7-12)**

| Tecnologie ▶<br>% risparmi ▶<br>classe di potenza ▶<br>Penetrazione presente/Potenzialità al 2020 ▶<br>Settori ▼ | turni | 7                         |               |                 |               | 8                     |               |                 |               | 9                     |               |                 |               | 10              |               |                 |               | 11              |               |                 |               | 12              |               |                 |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
|                                                                                                                  |       | BRUSHLESS PICCOLA POTENZA |               |                 |               | POMPE DI CALORE AC/AC |               |                 |               | POMPE DI CALORE AR/AR |               |                 |               | MVR             |               |                 |               | IR              |               |                 |               | MW              |               |                 |               |
|                                                                                                                  |       | 10%                       |               | 10%             |               | 15%                   |               | 5%              |               | 10%                   |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |
|                                                                                                                  |       | <20 kW                    |               | ≥20 kW          |               | <20 kW                |               | ≥20 kW          |               | <20 kW                |               | ≥20 kW          |               | <20 kW          |               | ≥20 kW          |               | <20 kW          |               | ≥20 kW          |               | <20 kW          |               | ≥20 kW          |               |
|                                                                                                                  |       | Livello Attuale           | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale       | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale       | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità | Livello Attuale | Applicabilità |
|                                                                                                                  |       |                           |               |                 |               |                       |               |                 |               |                       |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |                 |               |
| alimentare-caseario                                                                                              | 3     |                           | -             | -               | -             | X                     | -             | XX              | -             | X                     | -             |                 | X             | -               | -             | X               | XX            | -               | -             | X               | -             | -               | -             | -               | -             |
| alimentare-conservie                                                                                             | 3     |                           | -             | -               | -             | X                     | -             | XX              | -             | X                     | -             |                 | X             | -               | -             | X               | XXX           | -               | -             | -               | -             | -               | -             | -               | -             |
| alimentare-dolcifici                                                                                             | 3     | X                         | -             | -               | -             |                       |               | XX              | -             | X                     | -             |                 | X             | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 | X             | X               | X             | X               | XX            |
| tessile tessitura                                                                                                | 3     | X                         | -             | -               | -             |                       |               | X               | -             | X                     | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 | X             | -               | X             | X               | X             |
| tessile finissaggio                                                                                              | 2     | X                         | -             | -               | -             |                       |               | X               | -             |                       | -             |                 | X             | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | X               | -             | X               | -             |
| meccanica                                                                                                        | 1     | X                         | -             | -               | -             |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 | X             | -               | -             | X               | -             |
| lavorazione Mat. Pl.                                                                                             | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| legno (pannelli)                                                                                                 | 2     | X                         | -             | -               | -             |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 | X             | -               | X             | -               | X             |
| siderurgico                                                                                                      | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| metalli non ferrosi                                                                                              | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| chimica farmaceutica                                                                                             | 2     | X                         | -             | -               | -             | X                     | -             | XX              | -             | X                     | X             | X               | XX            | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| chimica di base                                                                                                  | 3     | X                         | -             | -               | -             | X                     | -             | XX              | -             | X                     | X             | XX              | -             | -               |               |                 | X             | -               | -             |                 |               | X               | -             | X               | -             |
| ceramica                                                                                                         | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 | X             | -               | -             |                 | X             | -               | X             | -               | X             |
| vetro                                                                                                            | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       | -             |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| laterizi                                                                                                         | 3     |                           | X             | -               | -             |                       |               |                 | -             |                       | X             | -               |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 | X             |
| cemento                                                                                                          | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               | X               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| manufatti cemento                                                                                                | 2     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               | X               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| cartario-pulp                                                                                                    | 2     | -                         | X             | -               | -             |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               |                 |               |                 | X             | XX              | -             | -               | X             | -               | X             | -               | X             |
| cartario-cartotecnico                                                                                            | 2     |                           | X             | -               | -             |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               |                 |               |                 | X             | -               | -             | -               | X             | -               | X             | -               | X             |
| acquedotti                                                                                                       | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               | -               | -             |                 |               | -               | -             |                 |               |                 |               |                 |               |
| petrolchimico                                                                                                    | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               | -               | -             |                 |               | X               | -             | -               |               |                 |               |                 |               |
| produzione energia                                                                                               | 3     |                           |               |                 |               |                       |               |                 | -             |                       |               |                 |               | -               | -             |                 |               |                 | -             | -               |               |                 |               |                 |               |

**Tabella 75. Matrice di sintesi del settore terziario**

| Tecnologie ▶                                          | 1                      |               | 2                 |               | 3                       |               | 4                              |               | 5                            |               | 8                     |               | 9                     |               |
|-------------------------------------------------------|------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
|                                                       | Motori alta efficienza |               | INVERTER SU POMPE |               | INVERTER SU VENTILATORI |               | INVERTER SU COMPRESSORI FREDDO |               | INVERTER SU COMPRESSORI ARIA |               | POMPE DI CALORE AC/AC |               | POMPE DI CALORE AR/AR |               |
|                                                       | Livello Attuale        | applicabilità | Livello Attuale   | applicabilità | Livello Attuale         | applicabilità | Livello Attuale                | applicabilità | Livello Attuale              | applicabilità | Livello Attuale       | applicabilità | Livello Attuale       | applicabilità |
| Penetrazione presente/Potenzialità al 2020/risparmi ▶ |                        | 1%            |                   | 25%           |                         | 20%           |                                | 10%           |                              | 20%           |                       | 15%           |                       | 10%           |
| Settori ▶                                             |                        |               |                   |               |                         |               |                                |               |                              |               |                       |               |                       |               |
| terziario-grande distr.                               | -                      | XX            | -                 | XX            | -                       | XX            | -                              | XX            | -                            | X             | -                     | XX            | -                     | XX            |
| terziario alberghi                                    | -                      | X             | -                 | X             | -                       | XX            | -                              |               | -                            |               | X                     | XX            | X                     | XX            |
| terziario uffici                                      | -                      | X             | -                 | X             | -                       | XX            | -                              |               | -                            |               | XX                    | XXX           | X                     | XX            |
| terziario ospedali                                    | -                      |               | -                 |               | -                       |               | -                              |               | -                            |               | -                     |               | -                     |               |



La seconda parte dello studio ha trattato la suddivisione dei consumi finali di energia nei vari settori industriali.

Dall'analisi di studi precedenti è stato definito un quadro generale che identifica, sulla base di audit energetici su stabilimenti industriali presi come riferimento, in che modo sia ripartito il consumo finale di energia definendone le percentuali sul totale consumo di stabilimento.

Per ogni settore, tenendo conto delle varie soluzioni tecnologiche che ne caratterizzano il processo produttivo e in base ai dati a disposizione, sono state individuate delle macro aree di utilizzo finale di energia.

Per ogni area di utilizzo finale di energia si è calcolata la percentuale attribuibile sul consumo totale di stabilimento. È stata inoltre proposta una suddivisione delle macroaree relativa alla taglie di potenza, individuando due fasce: una maggiore e una minore di 20 kW (solo per il settore dell'industria).

La terza parte ha trattato la proiezione all'anno 2020 dei dati relativi ai consumi energetici nell'industria. Attraverso interpolazioni lineari e facendo le opportune valutazioni sui fattori di progressione basati sui dati relativi ai censimenti ISTAT sull'industria sono stati definiti per ogni settore i consumi di energia previsti per il 2020. Anche in questo caso si è preferito lavorare su ipotesi cautelative.

**Tabella 76. Scheda sulle proiezioni al 2020 nei macrosettori industriali**

| codice | attività                 |        | 2001/1991 | 2001      | 2005      | 2005/2001 | 2007      | 2007/2001 | 2020      | 2020/2001 |
|--------|--------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| DA     | alimentare               |        |           | 1.403.051 | 1.494.720 |           | 1.540.555 |           | 1.728.176 |           |
|        | totale imprese           | numero | 108,1%    | 67.013    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 108,8%    | 73.849    | 78.674    | 106,5%    | 81.087    | 109,8%    | 90.962    | 123,2%    |
|        | totale addetti           | numero | 93,7%     | 455.135   | 462.075   | 101,5%    | 465.545   | 102,3%    |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 154,9%    | 12.043    | 13.005    | 108,0%    | 12.855    | 106,7%    | 17.382    | 144,3%    |
|        | fattore progressione     |        | 8,8%      |           |           | 6,5%      |           | 9,8%      |           | 23,2%     |
| DB     | tessile/abbigliamento    |        |           | 1.976.351 | 1.976.351 |           | 1.976.351 |           | 1.976.351 |           |
|        | totale imprese           | numero | 72,6%     | 73.344    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 74,3%     | 78.361    | 88.924    | 88,0%     | 84.206    | 81,9%     | 30.245    | 38,6%     |
|        | totale addetti           | numero | 73,8%     | 609.629   | 490.009   | 80,4%     | 430.199   | 70,6%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 117,3%    | 10.129    | 7.798     | 77,0%     | 7.124     | 70,3%     | 6.794     | 67,1%     |
|        | fattore progressione     |        | 0,0%      |           |           | 0,0%      |           | 0,0%      |           | 0,0%      |
| DD     | legno                    |        |           | 831.670   | 831.670   |           | 831.670   |           | 831.670   |           |
|        | totale imprese           | numero | 85,8%     | 47.812    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 87,2%     | 50.250    | 45.677    | 90,9%     | 43.391    | 86,3%     | 32.390    | 64,5%     |
|        | totale addetti           | numero | 96,0%     | 178.985   | 170.672   | 95,4%     | 166.516   | 93,0%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 142,2%    | 4.200     | 4.373     | 104,1%    | 4.456     | 106,1%    | 5.788     | 137,8%    |
|        | fattore progressione     |        | 0,0%      |           |           | 0,0%      |           | 0,0%      |           | 0,0%      |
| DE     | fabbricazione carta      |        |           | 441.606   | 451.237   |           | 456.053   |           | 495.708   |           |
|        | totale imprese           | numero | 107,4%    | 31.464    |           |           |           |           |           |           |
|        | totale unità locali      | numero | 108,0%    | 34.341    | 35.090    | 102,2%    | 35.465    | 103,3%    | 38.548    | 112,3%    |
|        | totale addetti           | numero | 90,6%     | 258.823   | 245.383   | 94,8%     | 238.663   | 92,2%     |           |           |
|        | energia                  | GWh    | 138,9%    | 10.257    | 10.939    | 106,7%    | 10.649    | 103,8%    | 13.604    | 132,6%    |
|        | fattore progressione     |        | 8,0%      |           |           | 2,2%      |           | 3,3%      |           | 12,3%     |
| DF     | fabbricazione coke       |        |           | 52.057    | 52.057    |           | 52.057    |           | 52.057    |           |
|        | totale imprese           | numero | 86,9%     | 424       |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 90,8%     | 913       | 800       | 87,6%     | 744       | 81,4%     | 712       | 78,0%     |
|        | totale addetti           | numero | 81,7%     | 24.780    | 20.197    | 81,5%     | 17.908    | 72,3%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 183,5%    | 5.950     | 6.482     | 109,0%    | 6.378     | 107,2%    | 9.200     | 154,6%    |
|        | fattore progressione     |        | 0,0%      |           |           | 0,0%      |           | 0,0%      |           | 0,0%      |
| DG     | prodotti chimici         |        |           | 654.490   | 665.784   |           | 671.401   |           | 654.490   |           |
|        | totale imprese           | numero | 108,2%    | 5.904     |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 107,7%    | 7.721     | 7.854     | 101,7%    | 7.921     | 102,6%    | 8.560     | 110,9%    |
|        | totale addetti           | numero | 83,6%     | 206.719   | 193.159   | 93,4%     | 186.380   | 90,2%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 117,9%    | 21.223    | 19.015    | 89,6%     | 18.192    | 85,7%     | 19.485    | 91,8%     |
|        | fattore progressione     |        | 7,7%      |           |           | 1,7%      |           | 2,6%      |           | 0,0%      |
| DH     | gomma/plastica           |        |           | 762.401   | 765.680   |           | 767.319   |           | 859.699   |           |
|        | totale imprese           | numero | 110,2%    | 13.412    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 114,1%    | 15.115    | 15.180    | 100,4%    | 15.213    | 100,6%    | 17.044    | 112,8%    |
|        | totale addetti           | numero | 118,5%    | 218.299   | 206.752   | 94,7%     | 200.978   | 92,1%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 139,5%    | 8.952     | 9.436     | 105,4%    | 10.387    | 116,0%    | 13.634    | 152,3%    |
|        | fattore progressione     |        | 14,1%     |           |           | 0,4%      |           | 0,6%      |           | 12,8%     |
| DI     | minerali non metaliferi  |        |           | 854.895   | 865.287   |           | 870.483   |           | 924.382   |           |
|        | totale imprese           | numero | 105,7%    | 26.796    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 105,8%    | 31.177    | 31.556    | 101,2%    | 31.746    | 101,8%    | 33.711    | 108,1%    |
|        | totale addetti           | numero | 91,8%     | 253.541   | 247.482   | 97,6%     | 244.453   | 96,4%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 105,6%    | 12.213    | 14.024    | 114,8%    | 14.152    | 115,9%    | 15.898    | 130,2%    |
|        | fattore progressione     |        | 5,8%      |           |           | 1,2%      |           | 1,8%      |           | 9,1%      |
| DJ     | metallo/prodotti metallo |        |           | 1.718.075 | 1.829.134 |           | 1.884.663 |           | 1.887.751 |           |
|        | totale imprese           | numero | 108,5%    | 99.170    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 110,5%    | 106.279   | 113.149   | 106,5%    | 116.584   | 109,7%    | 132.171   | 124,4%    |
|        | totale addetti           | numero | 106,8%    | 833.993   | 840.674   | 100,8%    | 844.015   | 101,2%    |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 108,6%    | 26.558    | 26.030    | 98,0%     | 27.229    | 102,5%    | 29.181    | 109,9%    |
|        | fattore progressione     |        | 10,5%     |           |           | 6,5%      |           | 9,7%      |           | 9,9%      |
| DK     | fabbricazione macchine   |        |           | 2.252.095 | 2.321.914 |           | 2.356.824 |           | 2.860.534 |           |
|        | totale imprese           | numero | 125,4%    | 42.235    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|        | totale unità locali      | numero | 126,1%    | 46.481    | 47.922    | 103,1%    | 48.643    | 104,7%    | 59.039    | 127,0%    |
|        | totale addetti           | numero | 110,9%    | 602.139   | 561.366   | 93,2%     | 540.979   | 89,8%     |           | 0,0%      |
|        | energia                  | GWh    | 145,3%    | 20.840    | 23.550    | 113,0%    | 23.802    | 114,2%    | 31.704    | 152,1%    |
|        | fattore progressione     |        | 26,1%     |           |           | 3,1%      |           | 4,7%      |           | 27,0%     |

Nella quarta parte del lavoro si va a determinare come l'applicazione delle 11 elettrotecnologie possa invece influire sui consumi di energia ed emissioni previsti per il 2020 nel settore terziario.

**Tabella 77. Elaborazioni per il calcolo della proiezione dei consumi al 2020 del settore terziario**

| codice   | attività                    |        | 2001/1991 | 1991      | 2001      | 2005      | 2005/2001 | 2007      | 2007/2001 | 2020      | 2020/2001 |
|----------|-----------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>G</b> | <b>grande distribuzione</b> |        |           |           |           |           |           | 0         |           | 0         |           |
|          | totale imprese              | numero | 96,1%     | 1.280.044 | 1230731   |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|          | totale unità locali         | numero | 97,3%     | 1.378.320 | 1.341.087 | 1.366.977 | 101,9%    | 1.379.922 | 102,9%    | 1.367.204 | 101,9%    |
|          | totale addetti              | numero | 95,2%     | 3.304.795 | 3147776   | 3.380.130 | 107,4%    | 3.496.308 | 111,1%    |           | 0,0%      |
|          | energia                     | GWh    | 156,1%    | 10.478    | 16357,6   | 21470,8   | 131,3%    | 23.317    | 142,5%    | 32.962    | 201,5%    |
|          | fattore di progressione     |        | 0,0%      |           |           |           | 1,9%      |           | 2,9%      |           | 1,9%      |
| <b>H</b> | <b>Alberghi</b>             |        |           |           |           |           |           |           |           | 0         |           |
|          | totale imprese              | numero | 112,4%    | 217.628   | 244540    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|          | totale unità locali         | numero | 111,5%    | 234.298   | 261304    | 298.911   | 114,4%    | 317.715   | 121,6%    | 376.276   | 144,0%    |
|          | totale addetti              | numero | 117,3%    | 725.481   | 850674    | 1.078.663 | 126,8%    | 1.192.658 | 140,2%    |           | 0,0%      |
|          | energia                     | GWh    | 149,3%    | 6.235     | 9311,3    | 11388     | 122,3%    | 11995,6   | 128,8%    | 16.484    | 177,0%    |
|          | fattore di progressione     |        | 11,5%     |           |           |           | 14,4%     |           | 21,6%     |           | 44,0%     |
| <b>J</b> | <b>Uffici-banche</b>        |        |           |           |           |           |           |           |           | 0         |           |
|          | totale imprese              | numero | 164,1%    | 49.897    | 81870     |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|          | totale unità locali         | numero | 149,0%    | 78.544    | 117035    | 104.080   | 88,9%     | 97.603    | 83,4%     | 122.833   | 105,0%    |
|          | totale addetti              | numero | 103,0%    | 573.270   | 590267    | 570.273   | 96,6%     | 560.276   | 94,9%     |           | 0,0%      |
|          | energia                     | GWh    | 127,2%    | 1.918     | 2439      | 2519,5    | 103,3%    | 2619,3    | 107,4%    | 3.220     | 132,0%    |
|          | fattore di progressione     |        | 49,0%     |           |           |           | 0,0%      |           | 0,0%      |           | 5,0%      |
| <b>N</b> | <b>Ospedali</b>             |        |           |           |           |           |           |           |           | 0         |           |
|          | totale imprese              | numero | 151,8%    | 118.911   | 180450    |           | 0,0%      |           |           |           | 0,0%      |
|          | totale unità locali         | numero | 144,0%    | 134.638   | 193812    | 237.510   | 122,5%    | 259.359   | 133,8%    | 353.810   | 182,6%    |
|          | totale addetti              | numero | 136,2%    | 279.755   | 381148    | 602.135   | 158,0%    | 712.629   | 187,0%    |           | 0,0%      |
|          | energia                     | GWh    | 119,9%    | 5.438     | 6520,1    | 8087,7    | 124,0%    | 8843,2    | 135,6%    | 11.226    | 172,2%    |
|          | fattore di progressione     |        | 44,0%     |           |           |           | 22,5%     |           | 33,8%     |           | 72,2%     |

Per ogni settore e per ogni elettrotecnologia si è prodotta una scheda di valutazione che presenta la percentuale di applicabilità, la percentuale di risparmio energetico e la sua quantificazione specifica per settore all'anno 2020, suddividendo l'industria dal terziario nella trattazione.

Negli allegati al rapporto tecnico *“Ricognizione sulle tecnologie elettriche nelle applicazioni industriali e del terziario”* si trovano tutte le elaborazioni di dettaglio. In merito ai risparmi ottenibili, in base agli scenari ipotizzati per il settore industriale sono stati stimati valori di risparmio compresi tra 257-1.269 ktCO<sub>2</sub> (vedi Tabella 78 e Figura 144) e 94-484 ktep (vedi Tabella 78 e Figura 145) di energia primaria.

Il limite superiore a cui qui ci si riferisce corrisponde ad evitare l'entrata in esercizio di una nuova centrale a ciclo combinato da oltre 800 MW. Il range è stato stimato valutando in modo cumulativo sia il minimo risparmio attribuibile all'applicazione di una sola elettrotecnologia per settore (scenario SC1 per il calcolo del limite inferiore) sia il massimo risparmio attribuibile all'applicazione contemporanea delle due tecnologie a maggior risparmio, tenendo conto che alcune di queste hanno una applicazione esclusiva rispetto alle altre.

Nel settore terziario si può osservare che, la quota di energia associata ai settori analizzati nel 2007 sia meno della metà rispetto a quella dei settori industriali indagati: l'entità del risparmio che si potrebbe ottenere è tuttavia confrontabile, come ordine di grandezza, a quelli del settore industriale.

**Tabella 78. Tabella di sintesi dei risparmi e benefici (valori min e max delle singole tecnologie considerate) nel settore industriale. Valori di riferimento per le Figure 145 e 146**

|          |                      | ktep  |        | ktCO <sub>2</sub> |        | CUMULATIVI |        |                   |         |
|----------|----------------------|-------|--------|-------------------|--------|------------|--------|-------------------|---------|
|          |                      | min   | MAX    | min               | MAX    | ktep       |        | ktCO <sub>2</sub> |         |
|          |                      |       |        |                   |        | min        | MAX    | min               | MAX     |
| DA 15.5  | alimentare-caseario  | 0,50  | 20,68  | 1,25              | 52,01  | 0,50       | 20,68  | 1,25              | 52,01   |
| DA 15.3  | alimentare- conserve | 0,59  | 18,55  | 1,48              | 46,66  | 1,08       | 39,23  | 2,73              | 98,68   |
| DA 15.81 | alimentare-dolciario | 0,57  | 49,13  | 1,44              | 123,55 | 1,66       | 88,36  | 4,17              | 222,26  |
| DB 17    | tessile tessitura    | 3,28  | 25,59  | 8,26              | 64,36  | 4,94       | 113,95 | 12,43             | 286,62  |
| DB 18    | tessile finissaggio  | 0,15  | 0,82   | 0,38              | 2,07   | 5,09       | 114,78 | 12,81             | 288,69  |
| DK 29    | meccanica            | 12,57 | 182,50 | 31,62             | 459,02 | 17,66      | 297,27 | 44,42             | 747,71  |
| DH 25    | lavorazione Mat.PI.  | 17,29 | 20,73  | 43,50             | 52,15  | 34,95      | 318,00 | 87,92             | 799,86  |
| DD 20    | legno (pannelli)     | 0,62  | 1,56   | 7,54              | 18,97  | 35,57      | 319,56 | 95,46             | 818,83  |
| DF 23    | siderurgico          | 35,54 | 89,38  | 42,83             | 107,72 | 71,11      | 408,94 | 138,29            | 926,55  |
| DG 24.4  | chimica farmaceutica | 4,44  | 11,16  | 49,42             | 124,32 | 75,55      | 420,10 | 187,71            | 1050,87 |
| DG 24.1  | chimica di base      | 0,30  | 0,75   | 23,72             | 59,66  | 75,84      | 420,85 | 211,43            | 1110,53 |
| DI 26.2  | ceramica             |       |        |                   |        | 75,84      | 420,85 | 211,43            | 1110,53 |
| DI 26.4  | laterizi             | 1,74  | 1,74   | 4,37              | 4,37   | 77,58      | 422,59 | 215,80            | 1114,89 |
| DI 26.5  | cemento              | 0,35  | 6,34   | 0,89              | 15,94  | 77,93      | 428,92 | 216,69            | 1130,83 |
| DI 26.6  | manufatti cemento    |       |        |                   |        | 77,93      | 428,92 | 216,69            | 1130,83 |
| DE 21    | cartario-pulp        | 3,54  | 42,44  | 8,90              | 106,76 | 81,47      | 471,37 | 225,59            | 1237,59 |
| DJ 27+28 | petrolchimico        | 12,43 | 12,43  | 31,25             | 31,25  | 93,90      | 483,79 | 256,85            | 1268,84 |



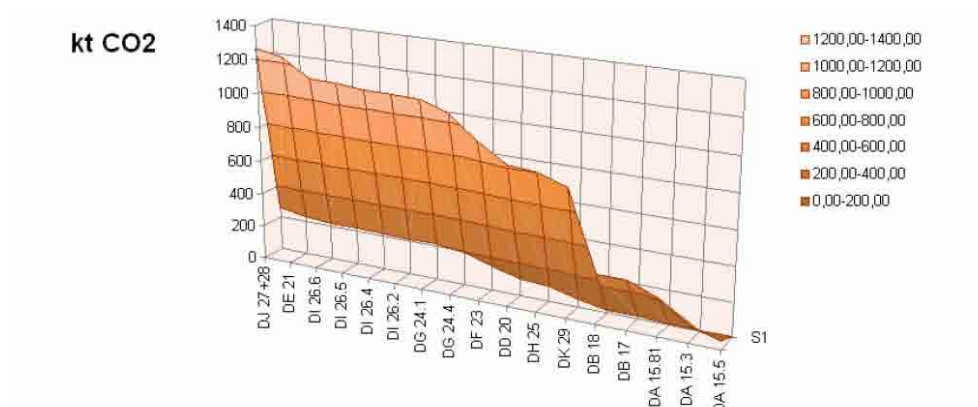


Figura 144. Risparmio cumulativo di emissioni di CO<sub>2</sub> (kt) nel più cautelativo degli scenari (SC1: una sola tecnologia applicata per settore, che presenta altresì il più piccolo impatto sui valori di emissione) e nello scenario SC2 (scenario rappresentato dall'applicazione - sempre di una sola tecnologia - ma quella con le migliori performance ambientali su tutti i settori in contemporanea)

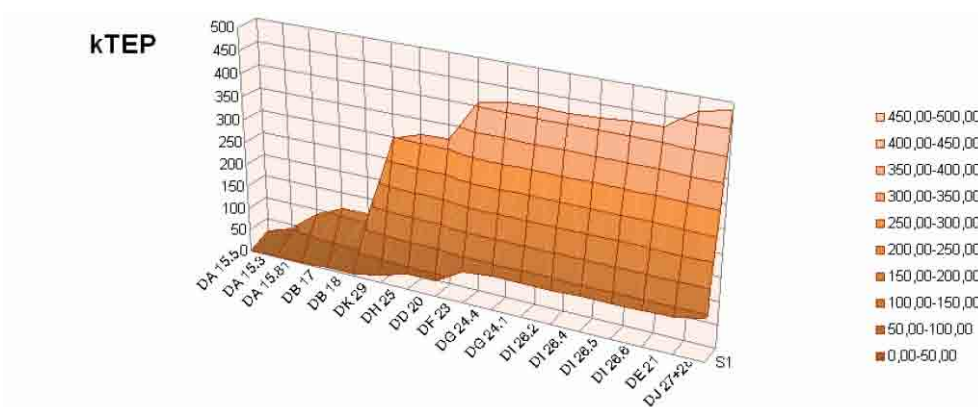


Figura 145. Risparmio cumulativo di energia primaria (ktep) nel più cautelativo degli scenari (SC1: una sola tecnologia applicata per settore, che presenta altresì il più piccolo impatto sui valori di risparmio energetico) e nello scenario SC2 (scenario rappresentato dall'applicazione della tecnologia con le migliori performance energetiche su tutti i settori in contemporanea)

Questi valori sono compresi tra 35-456 ktCO<sub>2</sub> (vedi Tabella 79 e Figura 146) e 14-181 ktep (vedi Tabella 79 e Figura 147) di energia primaria, il limite superiore -sebbene rappresenti ancora un valore di estrema cautela- corrisponde ad evitare l'entrata in esercizio di una nuova centrale a ciclo combinato da oltre 300 MW.

Tabella 79. Sintesi dei risparmi e benefici ambientali (valore min max delle singole elettrotecnologie considerate) per il settore terziario. Valori di riferimento per le Figure 147 e 148

|        |                         | ktep |       | ktCO <sub>2</sub> |        | CUMULATIVI |        |       |        |
|--------|-------------------------|------|-------|-------------------|--------|------------|--------|-------|--------|
|        |                         | min  | MAX   | min               | MAX    | min        | MAX    | min   | MAX    |
| G51    | terziario-grande distr. | 0,55 | 87,90 | 1,38              | 221,09 | 0,55       | 87,90  | 1,38  | 221,09 |
| H55    | terziario alberghi      | 6,65 | 6,65  | 16,72             | 16,72  | 7,19       | 94,55  | 18,09 | 237,81 |
| J      | terziario uffici        | 0,94 | 6,55  | 2,35              | 16,48  | 8,13       | 101,10 | 20,44 | 254,28 |
| N 85.1 | terziario-ospedali      | 5,69 | 80,35 | 14,31             | 202,11 | 13,82      | 181,45 | 34,76 | 456,39 |

kt CO<sub>2</sub>

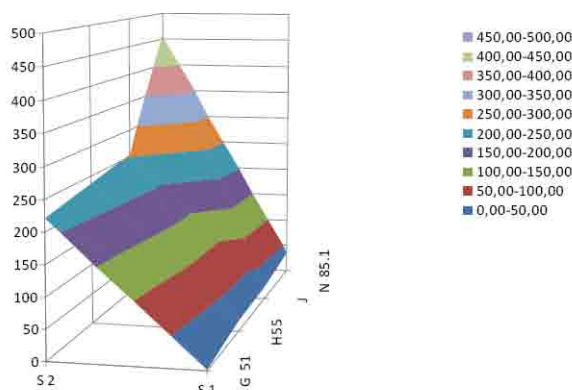


Figura 146. Risparmio cumulativo di emissioni di CO<sub>2</sub> (kt) nel più cautelativo degli scenari (SC1: una sola tecnologia applicata per settore, che presenta altresì il più piccolo impatto sui valori di emissione) e nello scenario SC2 (scenario rappresentato dall'applicazione della tecnologia con le migliori performance ambientali su tutti i settori in contemporanea)

kTEP

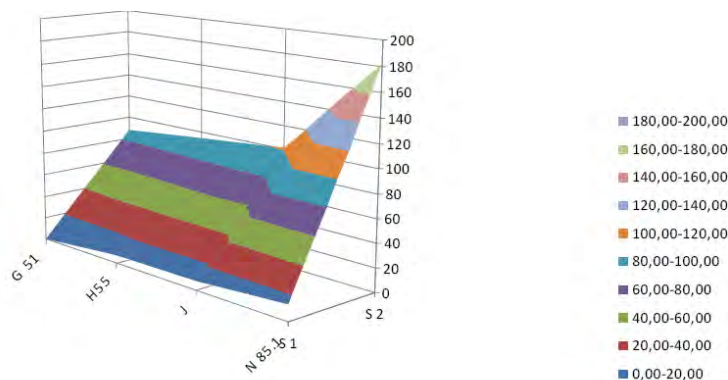


Figura 147. Risparmio cumulativo di energia primaria (kTEP) nel più cautelativo degli scenari (SC1: una sola tecnologia applicata per settore, che presenta altresì il più piccolo impatto sui valori di risparmio energetico) e nello scenario SC2 (scenario rappresentato dall'applicazione della tecnologia con le migliori performance energetiche su tutti i settori in contemporanea)

Lo studio svolto dall'Università degli Studi di Pavia è stato integrato con l'identificazione delle principali barriere alla diffusione delle tecnologie oggetto di studio. L'analisi delle barriere ha individuato tre principali categorie:

1. per le macchine ed attrezzature contenenti all'interno tecnologie ed attuatori elettrici, la possibilità di usare l'analisi del costo nel ciclo di vita come parametro di scelta dai prodotti di qualità, si scontra con la situazione che i componenti elettrici interni sono acquistati OEM (operated engineering manufacturing) da chi li assembla nel prodotto finito. L'assemblatore tende a scegliere i prodotti più economici anche perché le specifiche della macchina riguardano in genere le prestazioni e non i consumi, tanto meno quelli dei singoli attuatori;
2. per gli acquisti di componenti elettrici, di dimensioni tali da non costituire investimenti, rilevanti, la richiesta di acquisto viene processata dall'ufficio acquisti; quest'ultimo ha sempre limiti di budget, quindi compra i prodotti meno costosi, anche perché non dispone di una procedura per addebitare ad altre risorse gli extracosti dei prodotti di qualità, anche se i benefici attesi sono rilevanti;
3. molto spesso i prodotti di alta qualità non sono disponibili a magazzino dal fornitore, per mancanza di richiesta dei clienti nel passato il fornitore non si è sensibilizzato sul tema, anzi cerca di ridurre il valore delle scorte; spesso prodotti a catalogo sono disponibili solo in tempi lunghi, spesso dall'estero importiamo solo le serie più economiche e dozzinali.

È stata eseguita un'analisi approfondita ed integrata di queste barriere e dei possibili strumenti e strategie di intervento, verificando gli aspetti legati a:

- la tendenza alla replicazione delle soluzioni standardizzate, con la conseguente riduzione della complessità e del costo dei magazzini e la mancata valorizzazione delle tecnologie informatiche

strumentali e di modellazione dei processi che consentono di scegliere i componenti e le soluzioni più adatte per ogni singola esigenza e portano ad un inevitabile sovradimensionamento;

- le forniture da terzi, che comportano in genere acquisti diretti solo per motori e componenti di dimensioni rilevanti, con specifiche preparate dall'utilizzatore, mentre nella maggior parte dei casi si ordina una macchina o un impianto lasciando al fornitore la scelta dei componenti, richiedendo solamente garanzia di prestazioni a pieno carico e di flessibilità;
- l'esigua disponibilità sul mercato dei componenti di qualità.

È infine proposta una visione di sistema ed una strategia di intervento che contempla anche l'analisi LCC e ne propone un caso esempio applicato ai motori.

## **A2. Tecnologie relative a sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e sistemi integrati con sistemi per la produzione del calore e del freddo nelle applicazioni industriali e del terziario**

L'attività oggetto della collaborazione congiunta di ENEA, del Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia (DIEM) dell'Università di Bologna, del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara e della Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE), ha portato alla redazione di un rapporto tecnico che raccoglie i risultati della ricognizione delle tecnologie innovative ed efficienti nei sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e nei sistemi integrati con unità a pompa di calore nelle applicazioni industriali e del terziario.

In particolare le attività hanno portato ai seguenti prodotti finali:

- 1) analisi della diffusione dei sistemi di cogenerazione nei Paesi europei con particolare riferimento al caso italiano.  
Tale indagine ha evidenziato come si posizioni l'Italia nei confronti degli altri paesi europei (seconda per produzione totale elettrica da cogenerazione dopo la Germania) e quali siano i settori civili ed industriali nei quali la cogenerazione ha avuto diffusione. Da tale analisi emergono sia i settori di maggior sviluppo futuro, che le taglie degli impianti cogenerativi per i quali è prevista una maggior richiesta (inferiori ai 10 MW elettrici).
- 2) il quadro normativo/legislativo mondiale, con particolare attenzione alla realtà europea ed italiana.  
Dopo un breve excursus storico, vengono presentate le condizioni previste dalle normative vigenti e future per il riconoscimento della cogenerazione come una tecnologia "ad alto rendimento", ovvero in grado di far risparmiare combustibile, sia fossile che di altra natura. Vengono quindi analizzate in dettaglio la delibera AEEG 42/02 e i successivi aggiornamenti, e la direttiva n. 2004/8/CE del Parlamento e del Consiglio europeo con le relative decisioni collegate n. 2007/74/CE e n. 2008/952/CE, mettendole a confronto tra loro. Vengono inoltre presentati i benefici previsti per la cogenerazione "ad alto rendimento" sia in Italia che nel resto dell'Europa, evidenziando in particolare il meccanismo dei certificati bianchi e verdi e le agevolazioni fiscali.
- 3) Ricognizione delle tecnologie elettriche innovative a combustibile per la cogenerazione sotto i 10 MVA, con particolare riferimento a quelle sotto un MW elettrico.  
Le tecnologie consolidate ed innovative nel campo della cogenerazione di piccola taglia (< 10MVA), dove per "innovativo" si intende sia una tecnologia "nuova", sia una tecnologia energeticamente efficiente ed innovativa nell'applicazione al settore o al processo produttivi, che sono state analizzate nello svolgimento della presente attività, sono sintetizzate nella Tabella 80; in tale tabella è evidenziato anche il livello di sviluppo tecnologico e la diffusione di ciascuna tecnologia.

In particolare, l'attività di ricognizione ha riguardato l'analisi delle tecnologie dal punto di vista delle caratteristiche funzionali, dei componenti essenziali e delle prestazioni energetiche ottenibili, raccogliendo informazioni e dati tecnici e commerciali; in primo luogo, sono state raccolte informazioni relative alle taglie di macchine in commercio, ai rendimenti elettrici dichiarati dai costruttori, alle quantità di calore disponibili per il recupero termico, alle caratteristiche di qualità dell'energia termica disponibile.

Inoltre, sono state esaminate le prestazioni cogenerative alla luce della normativa vigente in Italia e sono state considerate, in virtù dell'energia termica disponibile, le più idonee applicazioni cogenerative, evidenziando, per determinate applicazioni, i limiti relativi alla qualità dell'energia termica utilizzabile dalle utenze. L'indagine ha anche riguardato l'analisi delle prestazioni al variare del carico ed al variare delle condizioni ambientali. Sono stati individuati, per ciascuna tecnologia, i principali combustibili impiegati, ponendo in luce le potenzialità e le problematiche legate sia alla principali specie di inquinanti, sia all'utilizzo di combustibili alternativi. Infine sono state raccolte informazioni relative alle modalità di connessione e di esercizio delle macchine in questione e relative all'affidabilità, ai costi medi di manutenzione ed al livello di diffusione. Oltre all'acquisizione di quanto già esiste nel mercato, sono stati individuati i settori e le applicazioni di maggiore penetrazione o con potenziale di

futura penetrazione delle elettrotecnologie, evidenziando sia il livello di maturità tecnologica che il livello di diffusione (Tabella 80).

Tabella 80. Tecnologie per la cogenerazione

| Tecnologia                                     | Combustibile                                               | Tecnologia (1) | Diffusione (2) |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Motori alternativi a combustione interna (MCI) | Gas naturale, gasolio                                      | C              | *****          |
|                                                | Biogas e biocarburanti                                     | C              | ****           |
|                                                | Oli vegetali                                               | D              | ***            |
| Turbine a gas di medio-piccola (1-10 MWe)      | Gas naturale                                               | C              | *****          |
|                                                | Biogas                                                     | D              | ***            |
| Micro turbine a gas (MTG)                      | Gas naturale                                               | C              | ***            |
|                                                | Biogas                                                     | D              | **             |
| Impianti con turbine a vapore                  | Combustibili fossili, rifiuti e biomasse di natura diversa | C              | *****          |
| Cicli Rankine a fluido organico (ORC)          | Combustibili fossili e biomasse                            | C              | ***            |
| Micro-cicli Rankine                            | Combustibili fossili e biomasse                            | D              | -              |
| Cicli combinati                                | Gas naturale                                               | C              | **             |
|                                                | Biogas                                                     | D              | *              |
| Motori Stirling                                | Combustibili fossili, biomasse                             | D              | -              |
| Celle a combustibile (FC)                      | Idrogeno, metanolo, gas naturale, gpl                      | P              | -              |
| Termo-fotovoltaico (TPV)                       | Combustibili fossili, biomasse                             | P              | -              |

(1) "C" consolidata, "D" disponibile, "P" a livello di prototipo  
 (2) da una a cinque asterischi in base alla diffusione

- 4) Ricognizione delle tecnologie elettriche e non elettriche per la produzione del freddo e del caldo integrabili con i sistemi cogenerativi.
- La complessità della richiesta di energia da parte delle utenze (elettricità, calore ed eventualmente freddo), oltre ad poter essere soddisfatta mediante tecnologie cogenerative che utilizzano combustibili di diversa natura, può essere integrata utilizzando tecnologie ausiliarie, ad azionamento elettrico e non elettrico, per la produzione del caldo e del freddo, come schematizzato in Figura 148.

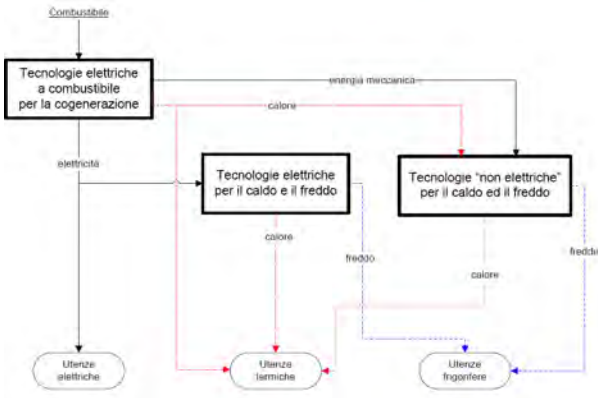


Figura 148. Integrazione delle tecnologie per la cogenerazione con le tecnologie elettriche e non elettriche per la produzione del caldo e del freddo

Le tecnologie ad azionamento elettrico e non elettrico per la produzione del caldo e del freddo analizzate nello svolgimento della presente attività sono sintetizzate nella Tabella 81, che evidenzia anche il livello di sviluppo tecnologico e la diffusione di ciascuna tecnologia.

L’attività di ricognizione ha riguardato l’analisi delle tecnologie dal punto di vista delle caratteristiche funzionali, dei componenti essenziali e delle prestazioni ottenibili, in termini di efficienza di trasformazione dell’energia in ingresso (elettrica o meccanica) in energia termica o frigorifera, raccogliendo informazioni e dati tecnici e commerciali.

**Tabella 81. Tecnologie elettriche e non elettriche per il caldo e per il freddo**

|                                          | Tecnologia (1) | Diffusione (2) |
|------------------------------------------|----------------|----------------|
| <b>Tecnologie per il caldo</b>           |                |                |
| Pompe di calore ad azionamento elettrico | C              | *****          |
| Pompe di calore ad azionamento meccanico | C              | ****           |
| Pompe di calore ad assorbimento          | C              | **             |
| <b>Tecnologie per il freddo</b>          |                |                |
| Frigoriferi ad azionamento elettrico     | C              | *****          |
| Frigoriferi ad azionamento meccanico     | C              | ****           |
| Frigoriferi ad assorbimento              | C              | ***            |
| Dessiccant cooling                       | D              | *              |

5) Barriere alla diffusione della piccola cogenerazione.

Sono state analizzate le barriere alla diffusione degli impianti di cogenerazione, in particolare quelli di piccola taglia, derivanti sia dalle difficoltà che possono incontrare gli utilizzatori per ottenere i benefici previsti, sia dalle difficoltà dei venditori per assistere gli utenti nell'apprendere come adattare il generatore alle proprie esigenze. Sono stati analizzati vari aspetti, dall'influenza del fattore di carico (importanza di raggiungere un elevato fattore di carico annuale e di utilizzare entrambe le due forme di energia prodotta), alla carenza di competenze tecniche degli utenti che necessita di assistenza esterna, anche per quanto riguarda le procedure autorizzative (oggi peraltro semplificate rispetto al passato). Le possibili linee di soluzione per favorire la diffusione della cogenerazione di piccola taglia sono:

- i promotori non debbono farsi prendere la mano dalle potenzialità delle varie nicchie di utenza e dai clienti entusiasti che spesso portano a disperdere le forze, ma devono razionalizzare l'offerta e selezionare la domanda;
- se si decide di affrontare il mercato partendo da poche nicchie, occorre avere prodotti ingegnerizzati per esse, selezionando taglie abbastanza alte da giustificare i costi di commercializzazione e assistenza;
- i ministeri (in primo luogo il MEF) e gli organismi competenti debbono modificare le procedure per l'esazione della fiscalità in modo da semplificare il meccanismo di controllo e le procedure di gestione delle varie accise;
- la diffusione per il largo pubblico delle utenze domestiche è fattibile solo in stretta collaborazione con strutture operanti nella fornitura dei servizi, in particolare distributori di elettricità e/o gas, o ESCO.

6) Sviluppo del software "Easy Trigen" per l'analisi energetico-economica di sistemi trigenerativi

L'attività ha riguardato la realizzazione, in ambiente Visual Basic con interfaccia Excel, di un software capace di valutare la convenienza energetico-economica di un sistema cogenerativo in soddisfazione di un'utenza anche trigenerativa, caratterizzata da fabbisogni elettrici, termici e frigoriferi variabili nel tempo. In particolare il software è in grado di ricostruire gli andamenti orari dei fabbisogni energetici sulla base dei consumi mensili stimati e del tipo di utenza servita; tali andamenti orari vengono utilizzati dal software per valutare la convenienza energetica (in termini di risparmio di combustibile primario) ed economica (in termini di tempi di ritorno degli investimenti e flussi di cassa) di un'installazione cogenerativa anche complessa (tecnologie per la produzione elettrica a combustibile, ovvero i cosiddetti "motori primi", integrate con tecnologie per la produzione del freddo e del caldo). Il software è dotato di un apposito database contenente le principali informazioni tecnico-economiche sulle tecnologie commercialmente disponibili, nonché sul contesto tariffario e fiscale dell'attuale mercato elettrico e dei combustibili.

**A3. Elettrotecnologie innovative (altre) nelle applicazioni industriali e del terziario**

L'attività oggetto della collaborazione tra l'ENEA e la Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE), ha per risultato finale un rapporto tecnico sulla "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali": il documento raccoglie i risultati della commessa data da ENEA a FIRE, che ENEA mette a disposizione per la pubblica fruizione da parte del vasto pubblico.

Il rapporto raccoglie l'analisi delle potenzialità dell'elettricità per rispondere alle necessità energetiche del sistema Italia valutando le possibilità di penetrazione del vettore elettrico nel soddisfacimento dei bisogni finali, anche in sostituzione di altri vettori energetici ed in particolare di quelli termici.

L'attenzione è stata rivolta in una prima parte ad individuare le motivazioni della crescente penetrazione dell'elettricità negli usi finali, dall'altra dalle prospettive offerte da impieghi innovativi dell'elettricità. Sono state analizzate tecnologie già presenti nel mercato sia pure in nicchie limitate rispetto alle potenzialità e si è cercato di individuare i fattori che possono giustificare una forte espansione delle stesse; l'analisi è stata più approfondita su alcune tecnologie già piuttosto diffuse per le quali erano già più disponibili valutazioni sugli effetti di una loro espansione.

Particolare attenzione è stata data alle interazioni fra il sistema delle reti elettriche e delle rete gas per l'analisi delle potenzialità comparative fra la generazione diffusa mediante cogenerazione e le pompe di calore ad alimentazione elettrica, segnalando sia i punti critici che le possibilità di sinergia. Sono stati poi individuati otto settori di maggior interesse applicativo, di vario livello di innovatività, per i quali si prevede una forte espansione nei prossimi anni.

Lo studio si compone delle seguenti parti:

- l'analisi della penetrazione degli usi elettrici, che partendo dal quadro, anche storico, di penetrazione dei consumi elettrici negli usi finali e analizzando le motivazioni che hanno condizionato la penetrazione dell'elettricità negli ultimi decenni e particolarmente nei recenti anni 2000, fornisce le motivazioni per una ulteriore penetrazione dell'elettricità negli usi finali. Tali motivi sono i seguenti:
  - la crescita di efficienza del parco termoelettrico continuerà ancora per un certo numero di anni, con sempre maggiori capacità di sostituire usi termici e ridurre il consumo di fonti primarie;
  - la possibilità di diversificare le fonti primarie, utilizzando per generare elettricità carbone, nucleare, rifiuti urbani, frazioni petrolifere pesanti, tutte fonti non impiegabili da consumatori piccoli e medi;
  - il miglior controllo delle emissioni nelle grandi centrali di generazione elettrica, sostituendo le emissioni localizzate, nella fase di utilizzo dei combustibili;
  - la necessità di diffondere sempre più capillarmente il trattamento degli effluenti liquidi e gassosi anche nelle PMI e nel settore civile (impianti di taglia ridotta richiedono automazione sempre più spinta);
  - la necessità di far evolvere i processi di depurazione da interventi end-of-pipe ad interventi selettivi di valorizzazione di quanto recuperato.

Tutti questi motivi giustificano, oltre ad una attività di marketing delle imprese elettriche, una attività di supporto tecnico scientifico per individuare e promuovere usi dell'elettricità innovativi che si dimostrino economicamente validi per il Paese e per i consumatori. In questo quadro l'utilizzo dei fondi della Ricerca di Sistema che, per le applicazioni già note, è ammesso solo per la promozione di miglioramento dell'efficienza degli apparati o per una migliore integrazione nella rete fra generazione e consumo, per le applicazioni innovative è giustificato anche per azioni dimostrative di apertura di nuovi spazi di mercato.

Il termine innovazione va inteso in senso lato, sia riferito alle tecnologie di base (ad esempio i nuovi processi per produrre ozono), sia alla applicazione in un certo settore di utenza (ad esempio l'uso dell'ozono per depurazione di acque di scarico), sia infine per lo sviluppo di sistemi integrati in specifici processi (ad esempio l'impiego di ozono per il riciclaggio delle acque di lavaggio in impianti di lavanderia industriale).

Abbiamo quindi motivazioni di tipo tecnologico e motivazioni di tipo economico- organizzativo. Dal punto di vista tecnologico interessano sia quelle applicazioni che risolvono i problemi non affrontabili in altro modo (ad esempio il rimescolamento del vetro fuso nei forni da vetro) che quelle applicazioni ove è maggiore il risparmio di energia primaria rispetto ai processi termici (ad esempio l'essiccazione interna a microonde di corpi di un certo spessore, quali le rocche di filato dopo la tintura).

Dal punto di vista tecnico – organizzativo interessano sia i settori con maggiori potenzialità di applicazione, sia settori di forte rilevanza per l'Italia, per i quali le tecnologie elettriche possono costituire un elemento di particolare utilità. Parallelamente interessano tecnologie per le quali esistano in Italia imprese manifatturiere o società di ingegneria o istituti universitari o stazioni sperimentali che possano ricevere un rilevante contributo alla loro competitività sui mercati.

Purtroppo l'Italia ha una limitata strutturazione dei settori produttivi per attività sperimentali e di messa a punto di tecnologie specifiche, così come ormai mancano grandi industrie capaci di portare al successo una tecnologia innovativa; in queste condizioni le innovazioni nascono piuttosto dal basso, dagli utenti piuttosto che dai laboratori, trovando poi grandi difficoltà per affermarsi sul mercato. Questa linea di attività della

Ricerca di Sistema può costituire un utile strumento di stimolazione delle imprese e di strutturazione delle loro richieste al mondo della ricerca e della sperimentazione.

- la ricognizione delle tecnologie basata, pur con gli ampi margini di discrezionalità di ogni classificazione, su una omogeneità delle applicazioni e non delle tecniche. Nella presentazione delle varie tecnologie si è scelto di dare maggior enfasi a quelle meno note o di più recente sviluppo piuttosto che a quelle tecnicamente più assodate. Sono state anche presentate tecnologie di nicchia, purché già verificate a livello di impianti pilota, perché esse possono dare un'idea più ampia di quali possono essere le tecnologie e le applicazioni che si affacciano verso il mercato, interessando così sia le tecnologie in cerca di applicazioni sia le applicazioni in cerca di tecnologie. Sono di interesse anche le innovazioni di rilevanza scientifica limitata, ma di forte contenuto tecnico (ad esempio l'utilizzo del calore del terreno per le pompe di calore).

Le tecnologie analizzate sono state schematizzate nelle seguenti grandi famiglie:

A) Tecnologie meccano-elettriche: queste tecnologie sfruttano la capacità dell'elettricità di trasformarsi in energia meccanica per applicazioni innovative di per sé o innovative per il settore nel quale si opera; rientrano fra queste tecnologie esempi molto distanti tra di loro, come ad esempio:

- 1) la pompa di calore e la ricompressione meccanica del vapore;
- 2) la pompa elettromagnetica;
- 3) le tecniche separative;
- 4) la cottura a secco delle farine alimentari;
- 5) i processi ad alta pressione;
- 6) gli impieghi della CO<sub>2</sub> supercritica;
- 7) il taglio a getto d'acqua ad alta pressione;
- 8) la liofilizzazione;
- 9) l'accumulo di frigoriferi.

B) Tecnologie di riscaldamento senza combustione e/o trasferimento di energia a distanza: questo gruppo comprende tecnologie molto differenti tra loro come ad esempio:

- 1) il riscaldamento resistivo ad effetto joule;
- 2) le tecnologie di riscaldamento ad induzione;
- 3) la torcia al plasma;
- 4) l'irraggiamento con particelle ionizzanti;
- 5) le tecnologie basate sull'impiego delle radiofrequenze e delle microonde;
- 6) gli ultravioletti;
- 7) l'impiego di infrarosso per riscaldamento radiante;
- 8) i campi elettrici pulsati;
- 9) i ricoprimenti superficiali o riporti superficiali;
- 10) il LASER.

C) Tecnologie elettrochimiche: si tratta di tecnologie per la produzione localizzata di sostanze molto reattive, ad esempio:

- 1) la produzione di ozono per il trattamento di riciclo di acque di scarico;
- 2) l'elettrolisi dell'acqua;
- 3) l'elettrolisi dell'acqua;
- 4) i LED;
- 5) il controllo della trasparenza delle vetrate.
- 6) D) Tecnologie interne alle attività di sviluppo del settore elettrico:
- 7) l'informatica diffusa;
- 8) le apparecchiature portatili;
- 9) le nanotecnologie.

D) Tecnologie interne alle attività di sviluppo del settore elettrico:

- 1) l'informatica diffusa;
- 2) le apparecchiature portatili;
- 3) le nanotecnologie.

- i limiti e le principali barriere all'applicazione (e quindi alla vasta diffusione) delle tecnologie considerate interessanti.



A causa dei ritardi nell'avviamento della parte aperta agli operatori del Programma di Ricerca sul Sistema Elettrico, queste barriere non sono state esaminate né con le Associazioni di Categoria né con gli operatori leader nei vari settori di utenza, così come era stato inizialmente ipotizzato; si è ritenuto opportuno prima sospendere tale confronto e poi rinviarlo in attesa di chiarimenti sui futuri Piani. Le valutazioni si basano così sia sulle esperienze personali degli autori, sia sui contatti pluriennali con gli operatori esterni, con i ricercatori ENEA più impegnati nelle varie tecnologie, con gli esperti ENEA coinvolti nelle attività di Agenzia e sui temi dei Titoli di Efficienza Energetica ed infine con alcuni pochi operatori esterni con i quali si è ritenuto possibile, nell'attuale contesto, approfondire le questioni.

L'analisi punta ad individuare i grandi fattori esterni ed interni di ostacolo, così come le forze economiche, istituzionali, politiche che, sentendosi danneggiate nel ruolo e nel mercato possono efficacemente opporsi alla diffusione di tecnologie energeticamente di migliori prestazioni.

Le tecnologie considerate interessanti di cui si è provveduto all'analisi delle principali barriere alla diffusione sono le pompe di calore e ricompressione meccanica del vapore, e le tecniche separative, limitandosi ad analizzare, per queste ultime, gli aspetti non trattati nel rapporto "Le tecnologie separative mediante membrana", già concluso precedentemente. In particolare, per quanto riguarda le pompe di calore e ricompressione meccanica del vapore, si sono analizzati gli aspetti tecnici e istituzionali, le forze presenti nel mercato (del gas e dell'elettricità) e gli aspetti legati alla competizione, le interazioni con la rete di distribuzione, per arrivare ad una analisi puntuale della competizione ed integrazione fra cogenerazione distribuita e pompe di calore elettriche alimentate dalla rete. Infatti, con la disponibilità attuale di cogeneratori di piccola taglia, limitata a motori a gas e microturbine, con rendimento attorno al 30%, l'utilità della cogenerazione per le applicazioni nel settore civile in particolar modo residenziale, specie per i nuovi edifici con riscaldamento a bassa temperatura viene messa drasticamente in discussione rispetto ad una pompa di calore alimentata da rete che utilizzi acqua di falda.

Considerando infatti che l'elettricità generata dal parco di impianti italiani abbia un'efficienza, per un utente in bassa tensione attorno al 43%, mentre il cogeneratore genera netto (tolta gli ausiliari) attorno al 28% di elettricità e 50% di calore; la rete genera circa 15 punti percentuali di più del motore, basta allora un COP medio della pompa di calore attorno a 3,5 - 4, possibile usando acqua di falda, per mettere a disposizione lo stesso calore (anche se a temperatura più bassa) recuperato dalla cogenerazione.

Naturalmente, non è proponibile una promozione diffusa delle pompe di calore elettriche senza considerare la necessità di ristrutturare le reti di distribuzione; su questi presupposti, una soluzione ottimale basata sullo sfruttamento delle infrastrutture già esistenti è legata alla diffusione di impianti di cogenerazione alimentati a gas, impiegati nel comando diretto (meccanico) di pompe di calore.

Solo l'arrivo sul mercato di celle a combustibile con garanzia di affidabilità, a prezzi di mercato, potrà ridare alla micro cogenerazione una sua definita maggiore prestazione, altrimenti occorre accoppiare cogenerazione e pompa di calore. I risultati di questa analisi giustificano e rafforzano la scelta di aver svolto uno studio di approfondimento su *"Le tecnologie innovative ed efficienti nei sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e nei sistemi integrati con unità a pompa di calore nelle applicazioni industriali e del terziario"*.

- le prospettive e lo sviluppo delle applicazioni, basando la valutazione sulle tre considerazioni:
  - il grado di innovazione della tecnologia rispetto a quella tradizionale sostituita, innovazione che ha aspetti sia economici che energetici che prestazionali;
  - la dinamica di sviluppo del settore di utenza, riferendosi alla sua crescita sia quantitativa che qualitativa, per valutare sia la potenzialità di penetrazione, che le dimensioni globali degli impieghi potenziali;
  - le barriere sia dirette (normative ed economiche) che indirette (disponibilità di competenze, capacità organizzativa, supporti tecnologici) nella fase di adattamento al contesto sociale ed economico.

Queste analisi si sono basate su valutazioni dirette dalla FIRE, sia pur con supporto di inchieste fra esperti all'interno della rete dei tecnici nominati responsabili per l'uso razionale dell'energia e fra i soci della Federazione, senza estendere questa indagine sulle tecnologie fuori dal contesto FIRE e del contesto ENEA, a seguito del mancato avviamento della sezione di attività sulla ricerca del settore elettrico destinata a coinvolgere le imprese attraverso bandi.

- l'individuazione delle tecnologie e settori di maggiore interesse applicativo nei prossimi 15 / 20 anni, eseguita sulla base delle tendenze di espansione dei consumi di elettricità e delle previsioni di potenzialità applicativa; le tecnologie individuate sono:

1. le lampade a LED per l'illuminazione all'interno degli edifici residenziali, industriali e dei servizi;

2. le pompe di calore con utilizzo del calore del terreno nel settore residenziale e nel settore dei servizi;
3. le tecnologie degli stand-by degli elettronici di consumo fissi e portatili;
4. i riporti protettivi superficiali;
5. i sistemi per depurazione d'acque industriali per permetterne il riciclo;
6. i sistemi ad accumulo di ghiaccio nel settore dei servizi e nelle industrie;
7. l'abbattimento delle emissioni di composti organici volatili nell'industria (COV);
8. le cucine ad induzione nel settore residenziale.

Per ciascuna di queste tecnologie sono riportati gli elementi che ne hanno giustificato la scelta e una analisi preliminare e qualitativa delle potenzialità di diffusione.

- l'approccio alle tecnologie mediante analisi LCC (Life Cycle Cost Analysis) è uno strumento economico che permette di valutare tutti i costi relativi ad un determinato progetto, dalla "culla" alla "tomba". Sono considerati e attualizzati tutti i costi, da quelli iniziali (investimenti, acquisizioni, progettazioni, installazioni), ai quelli futuri (sostituzione, manutenzione, spese energetiche, oneri finanziari), fino ad arrivare ai costi di smaltimento o di recupero. Questo permette al decisore di compiere scelte più oculate, in particolare:
  - scegliere tra più alternative, applicabili sullo stesso sistema, quella economicamente più vantaggiosa (ad esempio selezionare, per un dato edificio, il sistema di riscaldamento: caldaia vs. pompa di calore);
  - accettare o rifiutare un determinato progetto (ad esempio decidere se installare o meno un inverter);
  - specificare il valore ottimale di un progetto che generi il maggior ritorno economico (ad esempio selezionare il valore ottimale delle perdite di un trasformatore).

#### **A4. Tecnologie separative mediante membrana (TSM)**

Durante la fase iniziale di individuazione di tecnologie elettriche efficienti negli usi finali, sono stati coinvolti alcuni laboratori ENEA che da anni lavorano su specifiche tecnologie e sono diventati, insieme ai loro responsabili, riferimenti scientifici riconosciuti a livello nazionale ed internazionale. Il settore delle tecnologie separative mediante membrana (TSM) è stato individuato, anche con il coinvolgimento della FIRE e degli energy manager ad essa associati, per un primo approfondimento, sia tecnologico sia applicativo, che considerasse, tra l'altro, gli aspetti energetici legati ai processi produttivi, storicamente non trattati a livello scientifico. A valle dell'analisi preliminare del materiale selezionato, e considerando la numerosità tipologica ed applicativa delle tecnologie a membrana, si è deciso di predisporre un rapporto tecnico specifico su dette tecnologie (originariamente previsto come parte integrante del rapporto sulla "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali" di cui alla precedente attività 1.c., coinvolgendo i laboratori ENEA presenti presso il Centro Casaccia).

Lo studio è stato sviluppato da ENEA, con collaborazione interdipartimentale, supportato dal Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura (di seguito CITERA) dell'Università di Roma "La Sapienza". Le tecnologie di separazione mediante membrane (TSM), pur non essendo "elettrotecnologie" in senso stretto, necessitano principalmente di energia elettrica per il funzionamento degli ausiliari d'impianto (principalmente pompe, ecc.), e, in specifici casi, eventualmente solo in piccola parte di energia termica/frigorifera. Possono quindi lecitamente rientrare tra le tecnologie che consumano elettricità proponibili quale valida alternativa alle tecnologie termiche tradizionali (come, ad esempio, l'evaporazione termica che impiega combustibili fossili). L'efficienza della tecnologia può essere diretta, ove si ha una effettiva ed immediata riduzione dei consumi energetici (termici ed elettrici) nel confronto con le tecnologie tradizionali, o indiretta, ove hanno valenza caratteristiche di unicità ai fini produttivi o per qualità ambientali. Inoltre la loro introduzione a livello industriale su larga scala in Italia, potrebbe contribuire ad un significativo passo in avanti verso un miglior utilizzo dell'energia, più di livello scientifico che come potenziale di risparmio complessivo.

Lo studio si compone delle seguenti parti:

- una analisi del mercato delle membrane a livello internazionale e nazionale, con l'individuazione delle principali applicazioni in campo industriale nel principale mercato, gli USA (che rappresenta il modello di riferimento per queste tecnologie), dei produttori mondiali di membrane polimeriche e ceramiche, e delle principali esperienze a livello nazionale;
- una descrizione delle tecnologie, differenziate fra loro dalle specifiche della membrana impiegata e dalle condizioni di processo (come la pressione idraulica), maggiormente diffuse prendono il nome di Microfiltrazione (MF), Ultrafiltrazione (UF), Nanofiltrazione (NF) ed Osmosi Inversa (OI), come specificato nel seguente schema riassuntivo (Tabella 82), e dei fenomeni di intasamento (fouling) che ne causano una perdita di produttività;

**Tabella 82. Principali caratteristiche delle tecnologie separative mediante membrana**

|                                      | Microfiltrazione (MF)                                       | Ultrafiltrazione (UF)                                                 | Nanofiltrazione (NF)                                                   | Osmosi (OI)                                                            |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pressione di lavoro (bar)</b>     | Idrostatica 1-4                                             | Idrostatica 1-10                                                      | Idrostatica 20- 40                                                     | Idrostatica 15- 60                                                     |
| <b>Meccanismo</b>                    | filtrazione fisica                                          | filtrazione, assorbimento                                             | Solubilità/diffusione                                                  | Solubilità/diffusione                                                  |
| <b>Cut off</b>                       | 0,1-20 µm                                                   | 1 -100 kD                                                             | 100 - 250 D                                                            | 10-100 D<br>1-10 Å                                                     |
| <b>Tipo di membrana</b>              | polimerica o ceramica (simmetrica) (spessa 10-150 µm)       | polimerica o ceramica (asimmetrica) (strato di separazione: 0,1-1 µm) | polimerica (asimmetrica) o composita (strato di separazione: 0,1-1 µm) | polimerica (asimmetrica) o composita (strato di separazione: 0,1-1 µm) |
| <b>Configurazione della membrana</b> | spirale avvolta, fibre cave, tubolare, ceramica. inorganica | spirale avvolta. fibre cave, tubolari                                 | spirale avvolta, tubolare                                              | spirale avvolta. tubolare                                              |

- Le principali applicazioni ed i vantaggi/svantaggi derivanti, come riassunto nelle Tabelle 83 e 84;

**Tabella 83. Principali applicazioni delle tecnologie separative mediante membrana**

| SETTORE PRODUTTIVO              | OPERAZIONE                  | TECNICA di MEMBRANA | PERCENTO % |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------|
| Chimica fine                    | Chiarifica e purificazione  | UF-NF               | 7          |
| Alimentare                      | Chiarifica succhi           | MF                  | 6          |
| Lattiero-caseario               | Trattamento siero           | UF-OI               | 9          |
|                                 | Bonifica latte              | MF                  | 2          |
| Bevande                         | Acque minerali              | MF-UF               | 8          |
|                                 | Bibite                      | NF-OI               | 8          |
| Enologia                        | Chiarifica mosti e vino     | MF-UF               | 5          |
|                                 | Concentrazione alcool       | OI                  | 5          |
| Industria Metalmeccanica        | Trattamento bagni galvanici | OI                  | 6          |
|                                 | Separazione emulsioni       | MF-UF               | 5          |
| Industria Automobilistica       | Bagni di verniciatura       | UF                  | 9          |
| Industria Farmaceutica          | Downing stream process      | MF-UF               | 8          |
| Dissalazione- potabilizzazione. | Rimozione sodio cloruro     | OI                  | 6          |
| Potabilizzatori casa            | Addolcimento acqua          | OI                  | 6          |
| Depurazione                     | Trattamento rifiuti civili  | Membrane bioreactor | 5          |
| Altre varie                     | Concentrazione chiarifica   | MF-UF-NF-OI         | 5          |

**Tabella 84. Principali vantaggi e svantaggi derivanti dall'applicazioni delle tecnologie separative mediante membrana**

| Vantaggi                                                               | Svantaggi                                                     |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Applicabili su largo range di processi                                 | Essenziale la scelta del tipo di membrana                     |
| Processo fisico. poche parti in movimento                              | Generalmente media selettività                                |
| Semplice connessione e utilities                                       | L'intasamento è un problema comune                            |
| Processo continuo o regolabile                                         | La vita delle membrane è finita                               |
| Additivi chimici spesso non richiesti                                  | Capitale investito elevato                                    |
| Impianti modulari e compatti                                           | Richiedono operatori specializzati                            |
| Facile scale up ed integrazione con tecnologie e processi tradizionali | Non adatte per liquidi ad alta densità e fortemente intasanti |
| Le proprietà delle membrane possono essere variate                     |                                                               |
| Usate per singolo o multi-stage filtrante                              |                                                               |
| Qualità del permeato indipendente dal feed                             |                                                               |
| Consentono la standardizzazione di produzione                          |                                                               |
| Facile clearing e disinfezione in automatico                           |                                                               |
| Gestione automatica e remotizzata di processo                          |                                                               |

- il “case study” ENEA in alcuni settori produttivi (che hanno dato origine a recenti brevetti nazionali ed internazionali, alcuni dei quali richiedono ancora una dimostrazione su scala impiantistica reale): nel cartario (trattamento dei reflui, disinquinamento della carta da macero), nel comparto agro-alimentare (processo di frazionamento del siero di latte e/o della scotta nel caseario, trattamento delle acque di vegetazione olearie, valorizzazione delle foglie di ulivo, ecc.), nei settori delle acque (dissalazione, ecc.) e del trattamento dei reflui industriali più in generale, con l’acquisizione di quanto già esiste nel mercato e l’individuazione dei settori/comparti/processi a maggiore potenziale di penetrazione;
- l’analisi dei costi d’impianto e d’esercizio, e dell’incidenza delle singole voci di costo come riassunto nelle seguenti Tabelle 85 e 86;

**Tabella 85. Costi dei componenti di un impianto a membrana**

| Voci di costo                      | Incidenza (%) |
|------------------------------------|---------------|
| Pompe                              | 30            |
| Housing                            | 10            |
| Moduli a membrana                  | 20            |
| Piping, valvole, carpenteria       | 20            |
| Sistemi di regolazione e controllo | 15            |
| Altro                              | 5             |

**Tabella 86. Costi operativi degli impianti a membrana**

| Voci di costo     | Incidenza (%) |
|-------------------|---------------|
| Moduli a membrana | 35-50%        |
| Lavaggi           | 12-35%        |
| Energia           | 15-20%        |
| Manodopera        | 15-18%        |

- una metodologia di valutazione dei consumi energetici e le nuove soluzioni tecnologiche innovative che consentono, unitamente a vantaggi di processo, ridotti consumi di energia elettrica;
- l’individuazione e l’analisi delle barriere (di qualificazione e formative, commerciali, tecnologiche, normative/legislative, economiche, gestionali e finanziarie) alla diffusione delle tecnologie TSM.

## **B. Realizzazione di una banca dati settoriale, sviluppo di modelli di simulazione per valutare i potenziali di diffusione e costruzione del sito WEB**

### Creazione del data-base sulle tecnologie e del sito web

È stato progettato e costruito il sito web [www.elettrotecnologie.enea.it](http://www.elettrotecnologie.enea.it) per la diffusione dei prodotti realizzati nell’ambito del progetto. Il sito è stato realizzato con il CMS Joomla!, un CMS (*content management system*) che permette di strutturare i siti in modo dinamico, ossia consente un aggiornamento continuo dei contenuti da parte di utenti autorizzati. Gli utenti autorizzati hanno la possibilità di accedere al sito inserendo i loro “Nome utente” e “Password” dalla pagina principale (*Home*) e di aggiungere o modificare i contenuti delle sezioni per cui hanno ottenuto l’autorizzazione. Questo ha consentito ai soggetti universitari partner del progetto di accedere direttamente alle sezioni del sito i cui contenuti sono stati da loro curati. La gestione degli utenti e le attivazioni degli “Account” è riservata all’amministratore: l’amministratore del sito possiede un diritto esclusivo di gestione del sito.

Sulla base dei risultati delle attività di studio sulle elettrotecnologie di cui al precedente obiettivo intermedio A, sono stati predisposti i contenuti delle schede sulle principali tecnologie nel formato idoneo a favorire la migliore fruizione di quanto prodotto mediante l’utilizzo della rete WEB.

L’uso di Joomla! ha richiesto la strutturazione dei contenuti basandoci su 3 livelli: sezioni, categorie, articoli.

Tali contenuti sono stati poi associati ai diversi moduli contenenti altrettanti menu:

1. *“Home”*: pagina iniziale di introduzione al sito;
2. sezione *“Il progetto”*: contiene le pagine di descrizione del quadro delle attività della Ricerca di Sistema e del tema di ricerca 5.4.3.1, con gli obiettivi e le indicazioni per una migliore fruizione delle informazioni contenute nel sito;
3. sezione *“Le tecnologie”*: contiene le schede tecniche sulle tecnologie che hanno l’obiettivo di descrivere la tecnologie e di favorire l’utilizzo dei prodotti (rapporti tecnici, tool e software, altro materiale) che sono stati sviluppati e messi a disposizione degli utenti;
4. sezione *“Login”*: consente un accesso protetto da password per l’aggiornamento dei contenuti; questa funzione ha consentito agli utenti “privilegiati” partner del progetto, principalmente Istituti universitari e FIRE, di contribuire in modo diretto all’inserimento dei contenuti del sito; il controllo degli account personalizzati remoti è stato gestito e controllato a livello centrale, tali account sono stati disabilitati al termine delle attività previste dal PAR 2006; è comunque possibile attivarne dei nuovi per consentire futuri aggiornamenti e integrazioni dei contenuti del sito;
5. sezione *“Tool e software”*: consente agli utenti di scaricare i tool, in genere fogli di calcolo o veri e propri software, creati e disponibili per la libera fruizione nelle specifiche sezioni dedicate alle singole tecnologie;
6. sezione *“Rapporti tecnici”*: consente agli utenti di scaricare i rapporti tecnici elaborati nell’ambito delle attività del tema di ricerca 5.4.3.1 e resi disponibili per la libera fruizione nelle specifiche sezioni dedicate alle singole tecnologie.

Sono stati installati 2 componenti aggiuntivi che consentono il caricamento (*upload*) di file da parte dei soggetti autorizzati e permettono ai visitatori del sito di scaricare i tool ed i software messi a disposizione:

- *“Docman”*: consente di caricare file nel sito e poi di pubblicarli come elenco, oppure creare dei link direttamente nel testo;
- *“Attachment”*: consente di allegare file alla fine di un articolo.

#### **C. Identificazione di progetti dimostrativi (3-4 applicazioni) di miglioramento dell’efficienza; analisi di fattibilità e valutazione ricadute**

#### **D. Progettazione degli interventi dimostrativi (sistemi di accumulo elettrico, pompe di calore ad alta temperatura, motori elettrici ad alta efficienza), acquisizione della sensoristica**

#### **E. Modellazione degli interventi dimostrativi e sperimentazione preliminare**

Sono riportate nel seguito le attività svolte nell’ambito delle sei applicazioni individuate. Come accennato in precedenza, ciascuna di queste attività copre tutti gli obiettivi C, D, E.

##### *La micro generazione nel settore residenziale*

Per la realizzazione del presente tema di ricerca si è manifestata la necessità di effettuare una raccolta mirata delle caratteristiche tecniche delle principali tecnologie di micro cogeneratori esistenti in commercio al fine di calibrare con benchmark reali i modelli matematici sviluppati da ENEA.

Nello specifico si sono analizzate le principali tecnologie di micro cogeneratori con motore a combustione interna e con turbina esistenti in commercio, individuando, per ogni modello esaminato, le caratteristiche tecniche necessarie per il loro utilizzo nei modelli ENEA, quali potenza elettrica nominale, potenza termica nominale, portata di combustibile, emissioni ecc..

In particolare, sono state analizzate dettagliatamente le prestazioni delle macchine a carico nominale e a carico parziale (75%, 50% e 30%) riportando le principali caratteristiche energetico – ambientali: potenza elettrica, potenza termica, portata di combustibile, efficienza elettrica, efficienza termica, temperature e portate dei fumi, i livelli di emissione sonora, e di emissioni inquinanti.

Trattandosi di applicazioni cogenerative per uso residenziale si è focalizzata l’attenzione su sistemi di taglia inferiore a 300 kWe; in particolare sono state analizzate le curve di funzionamento di cinque modelli di microturbine con un range di potenza elettrica da 30 kWe a 250 kWe e di tredici modelli di motori a combustione interna (per i dettagli si rimanda al rapporto “Supporto allo sviluppo di modelli per la simulazione di impianti di

micro-cogenerazione per applicazione residenziale e terziaria: principali indicatori energetici definiti dalla normativa vigente e prestazioni a regime parziale delle principali tecnologie disponibili in commercio”).

I risultati ottenuti da questo studio, da un lato hanno consentito ad ENEA di poter calibrare e validare i propri modelli di micro-cogenerazione dinamici e stazionari, dall’altro pongono l’utente che utilizzerà i predetti modelli in fase progettuale nelle condizioni di poter scegliere con obiettività il modello da simulare in funzione delle proprie esigenze. Le microturbine sono caratterizzate da un’efficienza elettrica inferiore rispetto ai motori a combustione interna di pari taglia, nonché fortemente variabile in funzione del carico e delle condizioni ambiente. Nelle Figure 149-151 sono riportati tali andamenti.

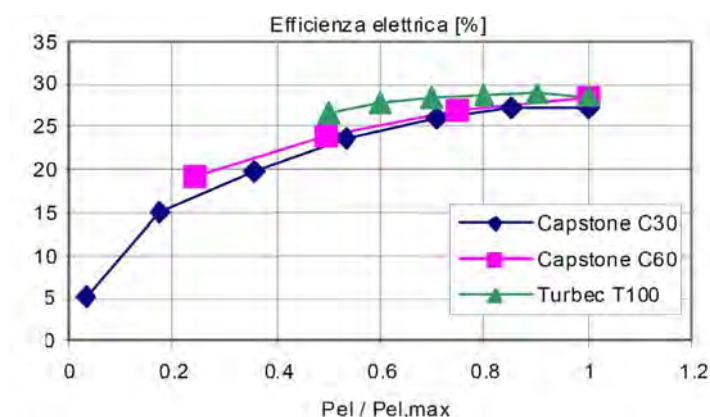


Figura 149. Efficienza elettrica delle microturbine Castone C30 e C60. Nota: entrambe le efficienze sono calcolate al lordo dell’assorbimento del compressore del gas naturale

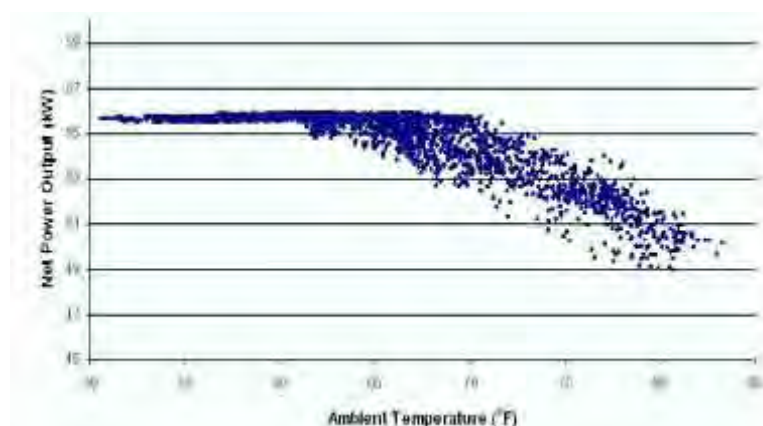


Figura 150. Effetto della temperatura ambiente sulla potenza elettrica massima

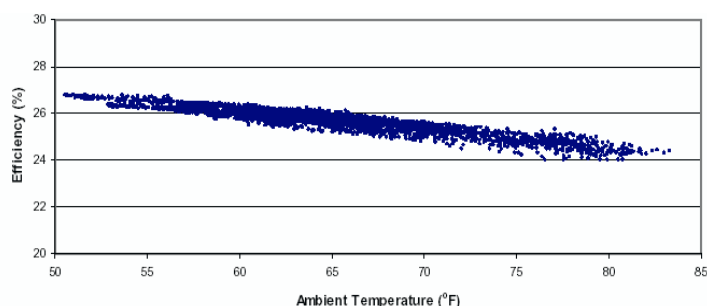


Figura 151. Effetto della temperatura ambiente sull’efficienza elettrica

Le microturbine sono spesso caratterizzate da contenuti valori di emissioni a punto nominale, ma notevolmente variabili in funzione del carico. Nelle Figure 152 e 153 sono raffigurate le emissioni delle microturbine Castone C30 e C65.

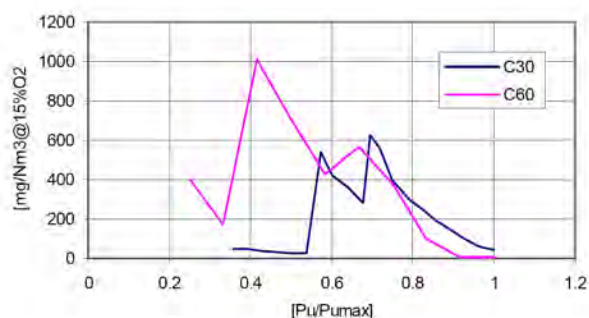


Figura 152. Andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub>

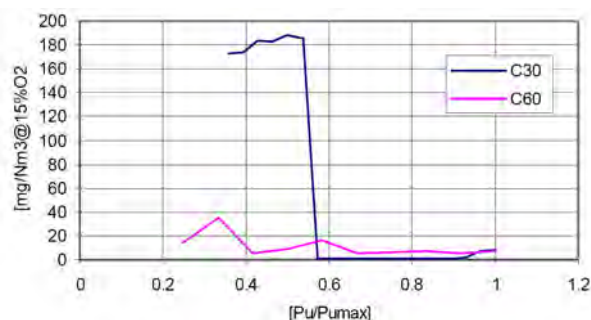


Figura 153. Andamento delle emissioni di NO<sub>x</sub>

Nonostante questi difetti, le microturbine godono di notevole interesse in quanto consentono di rientrare nei limiti imposti dalle più stringenti normative ambientali.

I motori a combustione interna esaminati sono motori a ciclo Otto ad accensione per compressione convertiti al combustibile gassoso con potenze fino a 200 kW o motori in origine progettati come motori a gas di grandi dimensioni, costruiti per applicazioni marine o industriali, con una potenza che può raggiungere i 3 MW.

Ai fini cogenerativi, le sorgenti da cui è comunemente recuperato il calore sono:

- l'olio lubrificante;
- l'acqua di raffreddamento;
- l'intercooler (per motori sovralimentati);
- i gas di scarico.

Il principale vantaggio dei motori a combustione interna risiede nella elevata flessibilità di esercizio, in quanto possono soddisfare i carichi più disparati, con contenuti rischi di interruzioni di servizio. Elevata è anche la capacità di seguire il carico con un rendimento poco variabile: i motori alternativi sono infatti in grado di mantenere anche al 50% del carico un'efficienza pari all'85% - 90% di quella nominale, rendendoli particolarmente appetibili per la generazione distribuita.

In particolare i motori in ciclo Otto sono caratterizzati da rendimenti elettrici che vanno da un minimo del 27% per le taglie più piccole, per diventare superiori al 34% per i motori da 300 kW ed arrivare fino ad un massimo del 38% per i motori da qualche MW. Il rendimento termico si mantiene attorno al 50% - 55% per tutte le taglie. In Figura 154 è mostrato uno schema a blocchi semplificato di un tipico impianto di cogenerazione con motore a combustione interna. Per un impianto di questo genere, la potenza elettrica lorda è prodotta da un generatore elettrico connesso meccanicamente all'albero motore.

All'interno dell'impianto sono presenti diversi ausiliari (compressore gas naturale, pompa per l'olio motore, pompa per l'acqua calda, ventole, sistema di elettronica di potenza), i quali concorrono ad assorbire parte della potenza lorda generata.

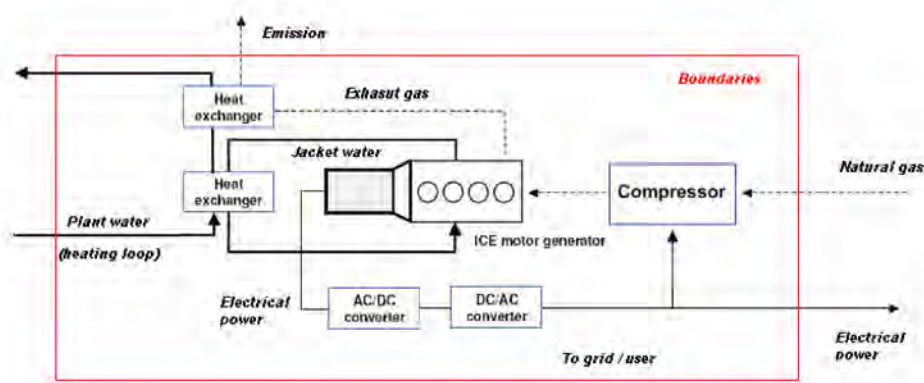


Figura 154. Schema a blocchi di un tipico impianto di micro/piccola cogenerazione con motore a combustione interna



Nel caso di un motore alternativo a combustione interna, si ha che la cogenerazione di potenza termica è associata a due distinti flussi di calore:

- potenza termica recuperabile dai gas di combustione uscenti dallo scarico ( $T > 400\text{ °C}$ );
- potenza termica recuperabile dalla refrigerazione interna del motore (acqua a temperature prossime ai  $90\text{ °C}$ ).

In particolare lo studio ha approfondito i seguenti aspetti:

### 1) Confronto fra le tecnologie

I sistemi cogenerativi sono caratterizzati da un rendimento elettrico e da un rendimento termico: di questi il primo, che dipende dal rendimento meccanico del motore e dal rendimento dell'alternatore, è il più importante in quanto influenza direttamente i costi per due diversi motivi: innanzitutto, a parità di richiesta di energia elettrica, il consumo di combustibile è tanto minore quanto maggiore è il rendimento elettrico; in secondo luogo il costo del combustibile è tanto minore quanto maggiore è il rendimento elettrico, grazie al criterio di defiscalizzazione.

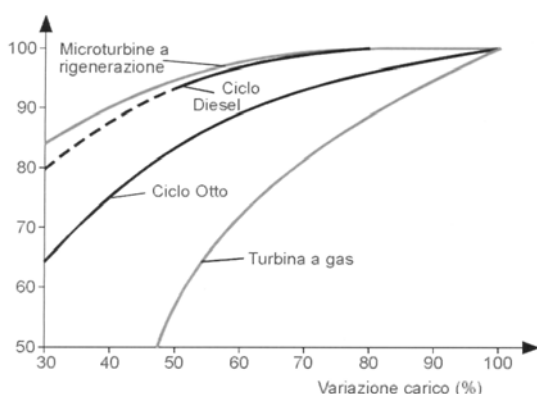


**Figura 155. Rendimento elettrico motori alternativi e turbine a gas**

La Figura 155 mostra la variazione percentuale del rendimento elettrico, a partire dal valore massimo, per i motori alternativi ad accensione per compressione e ad accensione per scintilla e per le turbine a gas.

Il valore in ascissa riporta la percentuale fornita rispetto alla massima potenza erogabile al numero di giri considerato.

Il rendimento dei motori Diesel è poco condizionato dal carico applicato: a metà potenza mantengono un rendimento superiore al 90% del valore massimo. Tuttavia questi motori non possono essere utilizzati con carico inferiore al 50% (sempre inteso rispetto al massimo erogabile a un determinato numero di giri) per periodi continuativi, pena un rapido degrado del motore.

I motori ad accensione comandata sono più sensibili, dal punto di vista del rendimento, alle variazioni di carico rispetto ai motori Diesel, ma in compenso possono funzionare senza problemi fino al 30% della potenza massima.

Il rendimento delle turbine a gas tradizionali, invece, decade rapidamente al diminuire del carico; motivo per cui i tradizionali turbogas vengono impegnati per la realizzazione di impianti di generazione centralizzati e fatti funzionare con minime oscillazioni del carico.

Diverso il discorso per le microturbine a rigenerazione dotate di inverter, utilizzate nell'ultimo decennio anche per la micro-cogenerazione. In questo caso il numero di giri dell'albero turbina - alternatore è completamente svincolato dalla frequenza della rete elettrica, perché l'energia prodotta viene convertita tramite l'inverter. Ciò permette di far funzionare la turbina sempre a un numero ottimale di giri, mantenendo elevato il rendimento anche ai carichi parziali, consentendo l'inseguimento del carico termico o elettrico delle utenze servite.

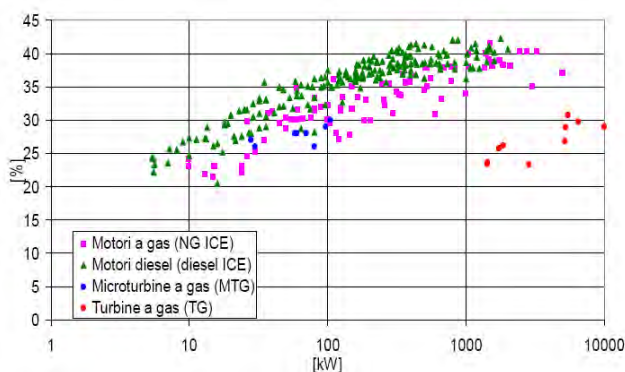


**Figura 156. Efficienza elettrica di unità di DG, punto nominale. Fonte: Datasheet**

La potenza generata ed il rendimento dei motori varia in funzione della temperatura dell'aria aspirata nei cilindri. All'aumentare della temperatura aumenta il volume specifico dell'aria: di conseguenza diminuisce il rendimento volumetrico del motore perché diminuisce la massa d'aria introdotta nel cilindro.

In Figura 156 sono riportate le efficienze elettriche nominali, in funzione della taglia, delle unità di DG attualmente in commercio, di cui sono reperibili datasheet.

Le tabelle 87 e 88 mostrano in sintesi i dati principali delle microturbine e motori a combustione interna analizzati.

**Tabella 87. Caratteristiche microturbine**

|                                                 | <b>MGT</b>                                         |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| Produttore                                      | TURBEC                                             | ELLIOTT                                                                                                                                                                                                        | CAPSTONE                                                             |              | INGERSOLL RAND                                                       |
| Modello                                         | T100                                               | TA100CHP                                                                                                                                                                                                       | C30                                                                  | C65          | MT270                                                                |
| <b>Parametri Energetici</b>                     |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| <b>Parte Elettrica</b>                          |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| Potenza elettrica nominale (kW)                 | 100                                                | 100                                                                                                                                                                                                            | 28                                                                   | 65           | 270                                                                  |
| Rendimento elettrico (% rif. PCI)               | 30.0                                               | 29.0                                                                                                                                                                                                           | 25.0                                                                 | 29.0         | 30.0                                                                 |
| Curva di efficienza elettrica                   | vedi paragrafo relativo                            | vedi paragrafo relativo                                                                                                                                                                                        |                                                                      |              |                                                                      |
| <b>Parte Termica</b>                            |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| Potenza termica nominale (kW)                   | 165                                                | 145                                                                                                                                                                                                            | 57                                                                   | 120          | 278.4                                                                |
| Efficienza termica                              | 50.0                                               | 40.0                                                                                                                                                                                                           | 50.0                                                                 | 53.0         | 30.9                                                                 |
| Temperatura acqua calda (°C)                    | 70-90                                              | 70-90                                                                                                                                                                                                          |                                                                      |              | 70-80                                                                |
| Portata acqua calda (m3/h)                      | 7.1                                                | 6.2                                                                                                                                                                                                            |                                                                      |              | 22.7                                                                 |
| Curva di efficienza termica                     | vedi paragrafo relativo                            | vedi paragrafo relativo                                                                                                                                                                                        |                                                                      |              |                                                                      |
| Potenza combustibile                            | 333                                                | 344.8                                                                                                                                                                                                          | 112.0                                                                | 224.1        | 900.0                                                                |
| Portata di combustibile (Sm3/h)                 | 34.8                                               | 37.7                                                                                                                                                                                                           | 11.7                                                                 | 23.4         | 93.8                                                                 |
| Curva portata di combustibile (regimi parziali) | vedi paragrafo relativo                            | vedi paragrafo relativo                                                                                                                                                                                        |                                                                      |              |                                                                      |
| EUF                                             | 80                                                 | 69                                                                                                                                                                                                             | 76                                                                   | 82           | 61                                                                   |
| <b>Fumi</b>                                     |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| Temperatura fumi (°C)                           | 90                                                 | vedi paragrafo relativo                                                                                                                                                                                        | 275                                                                  |              | 242                                                                  |
| Portata fumi (kg/s)                             | 0.8                                                | 0.79                                                                                                                                                                                                           | 0.31                                                                 |              |                                                                      |
| <b>Parametri Ambientali</b>                     |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| <b>Emissioni</b>                                |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| CO / electric output [mg/kWh_el]                | 216                                                | 333                                                                                                                                                                                                            | 548                                                                  | 96           |                                                                      |
| CO / thermal output [mg/kWh_th]                 | 130                                                | 241                                                                                                                                                                                                            | 274                                                                  | 53           |                                                                      |
| CO_fuel [mg/kWh_f]                              | 64.8                                               | 97                                                                                                                                                                                                             | 137                                                                  | 28           |                                                                      |
| NOx / electric output [mg/kWh_el]               | 384                                                | 525                                                                                                                                                                                                            | 86                                                                   | 127          |                                                                      |
| NOx / thermal output [mg/kWh_th]                | 230                                                | 381                                                                                                                                                                                                            | 43                                                                   | 69           |                                                                      |
| Nox_fuel [mg/kWh_f]                             | 115.2                                              | 152                                                                                                                                                                                                            | 22                                                                   | 37           |                                                                      |
| <b>Rumorosità</b>                               |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
|                                                 | 70 dBA (1m)                                        | 62 dBA (10m)<br>75 dBA (1m)                                                                                                                                                                                    | 65 dBA (10m)                                                         | 70 dBA (10m) | 83 dBA (1m)                                                          |
| <b>Tempi caratteristici</b>                     |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| Tempo warm up (min)                             |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| Tempo cooling down (min)                        |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
| <b>Web</b>                                      |                                                    |                                                                                                                                                                                                                |                                                                      |              |                                                                      |
|                                                 | <a href="http://www.turbec.com">www.turbec.com</a> | <a href="http://www.eps-energy.it">www.eps-energy.it</a><br><a href="http://www.elliottmicroturbines.com">www.elliottmicroturbines.com</a><br><a href="http://www.bowmanpower.co.uk">www.bowmanpower.co.uk</a> | <a href="http://www.capstoneturbine.com">www.capstoneturbine.com</a> |              | <a href="http://www.irenergysystems.com">www.irenergysystems.com</a> |

Tabella 88. Caratteristiche motori a combustione interna

| ICE                                             |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|--|--|--|--|--|
| ENERGIA NOVA                                    | ENERGIFERA              | CHP70                   | BAXTER       | CHP200         | CGT            | CPL CONCORDIA  | GE ENERGY       | DEUTZ          | MTU            |  |  |  |  |  |
| TA50                                            | TEMA 100-130 NG         |                         | CHP100       |                | G3408 LE       | BB60 AS VALMET | BB125 AS SCANIA | TCG 2015 V6    | GC 119 N5      |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Parametri Energetici                            |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Parte Elettrica                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Potenza elettrica nominale (kW)                 | 50                      | 100                     | 261          | 252            | 184            | 30.5           | 31.4            | 128            | 118            |  |  |  |  |  |
| Rendimento elettrico (% rif. PCI)               | 28.9                    | 34.8                    | 37.2         | 36.3           | 33.5           | 30.5           | 31.4            | 34.0           | 34.5           |  |  |  |  |  |
| Curva di efficienza elettrica                   | vedi paragrafo relativo |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Parte Termica                                   |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Potenza termica nominale (kW)                   | 95                      | 193.8                   | 143          | 282            | 271            | 120            | 170             | 210            | 189            |  |  |  |  |  |
| Efficienza termica                              | 54.5%                   | 62.2                    | 50.7         | 51.0           | 48.4           | 60.0           | 58.6            | 55.9           | 57.4           |  |  |  |  |  |
| Temperatura acqua calda (°C)                    | 88-72                   | 90-72                   | 90-75        | 90-75          | 90-70          | 85-70          | 85-70           | 85-70          | 90-70          |  |  |  |  |  |
| Portata acqua calda (m3/h)                      | 5.6                     | 10                      | 8.2          | 16.2           | 11.65          | 6.1            | 9.7             | 13.0           | 8.5            |  |  |  |  |  |
| Consumo acqua calda (m3/h)                      | 17.3                    | 31.5                    | 20.4         | 55.0           | 54.9           | 20.0           | 26.0            | 37.6           | 34.5           |  |  |  |  |  |
| Potenza combustibile (Sm3/h)                    | 18                      | 32.5                    | 21.3         | 57.7           | 57.23          | 21.1           | 30.5            | 36.6           | 35.1           |  |  |  |  |  |
| Curva portata di combustibile (regimi parziali) | vedi paragrafo relativo |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| EUJ                                             | 2045.1%                 | 84.3                    | 87.9         | 87.3           | 82.9           | 90.5           | 90.0            | 89.9           | 91.9           |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Fumi                                            |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Temperatura fumi (°C)                           | 110                     | vedi paragrafo relativo |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Portata fumi (kg/s)                             | vedi paragrafo relativo |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Parametri Ambientali                            |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Emissioni                                       |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| CO - electric output [mg/kWh_e]                 | 2005                    | 2880                    | 1108         | 1089           | 1594           | 538            | 517             | 530            | 573            |  |  |  |  |  |
| CO - thermal output [mg/kWh_th]                 | 1330                    | 2174                    | 588          | 588            | 940            | 688            | 688             | 688            | 688            |  |  |  |  |  |
| CO - fuel input [mg/kWh_th]                     | 698                     | 1102                    | 338          | 359            | 530            | 782            | 791             | 791            | 791            |  |  |  |  |  |
| NOx - electric output [mg/kWh_e]                | 1542                    | 2277                    | 967          | 967            | 1328           | 481            | 481             | 442            | 442            |  |  |  |  |  |
| NOx - thermal output [mg/kWh_th]                | 1023                    | 1637                    | 488          | 488            | 791            | 284            | 284             | 284            | 284            |  |  |  |  |  |
| NOx - fuel input [mg/kWh_th]                    | 537                     | 846                     | 239          | 239            | 442            | 159            | 159             | 159            | 159            |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Rumorosità                                      |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| 70 dB (1 m)                                     | 52 dB (1 m)             | 75 (1 m)                | <75 dB (1 m) | <80 dB (1 m)   | 52 dB (1 m)    | 52 dB (1 m)    | 52 dB (1 m)     | 52 dB (1 m)    | 52 dB (1 m)    |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Tempi caratteristici                            |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Tempo warm up (min)                             | 10                      | 10                      | 5            | 5              | 5              | 5              | 5               | 5              | 5              |  |  |  |  |  |
| Tempo cooling down (min)                        | 30                      | 30                      | 10           | 10             | 10             | 10             | 10              | 10             | 10             |  |  |  |  |  |
|                                                 |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| Web                                             |                         |                         |              |                |                |                |                 |                |                |  |  |  |  |  |
| www.energie.it                                  | www.energie.it          | www.baxterenergy.com    | www.cpl.it   | www.energie.it | www.energie.it | www.energie.it | www.energie.it  | www.energie.it | www.mtu.de/mtu |  |  |  |  |  |

## 2) Indicatori prestazionali

Al fine di verificare la rispondenza del modello dinamico di micro-cogenerazione sviluppato in ambiente Matlab/simulink con le reali condizioni di funzionamento delle macchine reali, è stata fatta una accurata analisi dei diversi indici prestazionali che devono essere valutati durante il funzionamento reale dell'impianto ai sensi della normativa vigente e suddivisi nelle seguenti categorie:

- indicatori energetici, relativi alla produzione elettrica e alla produzione termica associata, i quali consentono di valutare i quantitativi annui di energia prodotta, i consumi annui di combustibile e le efficienze di conversione energetica, al fine di calcolare quei parametri quali IRE, LT e PES ai quali sono associati i criteri per il riconoscimento della "cogenerazione ad alto rendimento";
- indicatori ambientali, relativi all'emissione in atmosfera di sostanze inquinanti;
- indicatori relativi alle emissioni acustiche;
- indicatori della qualità della potenza elettrica prodotta e immessa in rete (power quality).

I principali indici energetico-ambientali considerati sono stati i seguenti:

- a. **il consumo di combustibile istantaneo e medio in una finestra temporale considerata:** di particolare importanza risulta il calcolo del consumo annuo di combustibile, in quanto a questa grandezza è associato il calcolo di quei parametri energetici (IRE, PES) ai quali sono legati i criteri per il riconoscimento della "cogenerazione ad alto rendimento" e le differenti forme di incentivazione previste per essa. Il consumo totale di combustibile può essere contabilizzato tramite i contatori del consumo di combustibile installati ai fini fiscali o contabilizzato con l'utilizzo degli strumenti utilizzati per la misura del consumo istantaneo).
- b. **l'efficienza della produzione elettrica:** calcolata in relazione alla medesima finestra temporale usata per gli altri indicatori;
- c. **la potenza e l'energia termica:** la potenza termica erogata da un impianto di cogenerazione si può determinare misurando in continuo sia la portata del fluido termovettore a cui è legato il trasporto del calore, sia la misura della differenza di temperatura tra il ramo di mandata e di ritorno del fluido termovettore; l'energia termica prodotta è definita dall'integrale nel tempo della potenza termica;
- d. **l'efficienza termica:** calcolata in relazione alla medesima finestra temporale usata per gli altri indicatori;
- e. **il PES (Primary Energy Saving):** è l'indice su cui si basano le nuove regole per il riconoscimento della "cogenerazione ad alto rendimento", previste dal decreto legislativo 20/07, che entreranno in vigore il 1 gennaio 2011;
- f. **indicatori ambientali:** per quanto riguarda le emissioni inquinanti provenienti da piccoli impianti di cogenerazione realizzati con motori a combustione interna fissi o turbine fisse, la legge 152/06 prevede il rispetto di limiti di emissione. Sempre ai sensi della legge 152/06, per gli impianti alimentati a metano o a GPL di potenza termica nominale inferiore a 3 MW (in pratica tutti gli impianti di piccola cogenerazione a gas naturale o a GPL con efficienza maggiore al 33%) e per tutti quelli riportati all'articolo 269, comma 14, non è richiesta l'autorizzazione ad emettere e non è previsto un monitoraggio delle emissioni durante l'esercizio dell'impianto.

## 3) Valutazione sperimentale degli indici di prestazione modale

Gli indici prestazionali sopraelencati sebbene contengano diverse informazioni circa le prestazioni dell'impianto, sono noti e certificabili solo dopo l'applicazione di carichi elettrici e termici reali per un intero anno di esercizio, risultano alquanto modeste per il delineamento di un quadro completo sulle prestazioni tecniche di un impianto di piccola/micro cogenerazione.

### a. Analisi modale

La metodologia dell'analisi modale proposta è caratterizzata dalle seguenti fasi:

- individuazione dei modi di lavoro;
- caratterizzazione sperimentale dell'impianto per ciascun modo;
- attribuzione di un "peso" a ciascun modo, così da stabilire per ciascun modo il contributo al calcolo dei diversi indici di prestazione modale;
- calcolo degli indici di prestazione modale.

Un indice di prestazione modale può essere dunque calcolato come media pesata dei valori che l'indice di prestazione ha assunto per i diversi modi di funzionamento.

Se con  $p_i$  si indica il generico indice di prestazione associato al modo  $i$ -esimo, e  $w_i$  è il peso di tale modo, allora l'indice di prestazione modale  $p_M$  può essere calcolato come segue:

$$p_M = \sum_{i=1}^n p_i \cdot w_i$$

Il concetto di analisi modale qui riportato è molto simile a quanto viene già fatto per i motori non road e per i motori automobilistici tramite con i cicli guida standardizzati.

Nel caso di impianti di cogenerazione non è ancora esistente uno standard del genere, per cui qui di seguito si fa una proposta di lavoro.

#### b. Proposta dei modi di lavoro

Il parametro che meglio caratterizza la taglia di un impianto di cogenerazione è la potenza elettrica installata. Si può pensare allora di utilizzare come criterio principale per la definizione dei modi di lavoro la percentuale di potenza elettrica erogata dall'impianto rispetto alla potenza elettrica installata; quindi, ad esempio un primo modo di lavoro è la condizione in cui l'impianto eroga la massima potenza elettrica (100% del carico elettrico). Per i successivi modi di lavoro possono essere considerati percentuali di carico uguali a quelle dei cicli ISO 8178 D1 e D2 (proposti per i motori non-road) dove con il parametro "percentuale di carico" si intende la percentuale di potenza elettrica rispetto alla potenza elettrica installata, come mostrato nelle Tabelle 89 a e 89 b:

**Tabella 89. Cicli di riferimento ISO 8178 D1 (a) e ISO 8178 D2 (b)**

(a)

| Mode | Load [%] | Weight [%] |
|------|----------|------------|
| 1    | 100      | 30         |
| 2    | 75       | 50         |
| 3    | 50       | 20         |

(b)

| Mode | Load [%] | Weight [%] |
|------|----------|------------|
| 1    | 100      | 5          |
| 2    | 75       | 25         |
| 3    | 50       | 30         |
| 4    | 25       | 30         |
| 5    | 10       | 10         |

I pesi del ciclo ISO 8178 D1 evidenziano le prestazioni dell'impianto per livelli medio alti di carico, per contro, i pesi del ciclo ISO 8178 D2 evidenziano le prestazioni del sistema per carichi medio bassi.

Gli indici di prestazione modale possono allora far riferimento a 3 cicli di studio:

- funzionamento secondo il ciclo di riferimento ISO 8178 D1 (l'indice modale sarà indicato con  $p_{M1}$ );
- funzionamento secondo il ciclo di riferimento ISO 8178 D2 (l'indice modale sarà indicato con  $p_{M2}$ );
- funzionamento alle sole condizioni nominali (l'indice modale sarà indicato con  $p_{M3}$ ).

A differenza dei motori non-road, gli impianti di cogenerazione, producono due tipologie di potenza: potenza elettrica e potenza termica. La generazione di potenza termica è generalmente legata al quantitativo di potenza elettrica erogata, per cui di solito le due generazioni vanno di pari passo; delle volte, a seconda della tipologia dell'impianto è possibile regolare il sistema in maniera tale che a parità di potenza elettrica erogata si possano ottenere diversi quantitativi di potenza termica, modificando l'efficienza elettrica di generazione. In questi casi, allora, la definizione dei modi di lavoro dovrà essere organizzata anche per diversi carichi termici ammessi; generalmente allora, per ciascun carico elettrico, è associabile un carico termico massimo, medio e minimo, come proposto nella Tabella 90.

**Tabella 90. Esempio di modi di lavoro per impianti di cogenerazione con possibilità di regolare la potenza termica per un fissato valore di potenza elettrica**

| Modo | Carico elettrico | Carico termico | Peso |
|------|------------------|----------------|------|
| 1    | 100%             | Massimo        | 10%  |
| 2    |                  | Medio          | 10%  |
| 3    |                  | Minimo         | 10%  |
| 4    | 75%              | Massimo        | 17%  |
| 5    |                  | Medio          | 17%  |
| 6    |                  | Minimo         | 16%  |
| 7    | 50%              | Massimo        | 7%   |
| 8    |                  | Medio          | 7%   |
| 9    |                  | Minimo         | 6%   |

### c. Modello ENEA e validazione sperimentale

In collaborazione con il Politecnico di Torino è stato calibrato sperimentalmente il modello dinamico di microturbina sviluppato da ENEA, utilizzando i dati di funzionamento sperimentale della Elliott 100 installata presso lo stesso Politecnico e funzionante in parallelo con l'impianto di teleriscaldamento. Per una corretta calibrazione è stato necessario adattare il modello matematico al modello reale.

L'attività svolta è stata raccolta nel rapporto tecnico "Calibrazione del modello dinamico di microgeneratore con turbina a gas sviluppato da ENEA con macchina ELLIOT 100 a servizio della rete di teleriscaldamento del Politecnico di Torino" disponibile sul sito Web.

Il microgeneratore installato presso il Politecnico di Torino utilizza come motore primo una microturbina a gas i cui fumi esausti in uscita cedono calore all'acqua che è inviata direttamente alla rete di teleriscaldamento dell'università. Il motore primo è composto da un compressore centrifugo accoppiato con una turbina centripeta, entrambi monostadio. L'aria elaborata dal compressore è preriscaldata dai fumi esausti prima di entrare in camera di combustione. Il ciclo termodinamico è pertanto un ciclo Joule-Bryton rigenerativo.

L'albero del turbo-gruppo è direttamente accoppiato ad un generatore asincrono trifase a magneti permanenti a 4 poli. Vista la possibilità della macchina di funzionare a numero di giri variabile è presente a valle del generatore un sistema elettronico di conversione statica della potenza, per garantire la compatibilità della frequenza con quella della rete. Una parte del calore dei fumi esausti in uscita dalla turbina è ceduto all'aria compressa attraverso il rigeneratore mentre la parte rimanente è recuperata attraverso uno scambiatore fumi-acqua.

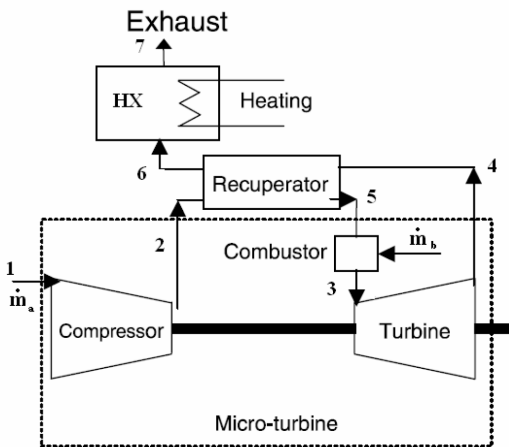


**Figura 157. Schema dell'impianto del Politecnico di Torino**

La potenza elettrica netta generata dal sistema CHP è pari a 100 kW<sub>el</sub>, a cui corrisponde una potenza termica nominale recuperabile dai fumi pari a 145 kW<sub>th</sub>.





Figura 158. Impianto di cogenerazione con microturbina Elliott 100 del Politecnico

Per la validazione e la calibrazione del modello matematico ENEA sono state effettuate le misure dei dati sperimentali di funzionamento a regime e a diversi carichi corrispondenti alla prova di collaudo della macchina. Questi dati si riferiscono a quattro prove ognuna eseguita fissando un carico elettrico diverso (100 kW, 80 kW, 60 kW, 40 kW).

Il modello dinamico, implementato da ENEA su piattaforma Matlab/Simulink, è composto da una microturbina con rigeneratore e da un post-bruciatore posto a valle del sistema CHP.

Caratteristica principale del software (sw) è l'adattabilità del modello a impianti di diversa taglia, attraverso la modifica di pochi parametri contenuti in due file di input:

- **paramod\_fisso:** contiene costanti di tempo relative ai ritardi e alle inerzie dei componenti della turbina (valvole, compressore, termocoppia, ecc.), calori specifici di aria e acqua, PCIGN, portata e densità dell'acqua dell'accumulo e dello scambiatore e temperatura ambiente;
- **paramod\_variabile:** contiene le informazioni sui dati di targa del sistema che si vuole simulare come la potenza elettrica nominale della microturbina, la temperatura massima del ciclo, il rapporto di compressione, il rapporto tra portata d'aria e portata di combustibile usato ( $\alpha$ ), la potenza termica e il rendimento del post-bruciatore. Si fa notare che le costanti "Volume accumulo termico" e UA non sono utilizzate nel sw.

I risultati della simulazione (output del modello) utili all'analisi sono:

- temperatura di ingresso in turbina T3;
- temperatura di fine espansione T4.
- portata dei gas esausti all'uscita del rigeneratore T6;
- potenza elettrica generata;
- portata di combustibile;

Si riporta di seguito lo schema input-output (Figura 159); il pedice *nom* si riferisce al dato nelle condizioni nominali.



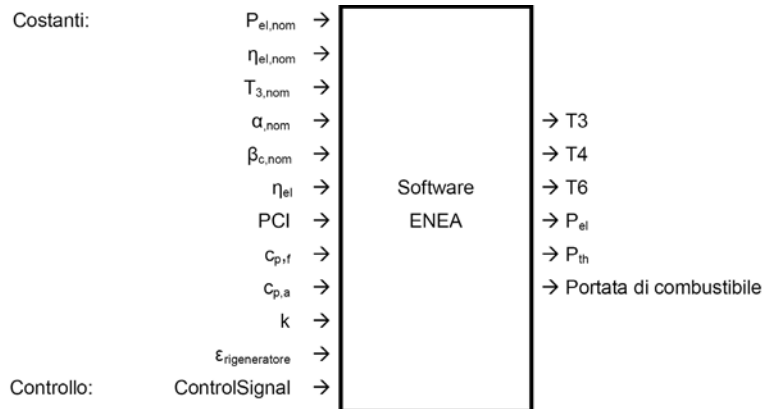


Figura 159. Schema input-output della simulazione

Il modello dinamico è composto da quattro blocchi principali (vedi Figura 160) che verranno descritti nel capitolo successivo:

- Blocco Thermal\_following
- Modello turbina
- Turbina rete
- Postbruciatore.

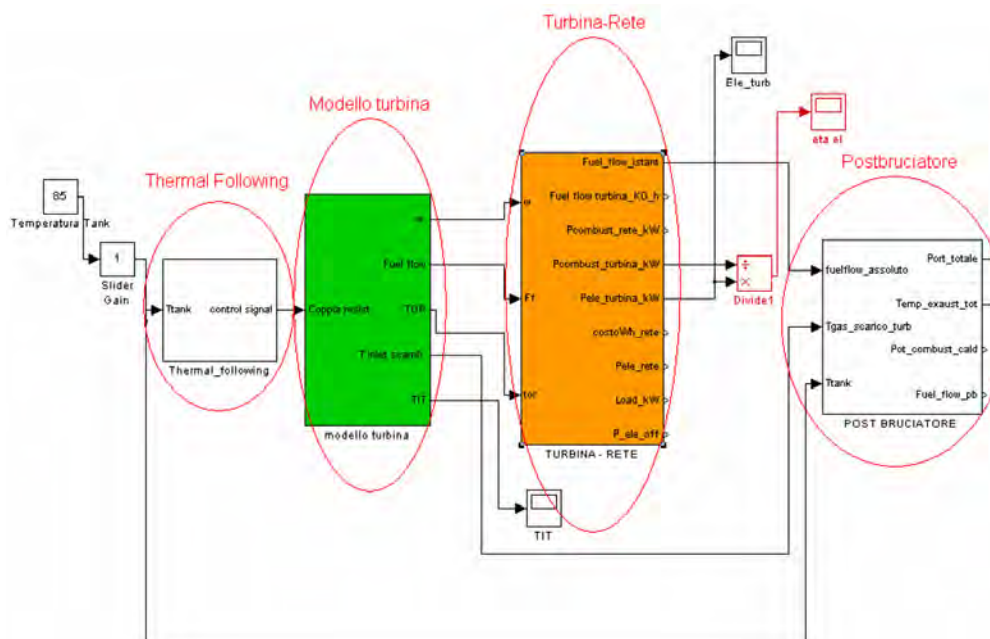


Figura 160. Schema del software

La regolazione dinamica della macchina del modello Enea è fatta mantenendo costante la velocità di rotazione dell'albero, mentre il sistema del Politecnico funziona a numero di giri variabile.

E' stato necessario modificare l'esistente modello dinamico implementato da Enea al fine di adattarlo al funzionamento reale della microturbina installata al Politecnico di Torino, in quanto la regolazione dinamica della macchina del modello Enea è fatta mantenendo costante la velocità di rotazione dell'albero, mentre il sistema del Politecnico funziona a numero di giri variabile.

In ogni caso si è effettuato il confronto tra i risultati del modello e quelli sperimentali prima e dopo le modifiche apportate al modello matematico. In particolare si sono fatte raggiungere al modello le condizioni di regime, in cui la potenza elettrica generata dal simulatore eguaglia quella prodotta dalla macchina. Si sono poi confrontati tutti i parametri di output con i valori reali misurati durante le prove sperimentali.

#### d. Risultati delle simulazioni

Si riportano di seguito i risultati delle prove prima e dopo le modifiche apportate al modello dinamico.

**Tabella 91. Risultati delle simulazioni del simulatore ENEA modificato**

| Prova | $P_{el}$<br>[kW] | $P_{th}$<br>[kW] | Portata GN<br>[kg/s] | Portata aria<br>[kg/s] | $\eta_{el}$ | $\eta_{th}$ | T3<br>[°C] | T4<br>[°C] | T6<br>[°C] |
|-------|------------------|------------------|----------------------|------------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1     | 99,8             | 171,7            | 0,0069               | 0,6831                 | 0,29        | 0,51        | 1,006      | 706        | 343        |
| 2     | 79,4             | 161,8            | 0,0061               | 0,6514                 | 0,26        | 0,54        | 963        | 688        | 335        |
| 3     | 59,3             | 153,0            | 0,0055               | 0,6631                 | 0,22        | 0,57        | 879        | 638        | 316        |
| 4     | 39               | 145,5            | 0,0050               | 0,7039                 | 0,16        | 0,60        | 780        | 580        | 293        |

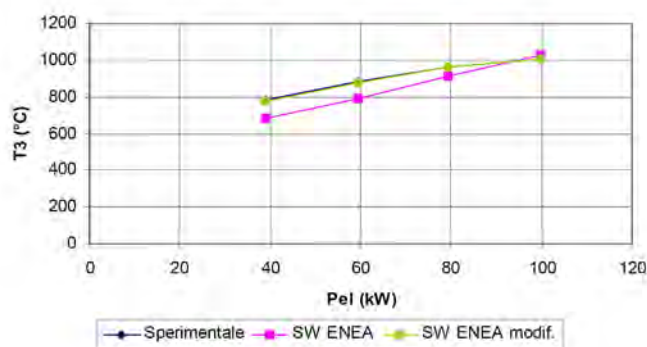


**Figura 161. T3: temperatura fumi ingresso turbina**

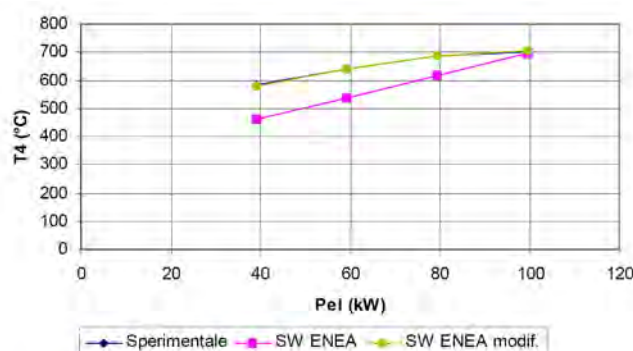


**Figura 162. T4: Temperatura fine espansione**

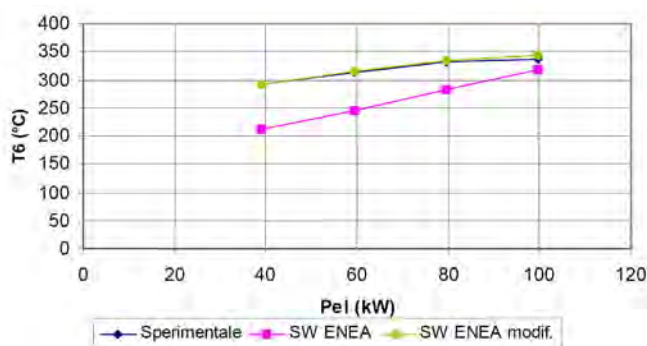


Figura 163. T6: temperatura fumi ingresso allo scambiatore fumi-acqua

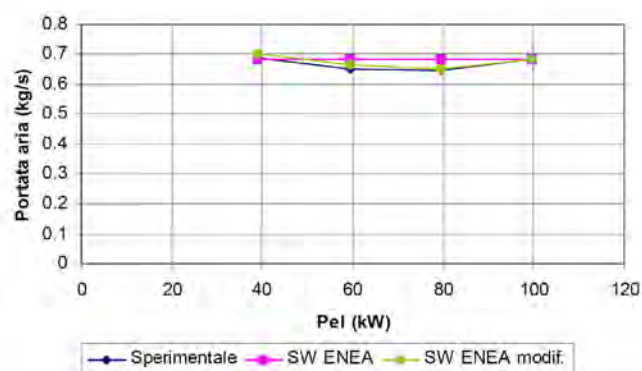


Figura 164. Portata d'aria

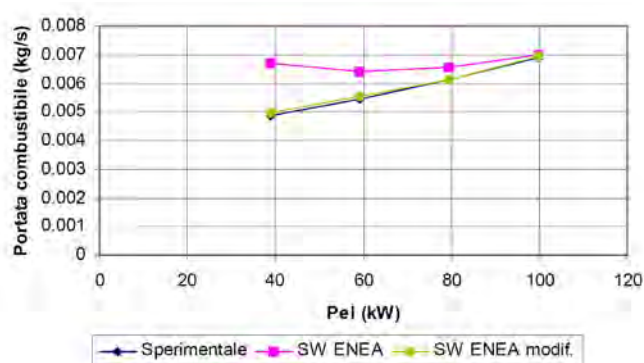


Figura 165. Portata combustibile

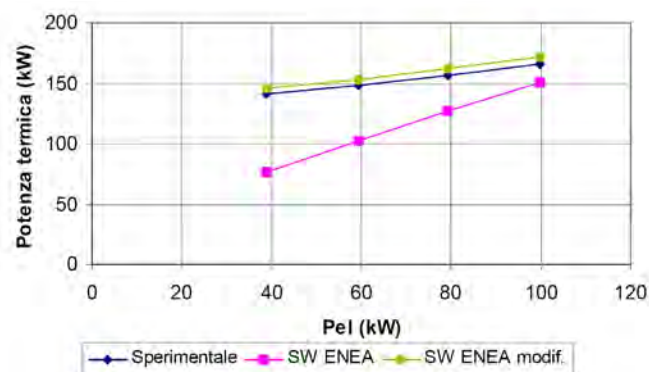


Figura 166. Potenza termica generata

E' inoltre calcolata la potenza termica recuperabile dai fumi esausti nel caso generico in cui la temperatura al camino sia pari a 120 °C e non cambi col carico; in questo modo si ha un dato indipendente dal tipo di scambiatore utilizzato.

Tabella 92. Potenza recuperabile con T7 = 120 °C

| Prova | Potenza elettrica [kW] | Potenza termica [kW] |
|-------|------------------------|----------------------|
| 1     | 99,8                   | 177,0                |
| 2     | 79,4                   | 163,0                |
| 3     | 59,3                   | 151,0                |
| 4     | 39                     | 140,5                |

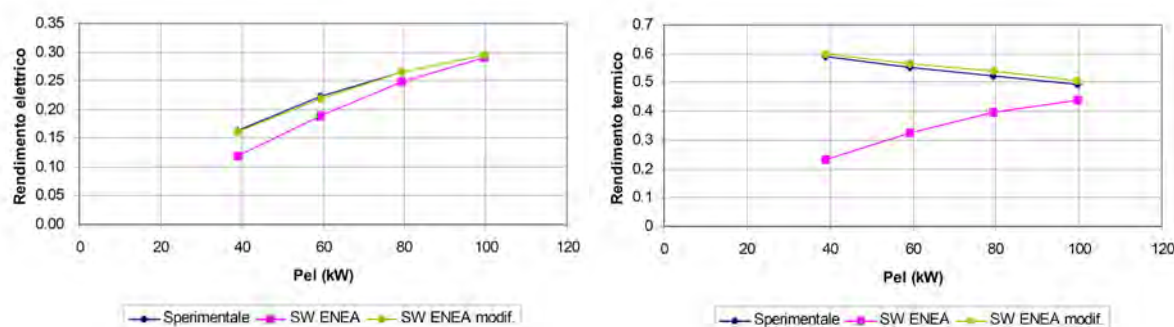


Figura 167. Rendimenti elettrico e termico

#### e. Errori relativi

Sono stati infine calcolati gli errori relativi rispetto ai dati sperimentali.

Tabella 93. Errori relativi

| Prova | $P_{el}$ | $P_{th}$ | Portata GN | $\eta_{el}$ | $\eta_{th}$ | T3     | T4     | T6    |
|-------|----------|----------|------------|-------------|-------------|--------|--------|-------|
| 1     | 0,10%    | 3,19%    | 0,28%      | -0,18%      | 2,91%       | 0,16%  | 0,40%  | 1,77% |
| 2     | -0,13%   | 3,12%    | 0,47%      | -0,47%      | 2,64%       | 0,01%  | 0,23%  | 1,26% |
| 3     | 0,00%    | 3,59%    | 1,35%      | -1,33%      | 2,22%       | -0,73% | -0,68% | 0,73% |
| 4     | 0,00%    | 3,19%    | 1,50%      | -1,47%      | 1,73%       | -0,70% | -0,66% | 0,60% |

Come si vede dalla Tabella 93 gli errori ottenibili con la simulazione del sw modificato rimangono inferiori al 4%. Gli scostamenti maggiori riguardano la potenza termica recuperata e la portata di combustibile, che influenzano il rendimento elettrico e termico.

Con riferimento alle attività relative all'obiettivo intermedio C "Identificazione del progetto dimostrativo (applicazione) di miglioramento dell'efficienza; analisi di fattibilità e valutazione delle ricadute", come dimostrativo era stato identificato inizialmente l'impianto di micro cogenerazione che era previsto installare presso gli alloggi popolari di Biella gestiti da ATC (Agenzia Territoriale per la Casa di Biella).

Con queste ipotesi ENEA, nell'ambito di un accordo con FEDERCASA, ha effettuato uno studio di fattibilità sui 3 edifici di proprietà della ATC, per un totale di circa 160 unità abitative.

Sulla base di questo studio, l'ATC Biella ha emanato, lo scorso il 22 settembre 2008, un Bando Pubblico per affidare ad una ESCO, la trasformazione delle centrali termiche con tre impianti di micro cogenerazione a turbina a gas e la gestione pluriennale (12 anni) degli stessi. ENEA ha elaborato un documento (allegato al Bando) e un foglio di calcolo per supportare ATC Biella nella fattibilità economica dell'intervento.

Tuttavia, il sistema di micro cogenerazione bandito da ATC non è stato realizzato in tempi utili per essere oggetto di sperimentazione nel corso dell'attuale annualità del Piano.

lo studio completo predisposto da ENEA nell'ambito dell'accordo con FEDERCASA (rapporto tecnico "Complesso residenziale popolare ATC Biella - Intervento di riqualificazione energetica - Studio di fattibilità ENEA") è disponibile sul sito web ENEA.

#### Le pompe di calore nel settore terziario

Per il riscaldamento invernale degli ambienti, al posto delle normali caldaie a combustibile fossile, esiste la possibilità di utilizzare delle macchine, comunemente denominate pompe di calore che utilizzano un ciclo termodinamico ideato per fare il freddo.

Tali pompe di calore sono normalmente del tipo con ciclo a compressione di vapori saturi e mosse da motori elettrici, possono però utilizzare anche motori a combustione interna, oppure utilizzare cicli ad assorbimento, con azionamento tramite energia termica anziché meccanica.

Le pompe di calore maggiormente diffuse sul mercato del terziario sono quelle a compressione con motore elettrico di tipo aria-acqua, per la facilità di installazione, l'assenza di torri evaporative e la facile interfacciabilità con i sistemi idronici di diffusione del calore. Tali macchine, durante il riscaldamento invernale, prelevano calore gratuito dall'aria esterna all'edificio, per cederlo al sistema di distribuzione dell'utenza assieme all'energia consumata dal compressore.

Uno dei motivi della scelta di queste macchine è che le torri evaporative, necessarie in estate con i modelli acqua-acqua, tendono ad essere evitate in quanto fonti di batteri, rumore e dispendio di acqua di rete.

Tuttavia nei climi più freddi ed umidi, tipici del nord-Italia, le macchine aria-acqua soffrono di problemi di brinamento dell'evaporatore, con conseguente riduzione delle prestazioni attese.

I metodi di sbrinamento attuali consistono nella temporanea inversione del ciclo da invernale ad estivo per poter liquefare il ghiaccio formatosi sulle batterie alettate esterne.

Questa operazione comporta comunque un abbassamento della resa della macchina ed un momentaneo funzionamento non confortevole per gli utenti. L'utilizzo di sistemi di sbrinamento "intelligenti", come quelli che si andranno a sperimentare, potrà comportare incrementi sulle prestazioni di circa il 10%.

Le pompe di calore ad assorbimento a gas, attualmente occupano la prima posizione (A++) nella nuova normativa europea ECOBOILER, le loro prestazioni attese sono superiori ai cicli a compressione in inverno ed inferiori in estate, un confronto sperimentale in condizioni uguali per valutare i consumi comparati stagionalmente non è tuttora reperibile.

Dato l'alto fattore di contemporaneità che i sistemi di condizionamento presentano, è evidente che l'impiego congiunto di macchine condizionatrici ad azionamento termico permetterebbe un contenimento dei picchi di richiesta elettrica sia estivi che invernali, che sono attualmente causa di interruzione del servizio di erogazione in luoghi particolari, quali centri storici e comunque zone servite da linee elettriche vicine al punto di massimo carico consentito.

L'esecuzione delle attività previste consente benefici potenzialmente rilevanti per gli utenti del sistema elettrico nazionale; infatti, la validazione e messa a punto di macchine elettriche a compressione con sistemi di sbrinamento avanzati, permetterà di aumentare l'efficienza del riscaldamento invernale nei climi del centro-nord d'Italia, la diffusione di macchine a gas ad alta efficienza potrà ridurre il picco invernale di potenza elettrica impegnata legato al riscaldamento, mediante una utile redistribuzione delle fonti energetiche.

Le attività sono state inizialmente pianificate secondo le seguenti fasi:

- progettazione degli interventi dimostrativi;
- definizione e acquisizione della sensoristica avanzata e sistema di raccolta dati;
- predisposizione edificio da condizionare;
- sperimentazione macchine condizionatrici innovative;
- sviluppo di modelli di simulazione edificio impianto ottimizzati;
- analisi dei risultati, comparazione e messa a punto dei modelli sviluppati.

Allo scopo di ottenere dati affidabili sul funzionamento in condizioni reali dei due diversi tipi di pompe di calore avanzate individuate, è stato dapprima identificato un caso applicativo: l'edificio "corpo B" del centro ENEA di ISPRA (Figura 168).



Figura 168. L'edificio "Corpo B" del centro ENEA di Ispra

L'edificio, costruito con criteri di architettura bioclimatica, ed ospitante uffici e laboratori su due piani, è disposto longitudinalmente lungo la direttrice Est-Ovest e si presta quindi bene ad essere suddiviso longitudinalmente in due settori da servire ognuno con una diversa tipologia delle macchine climatizzatrici innovative individuate.

L'ENEA si è riservata la definizione della applicazione dimostrativa, la modifica dell'impianto esistente e l'installazione delle macchine, la simulazione stazionaria del sistema edificio impianto con opportuni codici da mettere a punto a valle della sperimentazione e l'analisi dei dati sperimentali.

L'ERSE, nell'ambito di un proprio accordo di programma, si è incaricato dello sviluppo del sistema computerizzato di acquisizione dati e della strumentazione necessaria per interfacciare le macchine in prova.

CLIVET si è resa disponibile a fornire gratuitamente delle macchine elettriche a compressione dotate di sbrinamento intelligente, dietro specifico accordo di partenariato (firmato 04/08/2008).

ROBUR analogamente si è resa disponibile a fornire gratuitamente delle macchine ad assorbimento a gas in classe A++ , con relativo accordo di partenariato.

L'Università di Padova-DTG, in qualità di cobeneficiario, è stata incaricata di effettuare una attività di ricerca denominata *"Studio sperimentale di pompe di calore ad aria con un sistema innovativo di sbrinamento"*, all'interno della quale è stato previsto:

- uno studio dettagliato mediante codice TRNSYS dell'edificio prescelto al fine di individuare le taglie delle macchine da installare e l'area servita da ciascuna tipologia di macchine all'interno dell'edificio stesso;
- l'analisi sperimentale dei dati ottenuti, in collaborazione con ENEA e CESI ricerca;
- lo sviluppo di modelli di calcolo per le macchine, validati sperimentalmente, ai fini dell'uso in software di simulazione edificio-impianto, tipo TRNSYS e ODESSE.

Per il calcolo della potenza termica di progetto dell'edificio, è stata considerata la temperatura esterna di progetto pari a -5 °C secondo la norma UNI 10349, come per la città di Varese.

La potenza di progetto richiesta dall'edificio è di 115,5 kW, di cui 33 kW rappresentano il carico di ventilazione (solo sensibile). Il carico totale si ripartisce sulle 3 zone nel modo seguente:

- 13,3 kW al piano interrato (volume ridotto, dispersioni contenute anche con il terreno);
- 27,9 kW al pianterreno;
- 74,3 kW al primo piano (altezza doppia, elevate dispersioni del tetto).

Sulla base dei calcoli fatti, i tre piani dell'edificio sono stati opportunamente suddivisi sulla planimetria in modo da ripartire il carico sulle due tipologie di macchine da provare. In verde le zone destinate al riscaldamento con macchine CLIVET, in giallo quelle con macchine ROBUR.

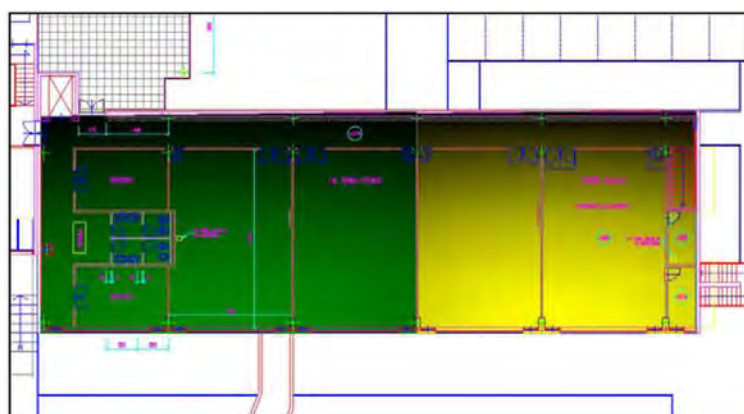


Figura 169. Suddivisione piano seminterrato



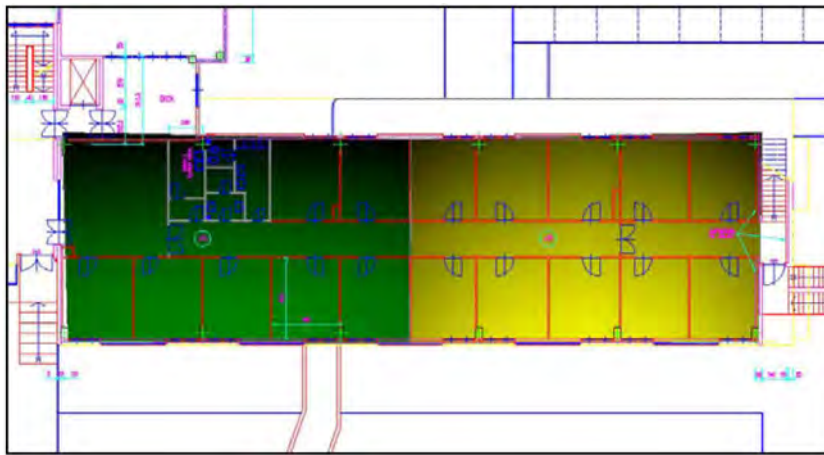


**Figura 170. Suddivisione Piano Terra**

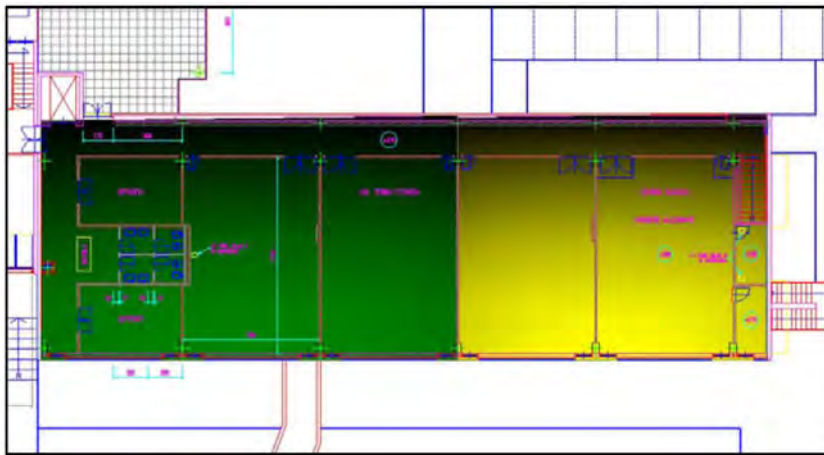


**Figura 171. Suddivisione Primo Piano**

Le macchine da installare sono state successivamente individuate in una coppia di macchine elettriche CLIVET modello WSAN-XEE 122 ed una coppia di macchine ROBUR a gas modello E<sup>3</sup>A7.

La seconda attività è partita dall'analisi della formazione di brina sulle batterie fredde in funzione della velocità dell'aria, della sua temperatura ed umidità con la variazione dei parametri come la distanza delle alettature che condizionano il coefficiente di scambio termico.

È stato inoltre valutato l'effetto dello spessore di ghiaccio e del grado di ruvidità con cui esso si può formare.

Questa valutazione è stata propedeutica alla stima dell'esito della collocazione di resistenze di riscaldamento a valle della laminazione situate in posizione diversa, con potenze diverse e diversa strategia di utilizzo.

Il codice di calcolo ha funzionato ed è stato utilizzato per una prima ottimizzazione della macchina in vista poi dell'aggiustamento del programma con i dati sperimentali. I primi risultati mostrano vantaggi soprattutto dal punto di vista della riduzione dei tempi di brinamento e della loro frequenza.

I risultati di questo studio sono stati raccolti nel rapporto tecnico "Studio del brinamento delle batterie su pompe di calore a compressione" del Dicembre 2008.

Di seguito sono riportate le condizioni simulate con lo scopo di valutare le prestazioni della pompa di calore senza e con dispositivo "frostless".



**Tabella 94 (a, b, c). Condizioni della simulazione**

|                              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Simulazione                  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Differenza DT                | -    | 1    | 2    | 3    | 4    | 1    | 2    | 3    | 4    |
| T aria in ingresso           | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  |
| RH aria in ingresso          | 50%  | 65%  | 65%  | 65%  | 65%  | 85%  | 85%  | 85%  | 85%  |
| Quota geodetica              | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0m   | 0 m  | 0m   |
| Temperatura acqua in mandata | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C |

|                              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Simulazione                  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Differenza DT                | -    | 1    | 2    | 3    | 4    | 1    | 2    | 3    | 4    |
| T aria in ingresso           | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  |
| RH aria in ingresso          | 50%  | 65%  | 65%  | 65%  | 65%  | 85%  | 85%  | 85%  | 85%  |
| Quota geodetica              | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0m   | 0 m  | 0m   |
| Temperatura acqua in mandata | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C |

|                              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Simulazione                  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| Differenza DT                | -     | 1     | 2     | 3     | 4     | 1     | 2     | 3     | 4     |
| T aria in ingresso           | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C |
| RH aria in ingresso          | 50%   | 65%   | 65%   | 65%   | 65%   | 85%   | 85%   | 85%   | 85%   |
| Quota geodetica              | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0m    | 0 m   | 0m    |
| Temperatura acqua in mandata | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  |

I risultati sulla variazione percentuale del tempo di sbrinamento con i due tipi di macchine a confronto sono riportati nelle tabelle seguenti.

**Tabella 95. Variazione del tempo di sbrinamento (%) nelle differenti condizioni di simulazione**

|                                         |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Simulazione                             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     |
| T aria in ingresso                      | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C  | 5°C   | 5°C   | 5°C   | 5°C   |
| RH aria in ingresso                     | 50%  | 65%  | 65%  | 65%  | 65%  | 85%   | 85%   | 85%   | 85%   |
| Quota geodetica                         | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m   | 0m    | 0 m   | 0m    |
| Temperatura acqua in mandata            | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  |
| Ritardo sul tempo di inizio sbrinamento | -    | -    | -    | -    | -    | 87,9% | 29,6% | 15,6% | 12,4% |

|                                         |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Simulazione                             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     |
| T aria in ingresso                      | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C  | 0°C   | 0°C   | 0°C   | 0°C   |
| RH aria in ingresso                     | 50%  | 65%  | 65%  | 65%  | 65%  | 85%   | 85%   | 85%   | 85%   |
| Quota geodetica                         | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m  | 0 m   | 0m    | 0 m   | 0m    |
| Temperatura acqua in mandata            | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  |
| Ritardo sul tempo di inizio sbrinamento | -    | -    | -    | -    | -    | 95,0% | 30,3% | 14,6% | 11,7% |

|                                         |       |       |       |       |       |        |       |       |       |
|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Simulazione                             | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6      | 7     | 8     | 9     |
| T aria in ingresso                      | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C | - 5°C  | - 5°C | - 5°C | - 5°C |
| RH aria in ingresso                     | 50%   | 65%   | 65%   | 65%   | 65%   | 85%    | 85%   | 85%   | 85%   |
| Quota geodetica                         | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0 m   | 0 m    | 0m    | 0 m   | 0m    |
| Temperatura acqua in mandata            | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C  | 40°C   | 40°C  | 40°C  | 40°C  |
| Ritardo sul tempo di inizio sbrinamento | -     | -     | -     | -     | -     | 106,5% | 32,8% | 17,6% | 15,0% |

Presso ENEA è stata perfezionata una tesi di laurea della Facoltà di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi Roma 3, dal titolo " *Confronto Tecnologico tra Sistemi di Riscaldamento Avanzati per il Settore Terziario*" (la tesi è stata discussa in data 29/05/2009). Tale tesi di laurea descrive i risultati simulati mediante codice TRNSYS del confronto tecnologico che si doveva condurre sperimentalmente presso il centro ENEA di ISPRA.

Nelle intenzioni iniziali, i risultati simulati ottenuti per la tesi sarebbero stati utilizzati per effettuare un costruttivo raffronto con quelli sperimentali, al termine della stagione di riscaldamento. Per fare un migliore raffronto economico è stata condotta una simulazione anche del medesimo edificio riscaldato con una caldaia tradizionale a gas naturale con rendimento stagionale 85% sul Potere Calorifico Inferiore del gas naturale.

Il risultato della simulazione condotta si può riassumere nei seguenti dati salienti:

- con riferimento ad una normale caldaia a gas naturale, il *pay back time* delle macchine CLIVET e ROBUR risultano molto simili e rispettivamente pari a 4,59 e 4,83 anni;
- il costo di esercizio in € per kWh termico prodotto è di 0,057 per le macchine ROBUR contro 0,073 per quelle CLIVET e 0,096 per la caldaia a gas naturale.

Il confronto è stato effettuato secondo le seguenti condizioni al contorno:

1. tariffa elettrica del tipo BTA6;
2. macchine termiche alimentate a gas naturale (non reperibile presso l'edificio reale);
3. accensione impianto 4:00 -20:00 (come in uso);
4. condizioni meteo di Varese;
5. edificio costruito in base ai materiali reali;
6. non brinamento batterie alettate esterne;
7. prestazioni secondo curve dichiarate dalle case costruttrici a carico pieno.

Le attività svolte, pur con la rimodulazione che si è resa necessaria a programma avviato, hanno consentito di raggiungere alcuni risultati di rilievo, tra cui l'analisi dettagliata della possibilità di fare un confronto tecnologico tra metodi di riscaldamento avanzati presso un edificio esistente (il centro ENEA di Ispra).

Nonostante la mancata installazione delle macchine, gli studi fatti e la pianificazione delle attività potranno servire per un rilancio dell'attività in una successiva stagione di riscaldamento. I risultati attesi dalle simulazioni al computer sin qui effettuate, dovrebbero essere vicini a quello che si avrebbe avuto con la sperimentazione in campo, anche se la mancanza di un codice di previsione per il brinamento delle batterie alettate e delle prestazioni a regime parzializzato, fanno presagire che le prestazioni reali fornite dalle macchine sia elettriche che a gas, saranno lievemente inferiori.

Un ulteriore naturale sviluppo dell'attività potrà essere quello di estendere il raffronto tecnologico anche alla stagione di condizionamento estivo, per la quale ci si aspetta che le prestazioni tra macchine a compressione elettriche e ad assorbimento a gas si invertano a favore delle prime.

La conferma sperimentale sul campo potrà permettere di effettuare scelte opportunamente orientate nel caso di impianti misti caldo-freddo con previsioni attendibili su tempi di Pay-back e costi di esercizio annui.

### I distretti industriali

Le attività svolte con riferimento ai distretti industriali hanno avuto per oggetto la realizzazione di un'analisi degli interventi di efficientamento per il 1° Macrolotto industriale di Prato; si è affidato l'incarico per lo svolgimento dello studio alla società IZI s.p.a. di Roma.

L'obiettivo generale dello studio è quello di ricostruire un quadro conoscitivo di massima circa i consumi energetici di un *panel* di aziende del 1° Macrolotto funzionale all'individuazione degli strumenti e dei possibili interventi di miglioramento delle performance energetiche sia in termini di efficienza che di risparmio.

L'analisi, condotta a partire dai dati e dalle informazioni fornite dai tecnici delle aziende *panel* che hanno partecipato allo studio e raccolte per mezzo di un'apposita scheda di rilevazione, ha permesso di individuare un ristretto set di interventi di miglioramento dell'efficienza energetica che, in virtù delle caratteristiche energetiche della strutture partecipanti, dei loro processi produttivi e delle indicazioni provenienti dai referenti delle aziende, risulterebbero suscettibili di essere realizzati presso l'area di studio.

Nella fattispecie, le possibili ipotesi di lavoro prese in considerazione nello studio sono le seguenti:

- installazione di pannelli fotovoltaici;
- installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria;
- installazione di impianti di cogenerazione;
- riutilizzo dei cascami energetici delle soluzioni calde di tintura;
- sostituzione dei motori elettrici con motori ad alta efficienza.

Su tali interventi vengono fornite alcune indicazioni di massima per poter effettuare una prima valutazione delle potenzialità di risparmio energetico propedeutica alla successiva realizzazione di una vera e propria *diagnosi*

*energetica*, che rappresenta il passo più importante per la definizione di azioni per il miglioramento dell'efficienza energetica.

La diagnosi energetica è un insieme sistematico di rilevamento, raccolta, elaborazione ed analisi dei parametri relativi ai consumi specifici e alle condizioni di esercizio di un'azienda o di un edificio e dei relativi impianti e strumenti; consiste essenzialmente in una valutazione tecnico economica dei flussi di energia.

I suoi obiettivi sono:

- definire il bilancio energetico dell'azienda o dell'edificio cui si riferisce;
- individuare gli interventi di riqualificazione tecnologica e valutare per ciascun intervento le opportunità tecniche ed economiche;
- migliorare le condizioni di comfort e di sicurezza, riducendo le spese di gestione.

Pertanto, con una diagnosi energetica ci si propone di capire in che modo l'energia viene utilizzata, quali sono le cause degli eventuali sprechi ed eventualmente quali interventi potrebbero essere realizzati, con la definizione di un piano energetico che valuti non solo la fattibilità tecnica ma anche e soprattutto quella economica delle azioni proposte.

L'aspetto tecnico riguarda la conoscenza degli impianti e dei servizi di un'azienda o di un edificio, la stesura dei modelli energetici, la valutazione dei consumi specifici, l'elaborazione dei bilanci di materia e di energia, e il confronto con tecnologie e dati di riferimento. L'aspetto economico, invece, si riferisce ai tradizionali metodi dell'analisi costi-benefici.

Lo studio ha preso in considerazione, dapprima, l'area del 1° Macrolotto industriale di Prato, descrivendone le principali grandezze economiche ed energetiche, nonché le più importanti azioni intraprese in campo energetico-ambientale.

Successivamente, l'analisi si è concentrata sull'individuazione dei principali possibili interventi di efficientamento energetico, descrivendone le maggiori caratteristiche tecniche, offrendo una prima previsione dei costi di investimento necessari alla loro realizzazione e nel contempo una stima della valorizzazione economica degli interventi stessi e del relativo pay back period.

Delle ipotesi di intervento prese in considerazione, l'analisi condotta ha evidenziato come per alcune di esse si registri un'interessante valorizzazione economica dei risparmi conseguibili, con tempi di ritorno del capitale investito sufficientemente sostenibili e comunque in linea con quanto mediamente riscontrato sul mercato per analoghi interventi. Ciò anche grazie agli incentivi previsti dalla normativa di riferimento.

E' questo il caso dell'installazione di impianti per il solare termico e di pannelli fotovoltaici, il cui pay back period, sulla base delle assunzioni effettuate e dei parametri di stima presi in considerazione, risulta essere rispettivamente pari a 5 e 9 anni dall'entrata in funzionamento dell'impianto.

Al contrario, relativamente all'installazione di impianti di cogenerazione secondo le configurazioni proposte nello studio, i costi di investimento per la realizzazione di tali interventi risultano molto elevati ed imporrebbero il ricorso a mutui bancari, con ulteriore allungamento del già dilatati tempi di rientro dell'investimento. Ciò non farebbe altro che aumentare la scarsa appetibilità dell'intervento, anche in ragione del fatto che nelle simulazioni effettuate è stata presa in considerazione l'ipotesi di vendita sul mercato elettrico dell'energia prodotta dal cogeneratore. Tuttavia, in questa sede non è possibile alcuna valutazione in merito alla possibilità o all'opportunità da parte delle aziende di poter operare su tale mercato. Pertanto, la possibilità di poter godere dei suddetti rientri viene presentata solo come un'ulteriore elemento nel ventaglio delle opportunità di valorizzazione economica dell'intervento proposto.

La realizzazione degli interventi proposti, secondo le ipotesi e le specifiche tecniche descritte, è in grado di generare un risparmio energetico espresso in termini di minor consumo di energia elettrica e termica, suscettibile di valorizzazione economica e, quindi, riconducibile in prima approssimazione:

- ad una riduzione delle spese della bolletta energetica;
- al conseguimento dei titoli di efficienza energetica (TEE) collegati alla realizzazione dell'intervento stesso;
- agli eventuali incentivi economici previsti dalla normativa di riferimento, quali ad esempio quelli del Nuovo Conto Energia;
- alle detrazioni fiscali a favore degli interventi di efficientamento energetico.

Pertanto, sono stati stimati i benefici derivanti dalla realizzazione di ciascuno degli interventi individuati ed il relativo pay back period degli investimenti previsti.

Inoltre, si è proceduto al calcolo del VAN e del TIR. Sono due classici indicatori finanziari in grado di sintetizzare il giudizio sull'opportunità di effettuare o meno un investimento. Il VAN (Valore attuale netto) rappresenta il flusso di cassa netto atteso attualizzato di un progetto di investimento, con un tasso in genere pari al costo medio ponderato del capitale. Il TIR (Tasso interno di rendimento) rappresenta invece il tasso che rende pari a zero il VAN. E' quindi un indicatore adimensionale, indipendente cioè dalla grandezza dell'investimento.

Nelle simulazioni effettuate per il calcolo del VAN si è fatto riferimento:

- ad un tasso di attualizzazione pari al 5%, aliquota proxy del costo medio ponderato del capitale in questo periodo;
- ad un tasso di attualizzazione pari al 7%, nell'ipotesi di una crescita del costo medio ponderato del denaro.

Si tratta, quindi, essenzialmente di una valorizzazione economica effettuata nell'ottica del soggetto responsabile dell'intervento, che in taluni casi potrebbe scontare tempi di ritorno degli impieghi molto lunghi, tali da rendere poco appetibile la scelta di investimento.

In ogni caso, per una compiuta valutazione degli interventi occorrerebbe porsi nell'ottica del decisore pubblico, cercando di valorizzare i benefici a vantaggio della collettività, quali ad esempio la riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti o la riduzione della spesa sanitaria relativa alle patologie legate all'inquinamento, superando le difficoltà legate alla monetizzazione della totalità dei vantaggi conseguibili.

Nelle tabelle 96-99 viene indicato il risparmio energetico potenziale conseguibile, presso le aziende panel, attraverso l'installazione di impianti fotovoltaici, di collettori solare termico, riutilizzo cascami energetici, la sostituzione di motori elettrici tradizionali con motori ad alta efficienza.

**Tabella 96. Stima risparmio installazione pannelli PV**

| Aziende panel | Periodo          | Risparmio complessivo |         | Risparmio x m <sup>2</sup> di pannello FV |        |
|---------------|------------------|-----------------------|---------|-------------------------------------------|--------|
|               |                  | kWh/anno              | €/anno  | kWh/anno                                  | €/anno |
| 10            | Primo decennio   | 6.479.851             | 842.381 | 201                                       | 26     |
|               | Secondo decennio | 5.970.720             | 776.194 | 185                                       | 24     |

**Tabella 97. Stima risparmio installazione collettori solari termici**

| Aziende con processo di tintura | Risparmio complessivo |         | Risparmio x m <sup>2</sup> di collettore solare |        |
|---------------------------------|-----------------------|---------|-------------------------------------------------|--------|
|                                 | mc/anno               | €/anno  | mc/anno                                         | €/anno |
| 7                               | 2.238.126             | 895.250 | 93                                              | 37     |

**Tabella 98. Stima risparmio riutilizzo cascami energetici**

| Aziende panel con processo di tintura | Risparmio complessivo |         | Risparmio x azienda |        |
|---------------------------------------|-----------------------|---------|---------------------|--------|
|                                       | mc/anno               | €/anno  | mc/anno             | €/anno |
| 7                                     | 395.960               | 158.384 | 56.566              | 22.626 |

**Tabella 99. Stima risparmio derivante dalla sostituzione con motori ad alta efficienza**

| Ore di marcia | Risparmi energia per sostituzione motore alta efficienza |     |       |     |       |     |
|---------------|----------------------------------------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|
|               | 3 kW                                                     |     | 18 kW |     | 60 kW |     |
|               | kWh                                                      | €   | kWh   | €   | kWh   | €   |
| 6             | 506                                                      | 66  | 1.114 | 145 | 1.990 | 259 |
| 8             | 674                                                      | 88  | 1.486 | 193 | 2.653 | 345 |
| 10            | 843                                                      | 110 | 1.857 | 241 | 3.316 | 431 |

Nello studio è stato condotto un esame sui singoli interventi, come se il decisore privato (l'azienda) di volta in volta dovesse prendere in considerazione l'opportunità di realizzare un solo intervento.

Pertanto, ne è scaturita una valutazione che prescinde da una visione sistemica delle azioni previste. Tuttavia, quando un decisore si trova di fronte ad un programma di più interventi, la corretta definizione della sequenzialità dei lavori dipende non solo dalle preferenze e dalle aspettative del soggetto responsabile delle scelte, ma soprattutto dalla disponibilità di capitali, dai tempi di cantierabilità e realizzazione delle opere, dalla propedeuticità e funzionalità dei lavori, nonché dalla vigenza di forme di incentivazione previste dalla normativa di riferimento, solo per citare alcuni fattori.

Sebbene tale valutazioni prescindano dalla presente analisi, le precedenti considerazioni mettono in luce come a livello di sistema i risultati conseguiti per ogni singolo intervento concorrano alla definizione del successo complessivo del programma di investimento, contribuendo alla compensazione delle uscite di cassa registrate per l'insieme degli interventi e, in definitiva, alla definizione del *pay back period* globale.

Infatti, una valutazione a livello di sistema risulta più funzionale alla corretta pianificazione dei lavori rispetto ad una serie di valutazioni puntuali, proprio perché gli interventi forieri di maggiori ricadute in termini di valorizzazione economica dei risparmi conseguiti contribuiscono a far fronte alle spese degli interventi meno vantaggiosi, con evidenti ricadute sulla stima del *pay back period* degli investimenti. Tutto ciò ha importanti ricadute anche sulla decisione di sostenere gli interventi di razionalizzazione energetica mediante il ricorso al finanziamento tramite terzi (FTT) e ai servizi offerti dalla Energy Service Companies (ESCO). Come già evidenziato, il ricorso a tali strumenti garantisce all'utente:

- l'assenza o la riduzione dei rischi finanziari e l'eliminazione di quelli legati alle prestazioni degli impianti;
- l'opportunità di realizzare interventi anche in mancanza di risorse finanziarie proprie ed in presenza di difficoltà nel reperire finanziamenti esterni, ovvero la disponibilità di risorse interne per altri compiti;
- la liberazione dalle problematiche connesse alla gestione e manutenzione degli impianti;
- la possibilità di conseguire benefici energetico-ambientali importanti, tenuto conto del fatto che i profitti della ESCo. sono proporzionali all'efficienza degli impianti.

A questi vantaggi si aggiunge la possibilità di poter inserire tra gli interventi da realizzare anche quelli che, pur essendo utili, presentano tempi di ritorno dell'investimento troppo lunghi per giustificare l'adozione.

Tuttavia, occorre sottolineare come a fronte dei benefici derivanti dal ricorso al FTT si riscontri un elevato livello di complessità contrattuale nei rapporti tra l'utente e la ESCo.

Anche di tale complessità e delle diverse forme contrattuali regolanti il vincolo tra le controparti, spesso dipendente dalla forza negoziale di ciascuna di esse, si dovrà tener conto per una compiuta ed esaustiva valutazione della fattibilità di un piano degli interventi.

#### Le reti di illuminazione industriale

L'illuminazione industriale, sia dei capannoni di produzione e dei magazzini, sia degli uffici, non è in genere individuata nei bilanci aziendali come voce di costo distinta; rientra pertanto nelle spese generali e non è in genere oggetto particolari attenzioni da parte dei tecnici, interni o esterni all'azienda, pur rappresentando un'uscita economica importante. I margini di miglioramento dell'efficienza energetica, derivanti da una gestione integrata dei sistemi di illuminazione dotati di tecnologie innovative, sono tuttavia rilevanti e la disponibilità sul mercato di prodotti innovativi ed efficienti, unita al costo comunque elevato dell'elettricità, ha convinto molte aziende ad intervenire.

L'aumento dell'efficienza energetica, ed i relativi riduzione dei consumi, minor impatto sull'ambiente e benefici in termini economici, si ottengono con sorgenti luminose, apparecchi, ausiliari, e sistemi di regolazione e controllo, che a loro volta devono i) essere di tecnologia "efficace ed efficiente" (cioè tecnologia che produce i risultati richiesti minimizzando i consumi e le perdite) ed ii) essere tra loro interfacciati in modo "efficace ed efficiente". Infatti, un sistema di illuminazione è un insieme organico di diversi elementi, ciascuno con caratteristiche diverse (lampade, apparecchi, ausiliari, dispositivi per la regolazione e il controllo del flusso luminoso in base a vari criteri (presenza degli utilizzatori, disponibilità di luce naturale, temporizzazione, ecc.), controllo remoto e diagnostica ecc.. E' perciò essenziale la corretta progettazione del sistema di illuminazione nel suo insieme.

L'intervento dimostrativo realizzato si basa sulla scelta delle tecnologie più efficienti già disponibili sul mercato (essenzialmente sorgenti ad alta efficienza, fluorescenti lineari T8 e T5, ballast ad alta efficienza, apparecchi ad alto rendimento, sorgenti-apparecchi innovativi a LED) e su un sistema intelligente di gestione, con integrazione funzionale di tutte le diverse tecnologie utilizzate. Tale integrazione funzionale delle tecnologie elencate comporta infatti vantaggi superiori all'uso indipendente delle stesse.

Un aspetto molto importante del programma è costituito dai prodotti innovativi software sviluppati nel corso del progetto: partendo dalle più avanzate tecniche esistenti di progettazione illuminotecnica, è stato realizzato lo sviluppo di nuove tecniche informatiche utili per la progettazione, la modellazione dinamica e ottimizzazione illuminotecnica, percettiva, energetica, economica. L'intervento dimostrativo realizzato analizza quindi le esigenze di illuminazione industriale di una realtà estesa in un'ottica di sistema, fornendo adeguate linee di intervento per la migliore applicazione delle nuove tecnologie efficienti.

Gli obiettivi del primo anno del progetto prevedevano lo svolgimento in sequenza delle seguenti attività.

- lo sviluppo di una piattaforma software per la modellazione, progettazione assistita, simulazione di controlli e di gestione di impianti illuminotecnica, con caratteristiche di distribuzione libera (freeware), basata su un software di progettazione illuminotecnica disponibile (selezionato da ENEA). Tale piattaforma ha lo scopo di indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza, ecc., nella progettazione di impianti di illuminazione;
- l'individuazione da parte di ENEA dell'intervento dimostrativo (caso-studio presso un partner industriale) sulle tecnologie innovative afferenti a reti di illuminazione ad alta efficienza in applicazioni industriali: lampade ad alta efficienza, apparecchi ad alto rendimento ottico, alimentazione ad alta efficienza, led, regolatori di flusso, sistemi intelligenti di controllo e gestione dei carichi di illuminazione, integrazione con luce naturale;
- la progettazione dell'intervento del caso-studio in ambito illuminotecnico, nei suoi aspetti di qualità dell'ambiente luminoso e di efficienza energetica;
- la modellazione dell'intervento pilota e successiva sperimentazione preliminare sul dimostrativo realizzato, per la creazione di linee guida per la diffusione della conoscenza; creazione dei contenuti per il sito web.

L'attività sul tema dell'illuminazione industriale, si è svolta con le seguenti modalità:

- è stato individuato da ENEA il partner industriale presso cui svolgere le attività previste dal caso studio, AleniaAermacchi, che ha proposto di mettere a disposizione per l'attività un nuovo capannone da costruirsi presso la propria sede di Venegono Inferiore (VA);
- AleniaAermacchi ha fatto sapere che, per sue esigenze di pianificazione lavorativa, la costruzione del capannone sarebbe stata anticipata, per cui anche la progettazione dell'impianto di illuminazione sarebbe dovuta essere molto rapida. È stato quindi deciso di effettuare immediatamente la progettazione del caso con il software e le conoscenze già disponibili, per rispettare le esigenze di AleniaAermacchi, utilizzando le tecnologie innovative "fisiche" (cioè sorgenti, apparecchi, dispositivi di controllo, ecc.) come previsto dall'attività, ma spostando in un tempo successivo lo sviluppo della piattaforma innovativa per la progettazione illuminotecnica avanzata. Le Linee Guida (predisposte in collaborazione con il Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano) hanno costituito la base - secondo un criterio avanzato "statico" - per la stesura del progetto esecutivo e quindi la realizzazione dell'impianto di illuminazione reale.
- è stata svolta la simulazione dei contributi di luce naturale (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Roma la "Sapienza"), per valutare in diverse situazioni climatiche "standard" il possibile risparmio energetico derivante dall'utilizzo dei controlli avanzati. Questa attività è stata svolta a livello approfondito, ma non ha portato a conseguenze pratiche per l'edificio, data la tempistica particolare della realizzazione. Sono comunque disponibili molte informazioni utili per casi analoghi o per future eventuali modifiche alla struttura;
- sono state svolte le attività di sviluppo delle nuove tecniche informatiche utili per la progettazione, la modellazione dinamica e l'ottimizzazione illuminotecnica, percettiva, energetica, economica (Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano, Dipartimento di Informatica e Comunicazione dell'Università degli Studi di Milano). Una attività specifica di programmazione è stata affidata a una particolare ditta di programmazione specializzata nel settore illuminotecnico, in continuo contatto anche con il partner industriale Oxytech, proprietario del software originale.

Il caso, identificato da ENEA in un capannone industriale di AleniaAermacchi (industria aeronautica), rappresenta una situazione complessa con caratteristiche di dinamicità legata alla presenza di luce naturale ed esigenze di utilizzo variabili nel tempo. Il capannone, adibito a diverse funzioni lavorative, principalmente produzione e - in proporzione molto minore - uffici, è situato a Venegono Inferiore (VA) latitudine 45.44°N longitudine 8.54°E altitudine 320 m e ha dimensioni approx. 177 x 17 x 5 m, con un'altezza massima approx. 5-6 m nella zona verso

nord, 4,5 - 5,5 m nella zona verso sud; sono presenti shed con lucernai sul tetto, a 2,5 m dal lato ovest, lunghi 7,5 m, finestre sul lato ovest, finestra continua sul lato est, dotate di schermatura.

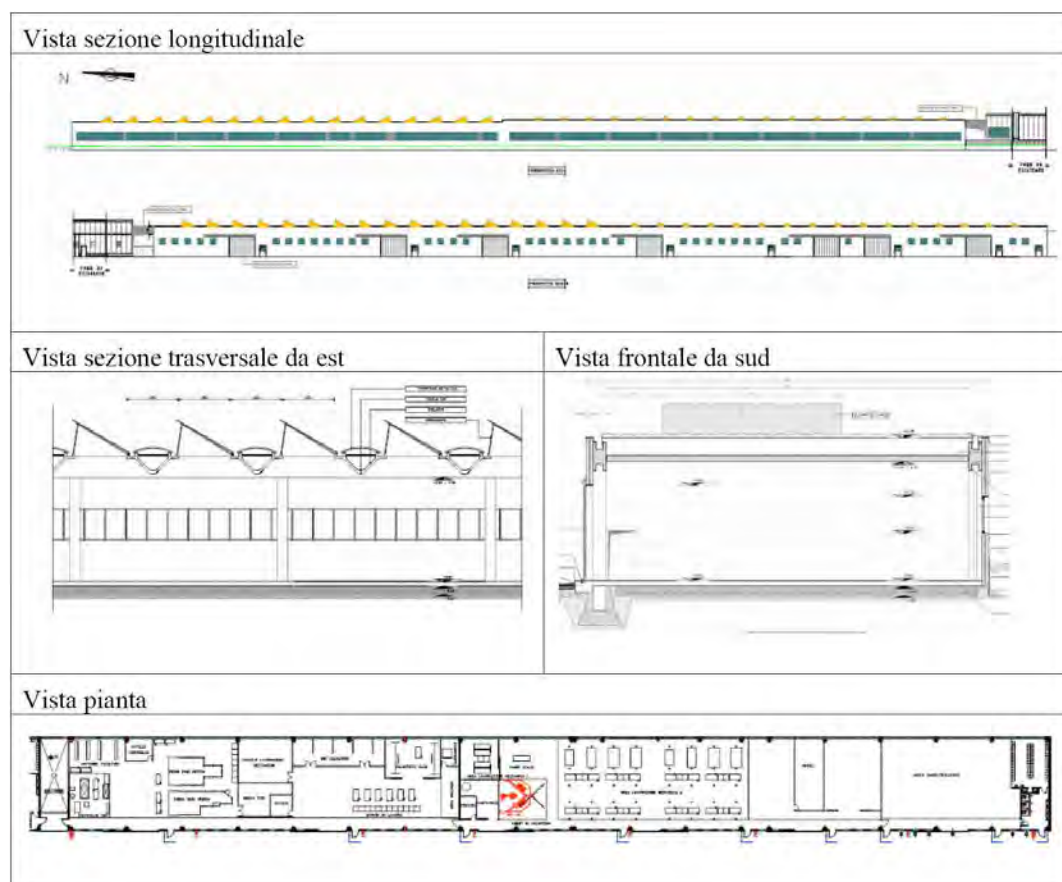


Figura 172. Viste, pianta e sezioni del nuovo capannone AleniaAermacchi di Venegono Inferiore (VA)

In stretta collaborazione tra ENEA e i partner è stata studiata la situazione in termini di qualità dell'ambiente luminoso e di efficienza energetica (AleniaAermacchi ha fornito le informazioni sul progetto del capannone e sulle esigenze di utilizzo dello stesso).

Sono state identificate diverse zone funzionalmente simili. Le zone sono separate tra loro da pareti vere e proprie o da suddivisioni 'logiche' (ad esempio il corridoio). Una prima suddivisione in macrozona comprende uffici, aree di produzione, aree di passaggio (corridoio, ingresso), servizi. Una suddivisione più fine è fatta in base alle diverse attività lavorative che si svolgono.

Ogni zona è composta da un ambiente, dove le esigenze di illuminazione sono generiche, e delle aree dove si svolge il compito visivo vero e proprio e in cui tale esigenza possono essere molto elevate. Le zone possono in linea di principio essere riconfigurate, per cui la posizione delle aree del compito visivo a sua volta non è necessariamente fissa nel tempo.

L'individuazione dei requisiti è stata fatta considerando anche i riferimenti normativi relativi, in particolare:

- la EN12464-1:2004 "Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni", la quale specifica i requisiti illuminotecnici per i posti di lavoro in interni, che corrispondono alle esigenze di comfort visivo e di prestazione visiva, dice che gli impianti devono tener conto del consumo di energia e quindi suggerisce di privilegiare installazioni efficienti, ma non pone vincoli in questo senso;
- La UNI EN 15193 del marzo 2008, "Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting", che vuole essere il riferimento per gli aspetti legati all'illuminazione della direttiva 2002/91/EC sulla "Energy Performance of Buildings". È introdotto l'indicatore LENI (Lighting Energy Numerical indicator), da utilizzare, insieme con quelli relativi a riscaldamento, climatizzazione, ventilazione e riscaldamento dell'acqua, per calcolare il fabbisogno energetico di un edificio. Infatti, tale indicatore quantifica il consumo energetico reale in kilowattora per metro quadrato e anno. La norma dichiara che le nuove installazioni devono essere conformi alla EN12464-1 e dà valori indicativi per la "qualità" dei sistemi di



illuminazione in diversi tipi di applicazioni. La "qualità" si esprime graficamente in "stelle" ed è valutata in base a diversi elementi, legati non solo alla potenza installata ma anche ai controlli e al contributo di luce naturale.

Le necessità e le aspettative sono state espresse in termini di "*Classe di qualità*", in base alle quali sono state inquadrare le possibili opzioni limite per l'impianto per avere una luce "di qualità". Sono state quindi identificate le tecnologie migliori - compresi i sistemi di gestione e controllo intelligente - per la realizzazione dell'impianto, e quindi per soddisfare queste necessità. L'edificio presenta delle situazioni molto dinamiche, per la presenza disomogenea delle persone e il contributo di luce naturale da finestre e lucernai. E' stato quindi scelto un impianto basato su lampade fluorescenti lineari (T8 e T5) con alimentazione elettronica, per massimizzare il possibile risparmio energetico attraverso dispositivi di controllo. In alcune zone di limitata estensione (servizi) sono proposte soluzioni con apparecchi a LED. Il pregio principale delle lampade fluorescenti lineari - un prodotto maturo di cui c'è ampia disponibilità di scelta sul mercato - è nel caso in esame la facilità di controllo, ottenuta tramite diverse soluzioni del mercato. E' quindi possibile inserire nell'impianto controlli per modulare la luce in termini di quantità e colore, in funzione dell'apporto di luce naturale, della presenza o meno delle persone, di temporizzazioni, ecc. senza dimenticare i controlli manuali per lasciare all'utente libertà di scelta. Data la tipologia di utilizzo, l'impianto è stato pensato per una illuminazione generale e, nelle aree del compito visivo, la possibilità di installare illuminazione localizzata (con apparecchi a LED o fluorescenti lineari) per soddisfare i requisiti richiesti.

Il controllo del flusso luminoso è pensato per ridurre il flusso in termini quantitativi e in alcune aree (uffici) è possibile anche modificare (in modo manuale) la temperatura di colore, in base alle esigenze dell'utilizzatore.

In Figura 173 sono mostrati i vincoli per il posizionamento degli apparecchi a sospensione e un esempio della disposizione dei sensori per il controllo del flusso luminoso.



**Figura 173. Posizionamento apparecchi a sospensione e sensori di controllo flusso luminoso**

Le Linee Guida per la progettazione dell'impianto di illuminazione, base per la stesura di un progetto esecutivo e quindi per la realizzazione di un impianto di illuminazione reale secondo un criterio avanzato "statico", sono state consegnate e presentate ad *AleniaAermacchi* il 4 luglio 2008. Il documento "*Eco Light Design - Linee guida impianto di illuminazione nuovo capannone AleniaAermacchi*" (*Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano*) presenta un quadro coerente di possibili componenti per l'impianto. Questo significa che, in mancanza di una definizione 'universale' dei prodotti e del reciproco interfacciamento, si è fatto specifico riferimento a produzione italiana di buona qualità. Questa opzione era del tutto esemplificativa e non limitativa delle scelte possibili per la realizzazione dell'impianto, poiché qualunque altra soluzione almeno equivalente sarebbe valida.

E' stata svolta un'analisi energetica dell'impianto proposto, verificandone la collocazione rispetto agli standard detti sopra.

L'edificio è stato costruito e l'impianto è stato installato. La scelta impiantistica di *AleniaAermacchi* è caduta essenzialmente sugli stessi componenti indicati a titolo esemplificativo nelle linee guida.

In parallelo sono state effettuate (*Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Roma la "Sapienza"*) simulazioni<sup>10</sup> per valutare il fattore di luce diurna nell'ambiente in situazioni di riferimento specifiche. In figura un esempio: cielo coperto (standard CIE), 21 dicembre, ore 12 in una zona dell'edificio.

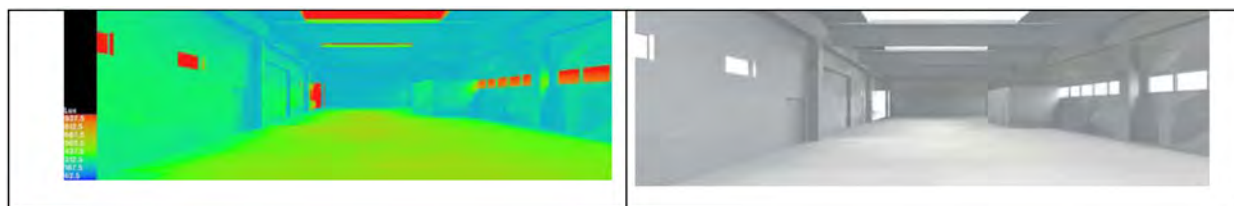


Figura 174. Esempio di output delle simulazioni effettuate

E' stata effettuata (*Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Roma la "Sapienza"*) un'analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per l'illuminazione artificiale (lampade, apparecchi) e naturale (materiali trasparenti, dispositivi schermanti, sistemi di trasporto della luce naturale) e sulla loro integrazione, presentando vantaggi e svantaggi per diverse opzioni.

Sono state quindi effettuate simulazioni dell'apporto di luce naturale parametrizzando la posizione e la superficie delle superfici trasparenti, suggerendo quindi possibilità di miglioramento.

Sono state prodotte anche Linee Guida per l'illuminazione naturale e integrazione con l'illuminazione artificiale (*Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Roma la "Sapienza"*).

E' stata fatta (*Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano*) un'analisi accurata della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto nel suo complesso, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc. Sono state definite le specifiche per il monitoraggio dell'impianto ed è stata acquisita la strumentazione relativa.

In parallelo è si è svolta l'attività di ricerca per l'implementazione di nuove funzionalità software sulla base dell'esistente pacchetto *LITESTAR* di *Oxytech s.r.l.* e in collaborazione stretta con la stessa *Oxytech*, per avere un tool complesso per progettazione illuminotecnica, la modellazione dinamica e ottimizzazione illuminotecnica, percettiva, energetica, economica. Il *Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano* ha scritto le specifiche per l'implementazione delle nuove funzionalità; il *Dipartimento di Informatica e Comunicazione dell'Università degli Studi di Milano* ha definito le specifiche per l'interfacciamento del software con l'ambiente di realtà virtuale. Tutto questo è confluito nella nuova versione di *LITESTAR 11*, freeware, rilasciata prima in versione Beta Test, e disponibile in versione consolidata a partire da luglio 2009. Per tale attività ENEA ha dato un contratto a una ditta specializzata (*t::REDs*) che si occupa principalmente di sviluppo e ricerca nel campo della computer grafica e in particolar modo sugli aspetti tecnici, come la modellazione e rendering in campo scientifico e architettonico, e ha una solida esperienza nella programmazione in campo illuminotecnico e sul software *LITESTAR* stesso.

Il nuovo *LITESTAR11* presenta alcune caratteristiche specifiche che lo contraddistinguono rispetto ad altri prodotti di progettazione del mercato:

- è basato su photon mapping;
- permette la valutazione della luce naturale su modelli più sofisticati del cielo CIE standard. I dati possono essere inseriti dall'utente per la propria località geografica, e la simulazione sarà tanto più accurata quanto più affidabili saranno i dati immessi. In particolare il calcolo viene effettuato in funzione della posizione geografica del sito (latitudine, longitudine e orientamento) e della collocazione temporale (giorno, mese, anno, ore e minuti). E' inoltre presente un parametro di turbidità che consente di simulare differenti situazioni atmosferiche (da cielo limpido a coperto). Il modello scelto consente di valutare in contributo in radianza spettrale del sole e del cielo, calcolato in funzione dei dati posizionali;
- permette l'utilizzo di "sensori" per pilotare l'impianto di illuminazione in funzione di parametri. I sensori sono entità definite all'interno del progetto, rappresentano dispositivi che possono monitorare lo stato dell'illuminazione nel progetto corrente. I sensori sono posizionati dall'utente e sono caratterizzati dalle seguenti proprietà (i sensori modellati sono di tipo orizzontale): posizione, orientamento, angolo di apertura del cono di misura, descrizione della curva di risposta, soglie di minimo e massimo, funzione di risposta (lineare), lista degli apparecchi collegati;
- è predisposto per utilizzare dati fotometrici di tipo spettrale (su bande); questo apre possibilità nuove per l'analisi di situazioni dove il colore è importante (ad esempio in applicazioni con il LED o dove è possibile variare la temperatura di colore delle sorgenti o anche per le valutazioni sulla luce naturale stessa, che varia le sue coordinate cromatiche durante il giorno e secondo le condizioni meteorologiche);

- permette un interscambio di dati con l'esterno: il programma fornisce in output i dati per poter effettuare una simulazione come post-processamento dei risultati forniti dai singoli calcoli (esportazione dei dati nel formato gfd), in particolare l'esportazione della scena 3D con texture contenenti i valori di illuminamento dell'intera scena. Questo a sua volta consente:
  - di effettuare simulazioni ripetute, per una ottimizzazione energetica dell'impianto ad esempio al variare delle condizioni naturali;
  - di creare le condizioni per la simulazione percettiva, cioè visualizzazione in realtà virtuale.

In Figura 175, un esempio di simulazione di un locale con finestra (apporto di luce naturale) e sensore per il controllo dell'impianto (rendering base). Sono mostrate anche le finestre di interfaccia con l'utilizzatore. In proposito, l'interfaccia con l'utente è stata notevolmente semplificata rispetto al software base, il che rende più molto fruibile l'utilizzo da parte di chi è esperto di illuminotecnica ma ha scarse abilità informatiche.

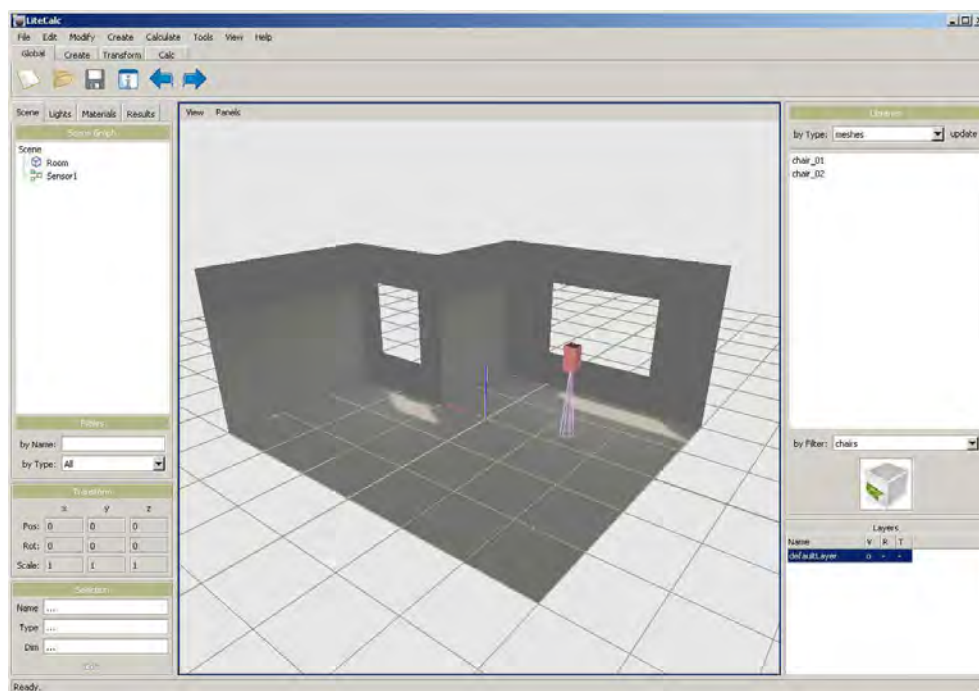


**Figura 175. Esempio di simulazione effettuata con il software**

Questa attività nella seconda annualità prosegue nel progetto relativo alle “Tecnologie per il risparmio elettrico nell’illuminazione pubblica”.

### L’accumulo elettrico con batterie (applicazione ad una funivia)

Gli impianti di trasporto per brevi distanze, quali metropolitane, impianti a fune, a nastro, ecc., sono caratterizzati da un moto e da un carico trasportato estremamente variabili nel tempo. Ciò si ripercuote sulla potenza richiesta all’azionamento che è fortemente variabile, penalizzando l’esercente dell’impianto sia per l’acquisto dell’energia, sia per le accresciute perdite di energia nello stesso impianto. Dall’altro lato il distributore dell’energia a fronte di una potenza, anche rilevante, da mettere a disposizione con i propri impianti vede un transito di energia piuttosto limitato (basso numero di ore equivalenti di carico annuo).

La possibilità di inserire un sistema di accumulo sull’alimentazione dell’impianto può migliorare notevolmente l’esercizio dell’intero sistema sia in termini di minore potenza richiesta che di minore energia richiesta. Occorre, però, una precisa analisi economica per decidere se i maggiori investimenti nel sistema di accumulo sono utilmente bilanciati dai risparmi di esercizio. ENEA, di concerto con l’Università di Pisa, ha individuato quale caso studio l’applicazione di un sistema di accumulo all’alimentazione dell’azionamento elettrico della funivia monocabina Funifor- San Martino.

Lo schema di alimentazione presenta quindi un sistema di accumulo posto tra la rete elettrica l'impianto. Quest'ultimo, negli impianti tradizionali, è un azionamento elettrico che prelevando potenza da una sezione trifase alternata alimenta motori elettrici. In linea di principio sono possibili due schemi di inserzione dell'accumulo nell'attuale impianto di alimentazione (Figura 176).

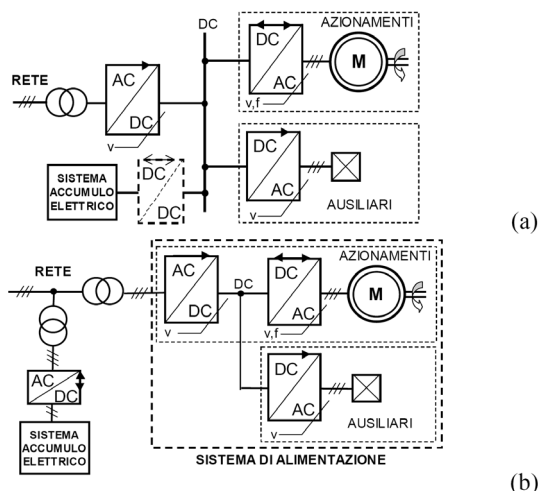


Figura 176. Possibili schemi del sistema d'alimentazione

Lo schema (a) di Figura 176 prevede un convertitore di interfaccia, collegato alla rete elettrica mediante trasformatore dedicato, che alimenta una sbarra in continua al quale sono collegate il sistema di accumulo, l'azionamento elettrico e i carichi ausiliari. Lo schema (b) invece presenta sul punto di consegna dell'energia da parte del distributore l'attacco per il sistema di accumulo con relativo convertitore di interfaccia e trasformatore dedicato, e l'attacco del sistema di alimentazione dell'impianto (azionamento e carichi ausiliari).

Nella soluzione (a) è presente ai morsetti dell'accumulo elettrico un convertitore opzionale (realizzato a linee tratteggiate) che, se presente, ha lo scopo di adattare la tensione ai morsetti del sistema di accumulo con quella sulla sbarra (denominata in figura "DC") a cui sono connessi tutti gli altri convertitori. In assenza di questo convertitore di interfaccia la tensione della sbarra DC è uguale a quella del sistema di accumulo, e quindi variabile al variare di quella dell'accumulo, in particolare più alta durante le fasi di carica e più bassa nelle fasi di scarica.

Nella soluzione (b) la tensione è normalmente mantenuta costante garantendo l'equilibrio dei flussi di potenza dalla rete all'azionamento.

Lo schema (a) è energeticamente preferibile per quanto riguarda i flussi di potenza entranti ed uscenti dall'accumulatore, infatti ad esempio nella fase di trazione l'energia fluisce dall'accumulo all'azionamento direttamente nel caso (a), mentre passa attraverso i convertitori di accumulo e di rete nel caso (b) con relative perdite nei componenti. Inoltre la soluzione (a) permette di risparmiare un trasformatore, ed un convertitore nel caso che la connessione al bus DC avvenga senza convertitore; in caso contrario si utilizzerebbe un semplice chopper bidirezionale (a), invece di un inverter bidirezionale (b).

Per queste ragioni, nel prosieguo dello studio si è fatto riferimento sempre allo schema (a). In particolare lo studio ha approfondito i seguenti aspetti:

#### 1) ANALISI DEI CARICHI DELL'IMPIANTO A FUNE

L'impianto funiviario è caratterizzato da un primo tratto sostanzialmente in salita, con dislivello verticale nel punto più alto rispetto alla stazione di partenza di 290m, ed un successivo tratto in discesa, dislivello verticale fra la stazione di partenza e quella di arrivo di 67 m.

Durante il tratto iniziale in salita la funivia assorbe dalla rete elettrica potenze con picchi anche di un 1MW, mentre durante il tratto in discesa la forza traente della fune si inverte, e quindi essa è in grado di erogare potenza elettrica che può essere utilizzata per caricare il sistema di accumulo, invece di dissiparla, come invece normalmente accade in assenza di accumulo.

Nella Figura 177 sono riportati gli andamenti dei flussi di potenza scambiati dall'azionamento con la barra in continua per alcuni dei cicli di riferimento in cui si è indicato con il nome di corse "in salita" e "in discesa" rispettivamente quelle corse che vanno dalla stazione con quota più bassa a quella più alta e viceversa.

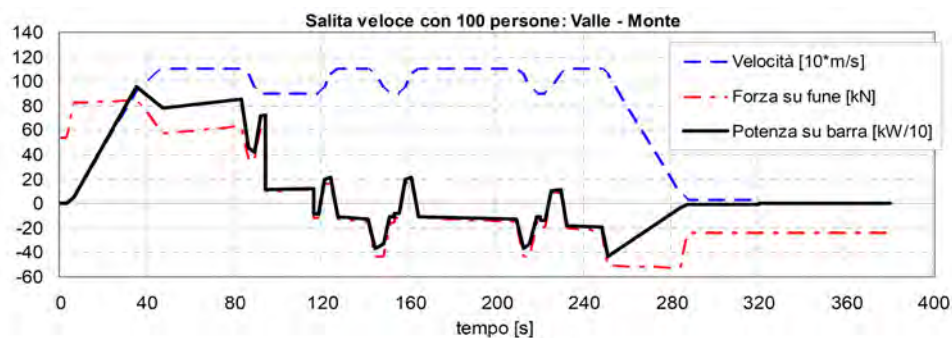


Figura 177. Esempio di ciclo di carico

Le varie condizioni di carico sono determinate dal numero di persone trasportate e dalla modalità della corsa che può essere in salita/discesa e lenta/veloce. Il carico giornaliero si può ricostruire invece considerando il numero di persone massimo trasportabili nelle ore di punta (475 persone/h) o nelle altre ore della giornata (300 persone/h). Il carico annuale prevede un funzionamento dell'impianto sia estivo (Giugno-Settembre) che invernale (Novembre-Aprile), in cui si prevedono al massimo 7500 corse l'anno per un totale di 660 ore complessive di viaggio/anno.

## 2) POSSIBILI BENEFICI DELL'INTRODUZIONE DI SISTEMI DI ACCUMULO

In linea del tutto generale benefici economici derivanti dalla gestione dell'impianto possono essere ottenuti con:

- **LOAD LEVELLING:** livellamento del profilo di carico, realizzando un assorbimento dalla rete pari alla potenza media di quella istantanea assorbita durante la corsa, compensando con l'accumulo gli scostamenti da tale media;
- **PEAK SHAVING:** eliminazione dei picchi di potenza più elevati attraverso l'utilizzo del sistema di accumulo, dimensionando il convertitore lato rete con una potenza inferiore a quella di picco.

L'abbassamento della potenza di picco impegnata può apportare economie nella gestione dell'impianto per effetto della riduzione di una quota delle tariffe dell'energia elettrica legate alla potenza. La misura della potenza impegnata viene effettuata dal distributore ogni quarto d'ora quindi teoricamente l'utente potrebbe dichiarare una potenza di impianto inferiore a quella di picco. Inoltre il distributore non dà nessun limite di potenza istantanea, purché quella misurata nel quarto d'ora sia pari a quella impegnata. Ovviamente tutti i picchi di potenza oltre quella dichiarata non sono garantiti e dunque potrebbero portare a frequenti interruzioni per sovraccarico della linea con la quale viene alimentato l'impianto. Questo è maggiormente critico per gli impianti di risalita che presentano una linea di alimentazione dedicata in quanto sono dislocati lontano dai centri di carico.

Il ciclo che comporta un maggior assorbimento è la corsa Salita Veloce (con 960 kW picco), quindi rappresenta il ciclo di riferimento nel caso in cui si voglia effettuare il *peak shaving*. Anche per il *load levelling* questo ciclo rappresenta il riferimento in quanto anche la potenza media è maggiore rispetto a gli altri (110 kW). Il ciclo Discesa Veloce è invece utile nel caso in cui si volesse dimensionare il sistema di accumulo per recuperare tutta l'energia derivante dalla frenatura, in quanto presenta la massima potenza ed energia di frenatura.

In base ad uno studio di massima un *load levelling* sarebbe possibile installando un accumulo capace di scambiare una energia variabile da 15-27 kWh in tempi inferiori a 300 s. Questi volumi di energia comportano grandi dimensionamenti che comportano investimenti difficilmente recuperabili dai benefici derivanti dall'esercizio dell'impianto.

Nel caso di *peak shaving*, invece, il sistema di accumulo è dimensionato per tagliare una parte dei picchi dei profili di carico. Ovviamente minore è la potenza installata nel convertitore di rete maggiore è il picco che si deve tagliare, quindi maggiore è l'energia che deve essere scaricata dal sistema di accumulo.



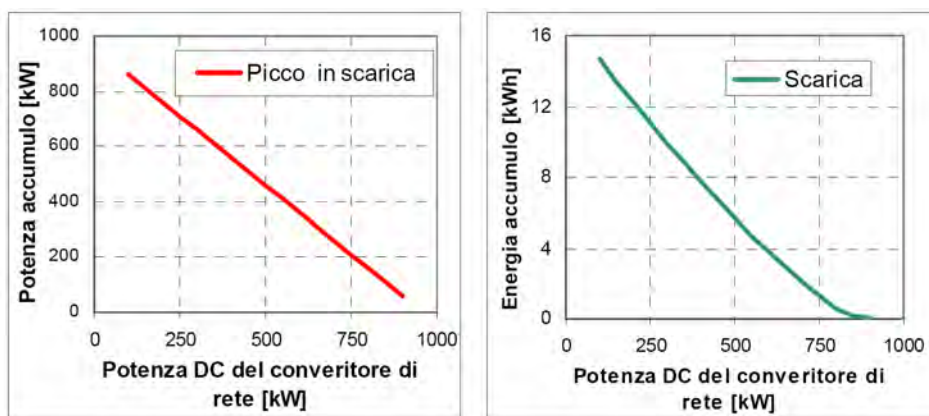


Figura 178. Picco di potenza ed energia scaricata dal sistema di accumulo al variare della potenza del convertitore di rete

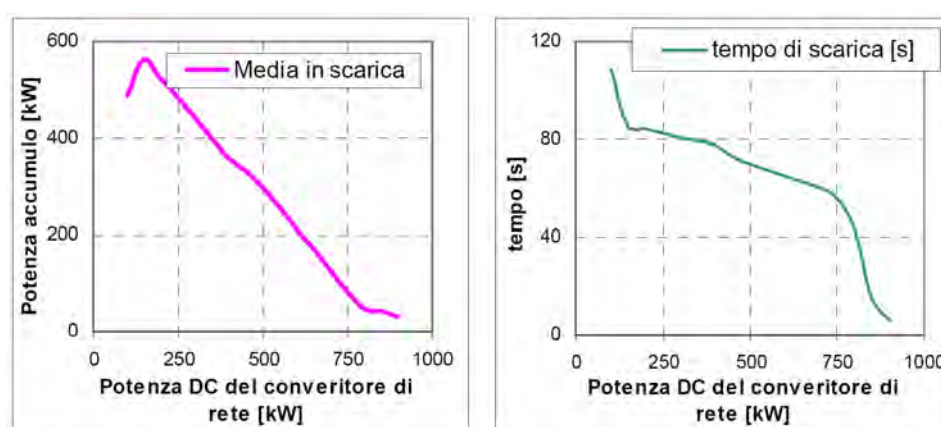


Figura 179. Potenza media e tempo di scarica del sistema di accumulo al variare della potenza del convertitore lato rete

In questo caso l'energia richiesta dal sistema di accumulo in scarica è variabile da 0 ad un massimo di 15 kWh. Sono state considerate diverse tecnologie di accumulo ed per ciascuna di queste sono state analizzate e dimensionate diverse configurazioni in funzione della potenza installata nel convertitore di rete.

### 3) SCELTA DELLA TECNOLOGIA DEL SISTEMA DI ACCUMULO

Sono state proposte e utilizzate molteplici tecniche di accumulo dell'energia classificabili in funzione della forma che l'energia assume all'interno del sistema di accumulo stesso:

- accumulo elettrochimico: l'energia elettrica, per essere accumulata viene convertita in forma potenziale chimica; essa è poi facilmente restituibile (salvo la parte perduta per le inevitabili inefficienze del sistema) per conversione inversa. Tipicamente questo avviene all'interno di *accumulatori elettrochimici monolitici* che effettuano al loro interno trasformazioni di specie chimiche;
- accumulo elettrostatico: esso viene effettuato nei cosiddetti supercondensatori (detti anche supercondensatori), e con essi l'energia è accumulata in forma elettrostatica all'interno di questo tipo di condensatori, che possono raggiungere le centinaia di farad o più;
- accumulo elettromagnetico: esso viene effettuato nei cosiddetti SMES (Super Conducting Magnetic Energy Storage systems) con i quali l'energia è accumulata in forma magnetica, in linea di principio è formato da una bobina superconduttrice interfacciata attraverso un opportuno convertitore. La bobina è alimentata dal convertitore stesso e permette di conservare l'energia sotto la forma magnetica:  $\frac{1}{2} L I^2$ ;
- accumulo idrostatico: l'energia elettrica viene convertita in energia potenziale gravitazionale tramite il sollevamento di un liquido ad una quota più alta;
- accumulo aerostatico: l'energia elettrica viene convertita in energia potenziale di compressione di un gas, tipicamente aria;

- accumulo cinetico: mediante l'uso di volani l'energia elettrica viene convertita nell'energia cinetica di rotazione del rotore del volano.

Dei sistemi esaminati molti non sono adatti a piccoli impianti:

- i sistemi idrostatici e aerostatici richiedono grandi spazi per via della scarsa quantità di energia per unità di volume del sistema;
- i sistemi SMES hanno convenienza economica soltanto in grandi impianti per via del costo connesso con la necessità di realizzare grandi sistemi di refrigerazione al fine di mantenere la parte attiva a temperatura superconduttiva.

Per quanto riguarda gli accumulatori elettrochimici, è ben noto che di essi esistono diverse tipologie, ognuna delle quali presenta vantaggi e svantaggi tecnici oltre che costi notevolmente differenti. Gli accumulatori elettrochimici oggi più significativi per la loro disponibilità e presenza sul mercato sono i seguenti: Accumulatori al Piombo, (Pb), agli idruri metallici (NiMH), al Litio, al Sodio-Nickel Cloro (Na-NiCl). A parità di tipologia esistono realizzazioni costruttive che ne esaltano la capacità di erogazione di quantità di energia relativamente grande, a potenze relativamente modeste (*accumulatori di energia*), o, all'opposto esaltano le potenze di erogazione parzialmente a scapito dell'energia globalmente disponibile (*accumulatori di potenza*).

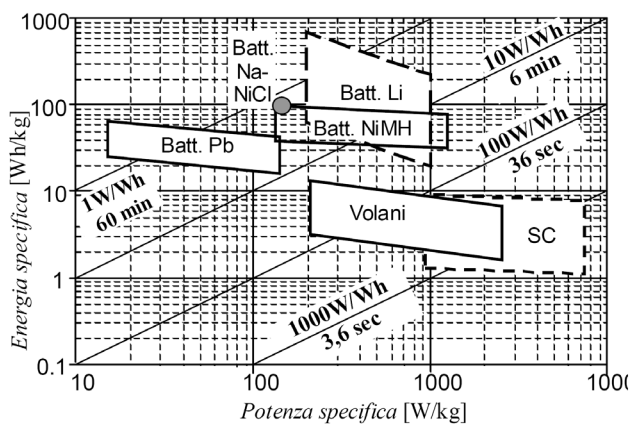


**Figura 180. Diagramma di Ragone dei vari sistemi di accumulo**

Tale valore è stato ricavato sulla base degli effettivi diagrammi di carico previsti per il sistema in esame è riportato nella Figura 181. Si osserva che quando la potenza del convertitore di rete è prossima alla potenza di picco richiesta dall'azionamento, quindi per piccoli valori di potenza da erogare da parte del sistema di accumulo, il rapporto P/E cresce fortemente, e quindi risulta progressivamente sempre più conveniente adottare sistemi di accumulo di potenza piuttosto che di energia.

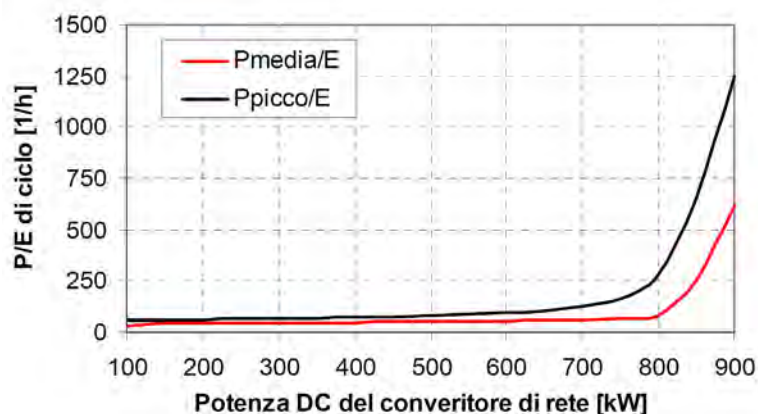


**Figura 181. Rapporto P/E per il ciclo di riferimento**

Questo confronto basato sul rapporto potenza-energia può essere esteso ai supercondensatori. Per effettuare un confronto delle capacità di erogazione di potenza e di energia si possono pertanto riportare in un unico grafico le caratteristiche di energia specifica (misurata in un tempo di prova relativamente lungo, ad esempio due ore) e di potenza specifica (potenza massima erogabile in un breve tempo, ad esempio un minuto o 30 secondi).

La Figura 180 mostra chiaramente quali sistemi di accumulo siano più adatti all'erogazione di potenze elevate o di energie elevate.

Per rendere quantitativo il confronto occorre rilevare il rapporto P/E legato al ciclo di riferimento, per vari valori della potenza di rete impegnata.



Nei paragrafi successivi si riportano i risultati dello studio nel caso di supercondensatori e accumulatori al Litio. Inoltre anche la soluzione con Piombo-Acido è stata analizzata come base di riferimento per l'analisi economica.

#### Utilizzo di accumulatori al litio polimero

Gli accumulatori al Litio-Polimero presentano l'elettrolita immerso in un composto di polimero solido, al contrario del Litio-Ioni in cui questo è contenuto in un solvente organico. Questo tipo di costruzione presenta diversi vantaggi tra cui il fatto che il polimero solido non è infiammabile e di conseguenza le batterie risultano meno pericolose se vengono danneggiate. Inoltre esse presentano un impacchettamento molto denso senza spazi tra le celle e senza contenitore, la densità energetica di tali batterie è dunque maggiore di più del 20% rispetto ad una Litio-Ione classica ed è circa tre volte migliore rispetto alle altre batterie, permettendo pesi ed ingombri molto ridotti, ideale per applicazioni veicolari ma anche stazionarie quando gli spazi a disposizione sono molto ristretti. Se confrontate alle batterie Li-Ioni, le batterie Li-Po hanno un più rapido invecchiamento. Ad ogni modo, recentemente, produttori dichiarano di aver raggiunto un numero di 600÷800 cicli di carica/scarica completa.

La valutazione della vita di una batteria espressa in cicli, non può però prescindere dal tenere in giusta considerazione la profondità di scarica a cui la batteria viene ciclata. Con profondità di scarica dell'ordine del 10-20% la vita utile può facilmente arrivare ad alcune decine di migliaia di cicli, il che le rende compatibili con l'applicazione in esame.

I dimensionamenti sono stati determinati considerando le celle elementari Ultra High-Power della casa costruttrice *Kokam*, che offre un'ampia gamma di accumulatori Li-Po di piccole, medie e grandi dimensioni. In particolare delle grandi capacità produce celle sia orientate all'energia che alla potenza.

Le singole celle Li-Po hanno una tensione operativa variabile da 2,7 a 4,2V, ovvero una variazione rispetto alla tensione nominale (3,7V) pari a -27%, +13,5% con un rapporto  $V_{min}/V_{max}$  uguale a 0,64. Se si vuole evitare di avere una così ampia variabilità della tensione del bus DC, si può interporre fra la batteria ed il bus un convertitore DC/DC. L'introduzione di tale convertitore introduce ovviamente delle perdite che producono di fatto un leggero sovra dimensionamento del sistema.

Dai cataloghi di accumulatori orientati alla potenza sono state ricavate le caratteristiche di scarica sia per differenti ratei di corrente che per differenti temperature. Infatti dalle curve di Figura 182a è possibile calcolare di quanto si riducono i tempi di scarica (quindi la capacità) nel caso in cui l'accumulatore viene sottoposto a correnti di scarica elevate fino a 15÷20 volte quella nominale. Dal grafico di Figura 182b invece è possibile calcolare la riduzione del tempo di scarica alle temperature più basse (fino a -20 °C).

Per il dimensionamento è stata considerata sia la potenza media di scarica che il massimo valore della potenza istantanea durante la scarica ("potenza di picco").

Considerando una tensione media di scarica pari a 3,3÷3,5V è possibile scegliere la capacità ed il numero di celle capaci di erogare la potenza di picco richiesta al massimo rateo di corrente, nelle peggiori condizioni di temperatura esterna (-20 °C). Tale dimensionamento risulta ovviamente maggiore rispetto a quello ottenibile considerando la potenza media scaricata al rateo massimo di corrente per il tempo di scarica richiesto, ma è quello che garantisce il corretto funzionamento dell'accumulo nel ciclo.

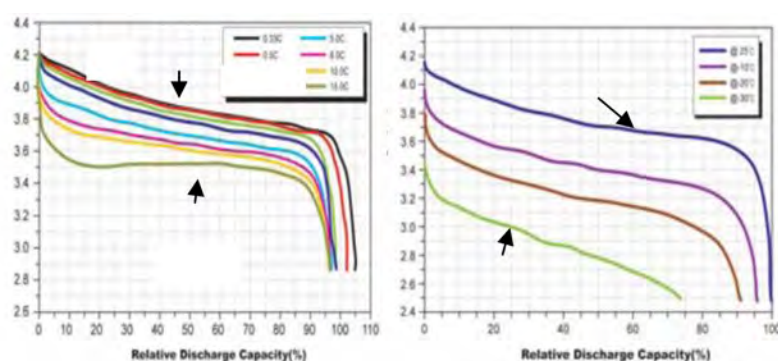


**Figura 182. Caratteristiche di scarica a diversi valori di corrente e diverse temperature di accumulatori Li-Po della Kokam**

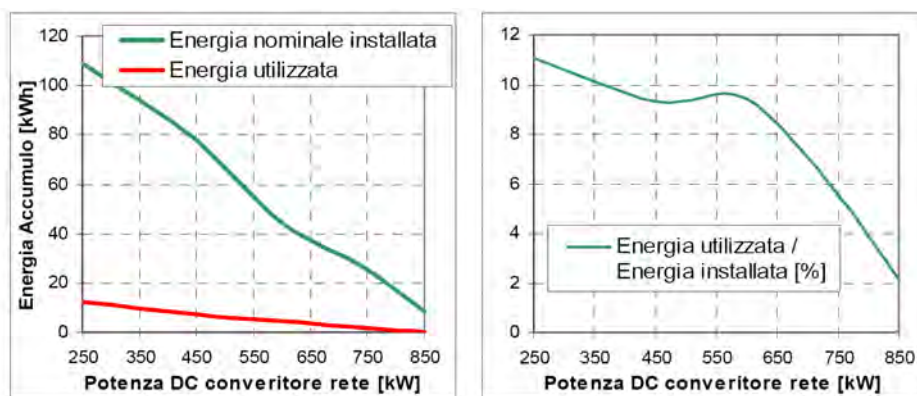


**Figura 183. Energia installata negli accumulatori Li-Po per diverse potenze del convertitore di rete**

Nella Figura 183 sono riportati i risultati del dimensionamento dell'accumulo nel caso di diverse potenze installate nel convertitore di rete. In particolare sono riportate l'energia nominale installata (riferita ad un rate di 1C), e dell'energia utilizzata (nel caso di rate elevati di corrente).

Per quanto concerne i costi i costruttori forniscono un costo unitario pari ad un dollaro a Wh di energia nominale, essendo quest'ultima determinata come prodotto di capacità nominale per tensione media di scarica (3.7 volt per cella). A tale costo deve essere aggiunto il costo del case e del BMS (Battery Management System). Infatti i pacchi di questi accumulatori sono soggetti a problemi di sbilanciamento, essi necessitano di un sistema di monitoraggio ed equalizzazione. Tutte le tensioni di cella e le temperature devono essere monitorizzate durante il funzionamento in modo da garantire per ciascuna cella la tensione nell'intervallo 2.7÷4.2V e le temperature corrette di esercizio. Il costo del BMS ha un entità comparabile a quello del pacco accumulatore.

Sulla base di quest'analisi preliminare è stato dimensionato un pacco batterie (Figura 184) potenza di picco 60 kW, poi sottoposto ad una serie di prove in Casaccia.

Le sue specifiche sono sinteticamente riassunte qui di seguito:

- n. 75 Moduli Li-Po da 12 Ah e tensione nominale di 3,7 V ciascuno
- n. 1 BMS (Battery Management System) limiti di intervento: 2,7 V, 4,2 V, 40 °C e 60 °C.



**Figura 184. Pacco batterie con potenza di picco di 60 kW**

#### Utilizzo di supercondensatori

I supercondensatori si utilizzano per tutte quelle applicazioni in cui è richiesta elevata potenza, ma per brevi durate. Per i dimensionamenti effettuati nel presente studio sono stati considerati i moduli da 125 V-63 F della casa costruttrice MAXWELL.

Attraverso ripetute simulazioni dell'impianto funzionante con il ciclo di riferimento sono state definite le diverse configurazioni del pacco di supercondensatori al variare della potenza installata nel convertitore di rete. I risultati ottenuti sono stati riassunti nei grafici di Figura 185.

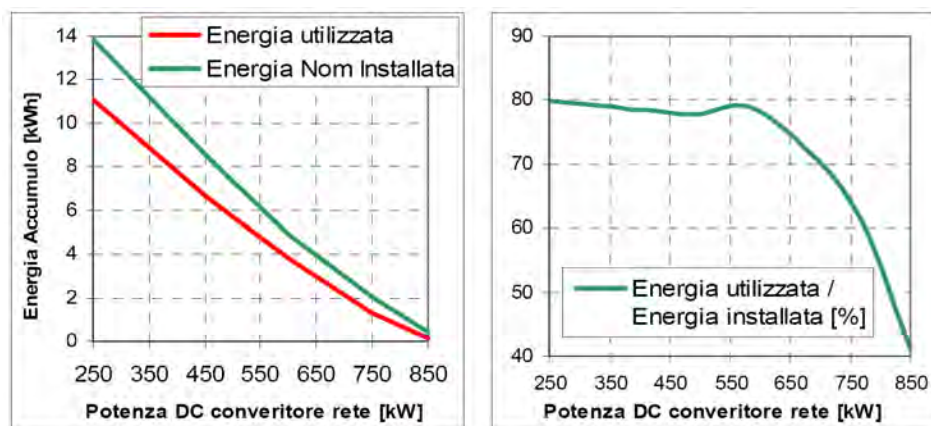


Figura 185. Energia installata nei supercondensatori per diverse potenze del convertitore di rete

In normali condizioni operative la tensione del pacco di supercondensatori può variare anche del 50% rispetto la tensione nominale, per questo motivo il pacco non può essere collegato direttamente al bus DC. Risulta quindi necessario l'installazione di convertitori DC/DC per ciascuna serie di moduli.

#### 4) ANALISI DEI COSTI

L'analisi costi-benefici è stata eseguita considerando l'effetto di una possibile introduzione di sistemi di propulsione innovativi per impianti a fune in sostituzione di quelli tradizionali. Nell'analisi sono stati calcolati tutti i costi legati all'acquisto e installazione di nuovi dispositivi, non considerando tutte quelle voci di costo che sono legate a componenti o sottosistemi comunque presenti negli impianti tradizionali.

Infatti essendo definite le specifiche per la trazione, il sistema di propulsione composto da motori elettrici e convertitori DC/AC restano dimensionati allo stesso modo per entrambe le soluzioni. I sottosistemi che caratterizzano la soluzione innovativa invece, come ad esempio il convertitore di rete o il sistema di accumulo, sono stati considerati nel dettaglio per questa analisi economica.

L'analisi consiste nella determinazione del costo d'impianto. Normalmente quando si parla di costi si deve distinguere il costo di primo impianto dal costo totale attualizzato sulla vita utile dello stesso.

Il costo di primo impianto è il costo che si sostiene al momento della realizzazione dello stesso, pari alla somma dei costi di impianto di ogni singolo componente o sottosistema ed esprimibile attraverso la relazione (1).

$$C_{IMP} = C_{BOP} + \sum_{k=1}^{N_{sottosistema}} C_{1k} \quad (1)$$

Nel caso dell'impianto in esame per il costo di primo impianto viene considerato solo il costo del convertitore di rete e del sistema di accumulo con rispettivo Balance Of Plant (BOP). I costi dell'azionamento e dei sistemi ausiliari non sono stati considerati in quanto comunque sostenuti sia nella soluzione innovativa che quella tradizionale.

Poiché non tutti i componenti avranno la stessa vita utile e in via del tutto generale queste possono essere diverse da quella dell'impianto, si è determinato il costo di impianto totale attualizzato tenendo conto delle loro sostituzioni. Il costo totale attualizzato può dunque essere descritto dalla relazione (2).

$$C_{IMP} = C_{IMP} + \sum_{k=1}^{N_{SOST}} C_{SOST\_ATk} \quad (2)$$

dove:

- $C_{IMP}$  è il costo di primo impianto.
- $SOST_{ATTk}C_{-}$  è il costo attualizzato delle sostituzioni effettuate per alcuni sottosistemi.
- $SOST N$  è il numero delle sostituzioni effettuate, queste dipendono dalla vita utile del componente e dell'impianto:

$$N_{sostituzioni} = \frac{Vita\ utile\ impianto}{Vita\ utile\ sottosistema}$$

La vita utile dell'impianto si ipotizza essere di 20 anni, mentre è stato ipotizzato un tasso di attualizzazione  $\alpha = 7\%$ . Per il convertitore di rete si ipotizza una vita utile pari a quella dell'impianto. Il costo per unità di potenza di un convertitore elettronico si è stimato essere:

$$C_{1Conv\_RETE} = 100 \text{ € /kW} \quad (3)$$

L'impianto tradizionale prevede un convertitore lato rete con potenza nominale pari ad un 1 MW, capace di alimentare direttamente, senza alcun altro sistema di accumulo, gli azionamenti elettrici per la trazione in condizioni di massime prestazioni richieste.

Nelle diverse soluzioni innovative dell'impianto la potenza installata nel convertitore di rete è sempre minore della massima potenza richiedibile dall'azionamento alle massime prestazioni. Questo comporta un down-sizing del componente che si traduce in un beneficio.

#### Sistema di accumulo

L'analisi dei costi differisce a seconda della tecnologia:

- Accumulatori al Piombo Acido (Pb)
- Supercondensatori (UC)
- Accumulatori al Litio-Polimeri (LiPo)

Per ciascuna di queste tecnologie è differente sia la vita utile che la modalità di funzionamento operativa dell'impianto. In particolare la vita utile dei supercondensatori è stimata essere pari a quella dell'impianto, mentre per gli accumulatori al Litio-Polimeri e quelli al piombo sono previste diverse sostituzioni.

In generale la formula di costo del sistema di accumulo può essere espressa dalla relazione (4).

$$C_{ACC} = C_{CONV} + C_1 + \sum_{k=k^*} \frac{C_1}{(1+\alpha)^k} \quad (4)$$

dove:

- $C_{CONV}$  è il costo del convertitore DC/DC se installato;
- $C_1$  è il costo di primo impianto dell'accumulo che dipende ovviamente dalla tecnologia scelta (in particolar modo pari a 1\$/Wh nominale per il Litio, 200 €/kWh per il piombo e 1÷3,5 c€/F per cella per i supercondensatori nel caso di serie o prototipo);
- $k^*$  rappresenta gli anni in cui vengono effettuate le sostituzioni del pacco.

Sempre nella relazione (4) il convertitore del sistema di accumulo compare solo all'anno zero (al momento della realizzazione dell'impianto) in quanto esso ha una vita utile pari a quella dell'impianto stesso.

La soluzione con supercondensatori non comporta alcuna sostituzione dei moduli, quella con accumulatori al Litio e al Piombo prevedono una sostituzione ogni 3 anni.

La vita delle due tecnologie di accumulatori è risultata essere uguale in quanto per il Piombo è prevista, durante il normale funzionamento dell'impianto, una profondità di scarica del 5%, mentre per le Litio del 20%.

#### 5) ANALISI DEI BENEFICI

In generale, benefici economici ottenibili con un opportuno dimensionamento dell'impianto ed una intelligente gestione dello stesso, possono essere classificati come di seguito:

- benefici legati alla riduzione della quantità di energia annua assorbita;
- benefici dovuti alla riduzione della potenza impegnata dal distributore;
- benefici derivanti dallo spostamento dell'utilizzazione dell'energia in orari con prezzi più bassi.

In particolare, i vantaggi economici derivanti dal diverso assorbimento di energia dell'impianto in esame, analizzando la composizione dei costi che portano alla individuazione delle tariffe [5], sono rilevabili da quanto indicato di seguito:

- la tariffa per il servizio di misura e di trasmissione resta invariata;
- la tariffa per il servizio di distribuzione diminuisce sia per la riduzione della potenza di picco, sia perché è diminuito il volume dell'energia annua assorbito;
- le componenti tariffarie di tipo A e varie UC, legate ad oneri generali, restano invariate;
- le CCA (Componenti di Costo di Acquisto) dipendono fortemente dalle fasce orarie considerate oltre che dal consumo annuo di energia. Nel caso in esame il quantitativo annuo assorbito è minore (per effetto dei recuperi in frenatura), ma non tale da far cambiare il prezzo del kWh acquistato, né si possono ipotizzare spostamenti degli acquisti dell'energia in fasce più economiche avendo, per ipotesi, mantenuto lo stesso andamento della richiesta di mobilità. Pertanto i vantaggi economici derivano esclusivamente dalla minore quantità di energia richiesta e dalla minore potenza impegnata.

#### Determinazione del costo dell'energia

Il costo dell'energia consumata dall'impianto può essere semplicemente stimata facendo riferimento alle forme contrattuali in cui vengono riportate le varie componenti di costo. Con particolare riferimento alle utenze di media tensione, il costo è composto da tre quote. La prima è una quota costante annua per ogni punto di prelievo, che inoltre differisce a seconda della fascia di potenza complessivamente impegnata, in dettaglio esistono tre fasce, una per utenze con una potenza impegnata  $P < 100\text{kW}$ , la seconda con  $100 < P < 500\text{kW}$  e l'ultima per  $P > 500\text{kW}$ .

La seconda quota di costo è invece funzione della potenza complessivamente impegnata ed è espressa in €/kW per anno. Anche questo coefficiente è diverso a seconda della fascia di potenza impegnata. Infine la quota di costo funzione del volume di energia assorbita viene espressa attraverso un coefficiente in termini di €/kWh per anno, che differisce a sua volta in base alla fascia di potenza impegnata.

Calcolo dei benefici economici in normali condizioni di funzionamento dell'impianto.

Il beneficio economico che è possibile ottenere è stato determinato considerando il normale funzionamento dell'impianto sia nel caso di 3500 che 7500 ore di funzionamento annuo. I risultati ottenuti nel caso di 7500 cicli sono riassunti nella Tabella 100.

**Tabella 100. Analisi benefici nel caso di 7500 cicli di funzionamento anno**

| $P_{AC}$<br>kW | Quota fissa<br>€/anno | Quota potenza<br>€/({kW y}) | Quota P<br>k€/y | Quota energia<br>unitaria<br>c€/kWh | Energia<br>MWh/y | Quota E<br>k€/y | Benefici<br>k€/y |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| 278            | 398                   | 28,36                       | 7,88            | 0,093                               | 72,4             | 120             | 82,0             |
| 500            | 384                   | 24,89                       | 12,44           | 0,081                               | 98,7             | 150             | 52,5             |
| 556            |                       |                             | 13,84           |                                     | 105              | 157             | 45,2             |
| 667            |                       |                             | 16,60           |                                     | 116              | 171             | 31,2             |
| 833            |                       |                             | 20,73           |                                     | 131              | 190             | 12,0             |
| 944            |                       |                             | 23,50           |                                     | 138              | 200             | 2,4              |
| 1000           |                       |                             | 24,89           |                                     | 139              | 202             | 0,0              |

Attraverso le simulazioni dei cicli di riferimento sono state calcolate i volumi di energia assorbiti dalle varie configurazioni del convertitore di rete e sistema di accumulo al variare della potenza impegnata lato rete. I benefici sono stati infine calcolati considerando la diminuzione di costo rispetto alla soluzione senza sistema di accumulo.



### Risultati delle analisi per le varie tecnologie del sistema di accumulo considerate

Le analisi costi-benefici possono essere riassunte in grafici dove si riporta anno per anno la cumulata dei costi e dei benefici attualizzati all'anno 0: anno di installazione dell'impianto. In maniera cautelativa si è fatto riferimento alla condizione peggiore di usura del sistema di accumulo con 7500 cicli equivalenti anno, ma con i benefici calcolati sia nel caso di 3500 cicli che nel caso di 7500, nel primo caso i benefici saranno notevolmente inferiori in quanto questi in parte sono proporzionali al volume complessivo di energia assorbita dal sistema. Come per i costi di impianto distribuiti anche per i benefici l'attualizzazione all'anno iniziale è fatta considerando un tasso  $\alpha = 7\%$ . Le Figure 186 e 187 riportano il caso di dimensionamento con potenza installata del sistema di accumulo rispettivamente pari a 500 e 667 kW, con 3500 e 7500 cicli di funzionamento l'anno.

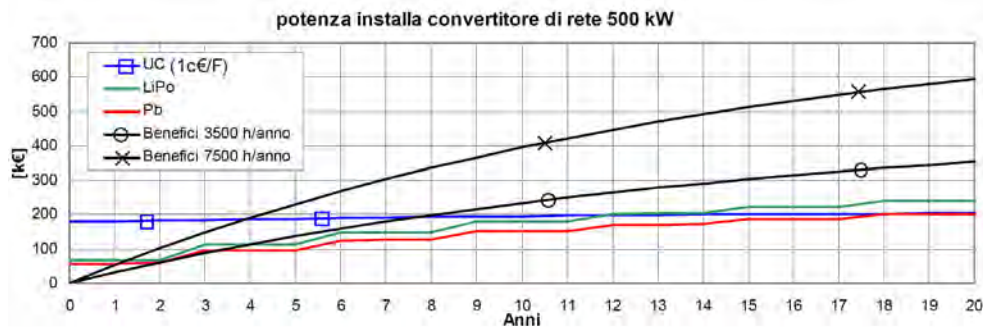


Figura 186. Analisi costi-benefici nel caso di potenza del convertitore di rete pari a 500 kW

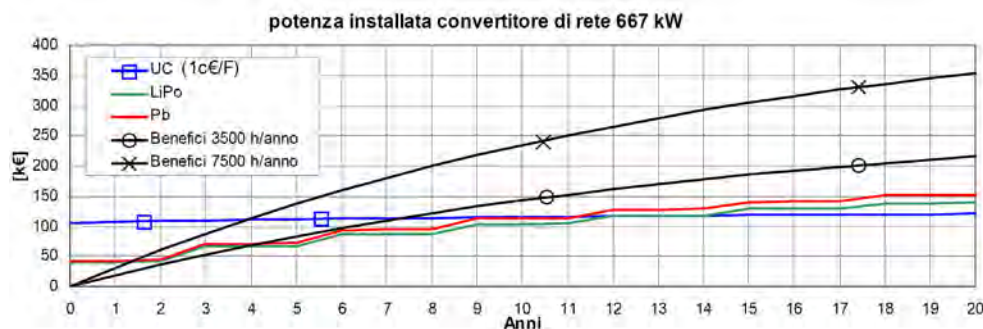


Figura 187. Analisi costi-benefici nel caso di potenza del convertitore di rete pari a 667 kW

Nel caso di potenza installata pari a 278 kW e uso di accumulatori elettrochimici l'investimento viene recuperato dopo un anno per il caso di 7500 ore di funzionamento annuo e 3,5-4 nel caso di 3500 ore. La soluzione con supercondensatori ha tempi recupero dell'investimento molto superiori, più che doppi. I tempi di recupero dell'investimento rimangono molto ridotti anche nel caso di potenza installata di 500 kW, mentre aumentano sensibilmente in caso di potenze superiori.

In conclusione l'inserimento di un sistema di accumulo per l'alimentazione di impianti a fune porta dei vantaggi energetici, anche consistenti, poiché permette il recupero dell'energia in frenatura e la riduzione della potenza impegnata dalla rete di distribuzione. Dall'analisi dei costi e benefici si osserva che per potenze del convertitore di rete inferiori ai 900 kW, gli investimenti si ripagano nella vita dell'impianto. I tempi di ritorno sono più brevi nel caso di potenze installate al di sotto dei 500 kW, in cui mediamente è possibile avere un recupero dell'investimento dopo solo 2÷4 anni nel caso di accumulatori al Pb o LiPo e circa 4÷8 anni nel caso di supercondensatori.

### L'accumulo elettrico con supercondensatori (applicazione ad un carro ponte)

L'attività in oggetto è stata svolta congiuntamente tra ENEA, il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università "Federico II" di Napoli, il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università di Roma Tre ed il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano.

Tra le motivazioni che hanno portato alla scelta dell'applicazione ai carriponte, possiamo annoverare:

- la natura discontinua dei prelievi di potenza effettuati dalla rete con possibilità di attuare il "peak shaving";
- la possibilità di recuperare l'energia durante l'abbassamento dei carichi movimentati;
- la diffusione che tali sistemi trovano in ambito siderurgico, in aree portuali, interporti, ecc, dove la frequenza d'uso degli stessi anticipa risultati interessanti sotto il profilo dei recuperi di energia.

Coerentemente con questa impostazione, ci si è mossi in tre direzioni i) definizione delle strategie di controllo, anche per quanto le stesse influenzano il dimensionamento del sistema ii) progettazione dell'attività sperimentale iii) valutazioni tecnico-economiche.

La sperimentazione si è voluta in condizioni non troppo dissimili da quelle reali, soprattutto in termini di scala, con moduli o sezioni di impianto significative. L'ENEA dispone infatti, presso i suoi laboratori, di un banco freno in grado di simulare le diverse condizioni di carico in cui si trova a lavorare un azionamento di un carro ponte. La prima fase di lavoro è quindi consistita nella definizione delle specifiche tecniche del prototipo dell'azionamento, partendo dalle specifiche di un carro ponte reale.

L'attività svolta ha analizzato i seguenti aspetti:

#### 1) SPECIFICHE DEL SISTEMA IN SCALA REALE E DEFINIZIONE DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO E GESTIONE DEI DISPOSITIVI DEL SISTEMA

Il sistema di riferimento riguarda un azionamento per carro ponte con accumulo a supercondensatori; a partire dalla rete elettrica trifase, l'alimentazione del sistema è ottenuta tramite un ponte raddrizzatore trifase a diodi con relativo condensatore di link che provvede a garantire una tensione continua sul dc-link. La presenza di opportuni filtri in ingresso al ponte raddrizzatore garantisce il rispetto dei limiti normativi nel punto di interconnessione alla rete di distribuzione dell'energia elettrica. L'azionamento elettrico preposto alla movimentazione del carro ponte si compone di una macchina trifase ad induzione e di un inverter trifase con controllo vettoriale ad orientamento di campo.

Il banco di supercondensatori (UC: Ultracapacitor) provvede ad alimentare l'azionamento elettrico durante la fase di sollevamento dei carichi (scarica UC) e a recuperare l'energia che si rende disponibile durante la fase di discesa dei carichi (ricarica UC). Per interfacciare il sistema di accumulo con il dc-link è necessario un convertitore elettronico di potenza dc-dc bidirezionale del tipo innalzatore/abbassatore che utilizza una configurazione a ponte con tre rami, ognuno costituito da due switch con diodi in antiparallelo e induttori in ingresso; l'impiego di due rami in parallelo permette di avere correnti di esercizio sufficientemente contenute e l'eventuale funzionamento in interleaving con la conseguente riduzione dell'ingombro degli induttori di ingresso. Il terzo ramo della

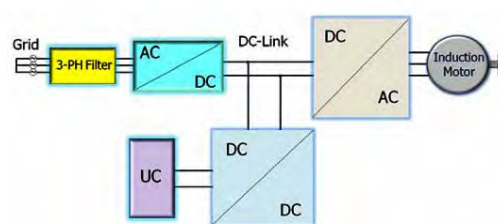


**Figura 188. Schema a blocchi dell'azionamento**

Definita l'architettura del sistema, è l'analisi del ciclo di carico per il motore preposto alla movimentazione meccanica a permetterci la definizione del dimensionamento dei componenti, a partire dall'accumulo elettrico. Tra i parametri principali da tenere in considerazione per la selezione dell'unità di accumulo vi sono infatti:

- l'energia richiesta dall'azionamento,
- la tensione e la corrente di esercizio.

In termini di energia da accumulare, sono possibili tre scelte, secondo che sia da soddisfare una richiesta di energia: i) massima, relativa ad un ciclo di scarica UC che consenta il livellamento del prelievo dalla rete, ii) minima, relativa ad un ciclo di carica UC che consenta il recupero di tutta l'energia di frenatura disponibile durante la discesa del carico iii) media, data dalla media matematica delle due precedenti situazioni. Per ciascuna delle tre scelte, va implementata una diversa strategia di controllo.



In termini di tensione e di corrente, per garantire un buon funzionamento del convertitore dc-dc (per la gestione dei supercondensatori), è opportuno che la tensione operativa di massima carica del banco di supercondensatori sia non troppo distante dal valore della tensione del dc-link, per la quale un valore di circa 500 V ( $V_{max}$ ) è stato ritenuto adeguato al caso in esame. Come modulo unitario si è quindi scelto il modello Maxwell BMOD0063 P125 da 63 F/125 V, caratterizzato da una corrente continuativa di 150 A, utilizzato nel trasporto pesante (filobus ed autobus) e che dà quindi buone garanzie in ambiente industriale. Nel nostro caso i livelli di tensione adottati

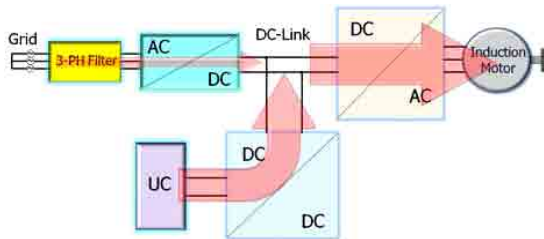


**Figura 189. Andamento dei flussi di potenza dalle sorgenti al carico**

richiedono una configurazione serie/parallelo, con stringhe costituite da 4 moduli. Selezionato il modulo UC da utilizzare e modellato il sistema, si sono state provate diverse strategie di controllo, e per ogni caso considerato, si è calcolato il valore complessivo di capacità del banco UC ed il numero totale di moduli da utilizzare. La determinazione della logica di controllo per la gestione dei flussi di potenza del sistema ha tenuto in considerazione che la tensione del dc-link è imposta dalla rete tramite il ponte raddrizzatore, e l'azionamento elettrico è controllato in velocità e con modalità vettoriale, sia durante il funzionamento da motore che nel caso di funzionamento da generatore.

Il convertitore di interfaccia dei supercondensatori (Figura 190), trovando valori di tensione imposti sia lato supercondensatori dalle condizioni dello stato di carica degli stessi sia lato dc-link, è regolato in corrente sia durante la fase di carica che in quella di scarica.

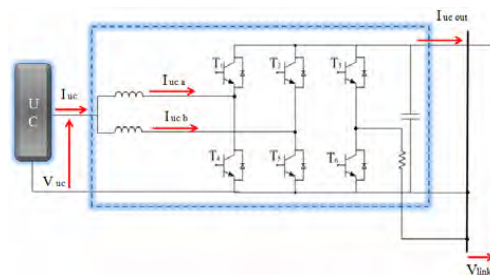


**Figura 190. Convertitore dc/dc bidirezionale per la regolazione del blocco di Ultra Capacitors (UC)**

Le percentuali del riferimento di corrente possono essere opportunamente modificate in entrambe le situazioni nel corso del funzionamento in base al valore attuale della tensione del dc-link rispetto al valore di riferimento. In tale modo, la rete è chiamata sempre a fare il saldo del nodo in corrente fornendo di volta in volta all'azionamento elettrico o al sistema di accumulo la quota parte di corrente mancante.

Il modello per la simulazione è stato messo a punto ed analizzato per tre valori di capacità del banco di Ultracapacitors rispettivamente per  $C=31F$ ,  $C=66F$ ,  $C=93F$  (minima, media e massima energia riferita al profilo di carico) e la simulazione ha prodotto per il profilo di carico fissato del tipo di Figura 191 i risultati mostrati in Figura 192.

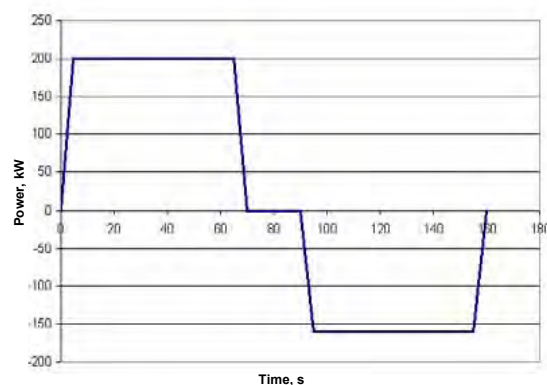


**Figura 191. Profilo di carico**

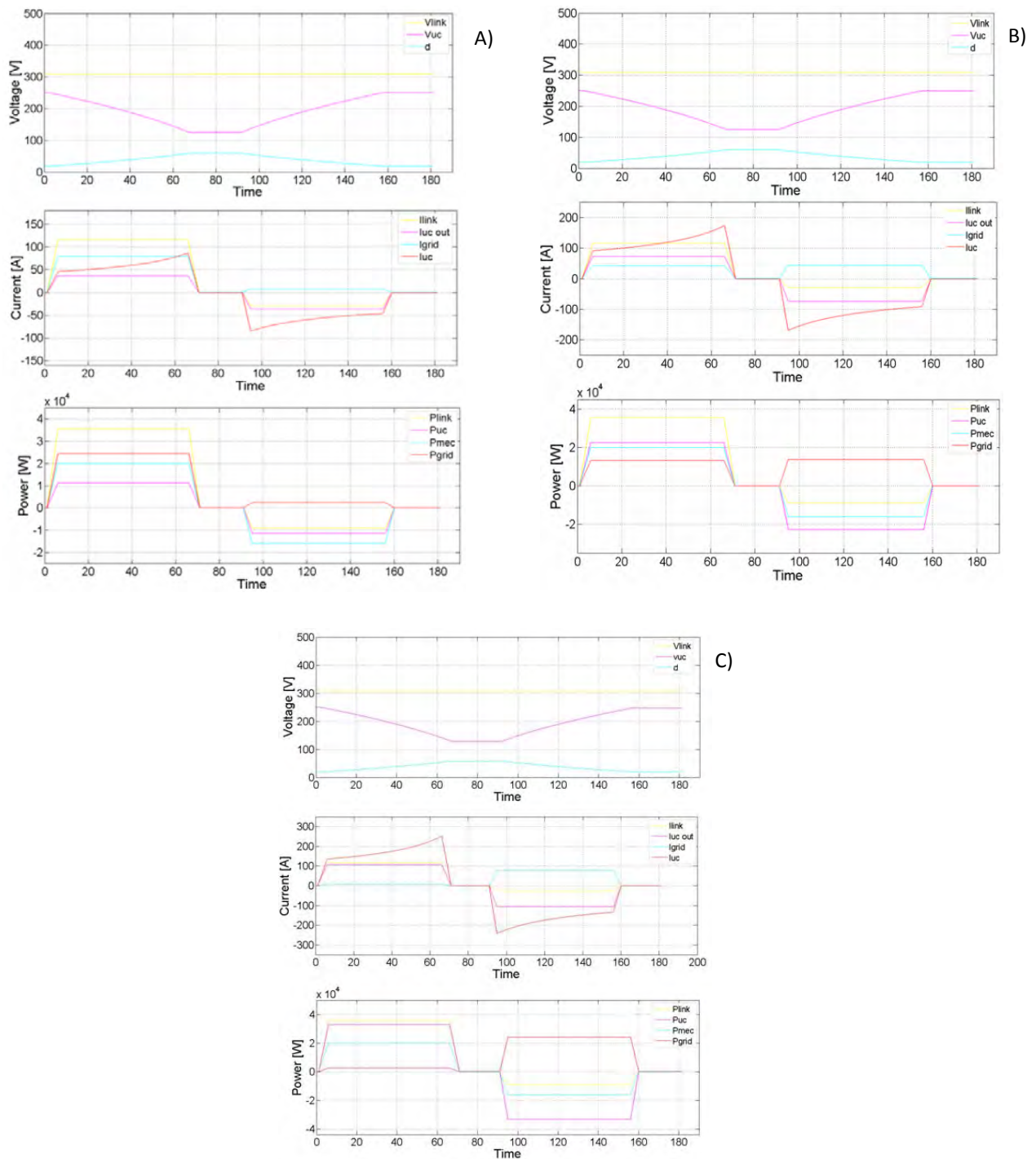


Figura 192. Risultati della simulazione per C=31F (a), C=63F (b) e C=94.5F (c)

## 2) PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO DI PROVA

Il prototipo è stato realizzato presso i laboratori ENEA Casaccia (Dipartimento *Tecnologie per l'energia, fonti rinnovabili e risparmio energetico*) in cui è presente un banco freno in grado di simulare le diverse condizioni di carico in cui si trova a lavorare un azionamento di un carro ponte. Il freno motore è infatti in grado di eseguire una regolazione di velocità del motore dell'azionamento in modo che possa funzionare nei due quadranti C positivo e negativo ed n sempre positivo. Tenendo presente la potenza del banco prova ed i risultati ottenuti dal programma di simulazione messo a punto presso l'Università di ROMA TRE, è stato acquisito e montato in ENEA un azionamento in grado di simulare un azionamento in scala ridotta del carro ponte (Figura 193). Tale azionamento ha una potenza di 20 kW ed una tensione sul link in continua di 375 V.



**Figura 193. Vista di insieme del prototipo costruito presso l'ENEA**

Per l'acquisto delle apparecchiature necessarie per la realizzazione del prototipo è stata eseguita una dedicata analisi di mercato. Durante questa analisi, la possibilità di programmare i convertitori ha rappresentato un elemento molto importante per la scelta. Infatti la maggioranza dei convertitori presenti attualmente sul mercato non consentono un completo controllo del comando dei componenti in quanto sono realizzati per applicazioni specifiche e realizzano già al loro interno tutte le logiche di controllo necessarie per la specifica applicazione. Al fine di simulare differenti cicli di lavoro e differenti condizioni di carico del sistema è invece necessario poter controllare il funzionamento del convertitore DC/AC direttamente connesso al motore dell'azionamento. Inoltre, per rendere possibile lo studio e l'implementazione di opportune strategie di controllo per la gestione dei flussi di energia scambiati tra il carico, la rete primaria ed il sistema di accumulo, anche i convertitori che interfacciano la rete primaria e il sistema di accumulo con il bus in continua devono essere completamente controllabili, si sono installate apparecchiature fornite da *Elettronica Santerno*, poiché il gruppo di lavoro dell'Università di Napoli ha già in precedenza acquisito le competenze necessarie per la programmazione dei convertitori.

Il convertitore dc/dc è stato programmato implementando sul DSP dello stesso le strategie di controllo studiate. La messa a punto del sistema è stata eseguita sfruttando il sistema di comunicazione ModScan che consente di rilevare le grandezze di interesse (tensioni e correnti in diversi punti dell'impianto) e di modificare il valore di alcuni parametri caratteristici del funzionamento del convertitore dc/dc.

### 3) MESSA A PUNTO DEL SISTEMA E RISULTATI SPERIMENTALI

La messa a punto del prototipo è stata eseguita attraverso un ciclo tipo di prova. Questo ciclo è consistito nel simulare la salita, la traslazione e la discesa di un carico di circa 8 tonnellate. Il profilo di potenza meccanica richiesto all'asse del motore è rappresentato in fig. 194a, mentre l'andamento della velocità di rotazione nella figura 194b.

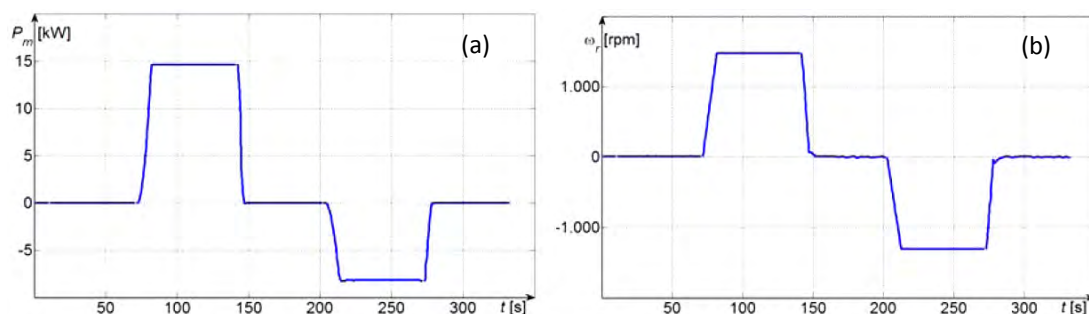


**Figura 194. Diagrammi sperimentali della potenza meccanica assorbita dal motore di sollevamento (a) e della velocità di rotazione dell'asse del motore (b)**

Come si vede dalle figure nella fase di salita la potenza meccanica è ceduta al carico e la macchina elettrica funziona da motore; nella fase di traslazione la macchina elettrica è ferma ed il carico è tenuto in sospensione attraverso un freno meccanico; durante la fase di discesa la potenza elettrica è negativa e la macchina elettrica funziona da generatore verso rete.

Nelle Figure 195-197 sono poi riportati i diagrammi delle forme d'onda in differenti punti dell'impianto. La Figura 195 mostra la tensione concatenata di alimentazione del motore e la corrente assorbita da una fase. È evidente la modulazione PWM a circa 3 kHz della tensione, mentre la corrente presenta un contenuto armonico ridotto per l'effetto filtrante del motore.

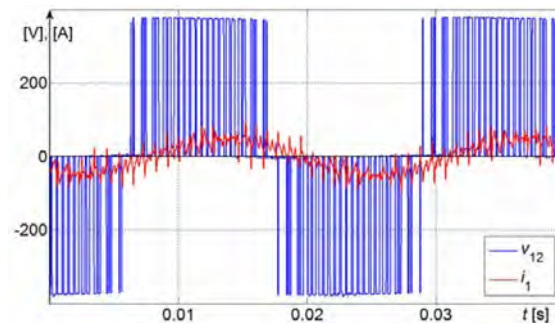


**Figura 195. Andamento sperimentale della tensione concatenata di alimentazione del motore (tecnica PWM unipolare) e della corrente di una fase durante la fase di sollevamento**

In Figura 196 è invece riportato l'andamento della tensione e della corrente del dc bus. La tensione è mantenuta costante ad un valore di circa 400 V dal controllo presente sul convertitore rigenerativo verso rete.

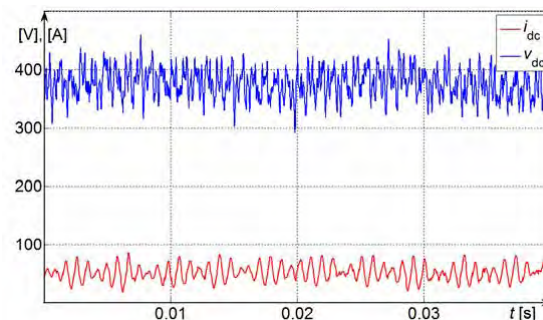


**Figura 196. Andamento sperimentale della tensione e della corrente del bus in continua durante la fase di sollevamento**

La Figura 197 riporta poi la tensione concatenata di rete e la corrente assorbita da una fase. La presenza del convertitore rigenerativo verso rete consente di assorbire una corrente avente un contenuto armonico molto ridotto e sfasata di circa 30° in ritardo rispetto alla corrispondente tensione concatenata. Questo significa che l'assorbimento di potenza dalla rete avviene con fattore di potenza praticamente unitario.

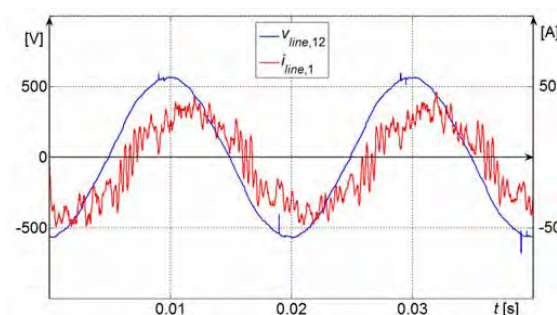


**Figura 197. Andamento sperimentale di una tensione concatenata di rete e di una corrente di fase durante il sollevamento**

Al fine di effettuare un confronto tra i dati sperimentali e quelli simulati è stata quindi effettuata una simulazione fissando la tensione di link uguale a quella effettivamente realizzata di 375 V. Nelle Figure 198-199 sono riportati i risultati simulati e quelli sperimentali, ponendo sulla destra le grandezze graficate e i range di variazione. Il confronto fra i risultati misurati e quelli ottenuti con simulazione mostra come tali risultati non si discostino dai primi in modo rilevante.

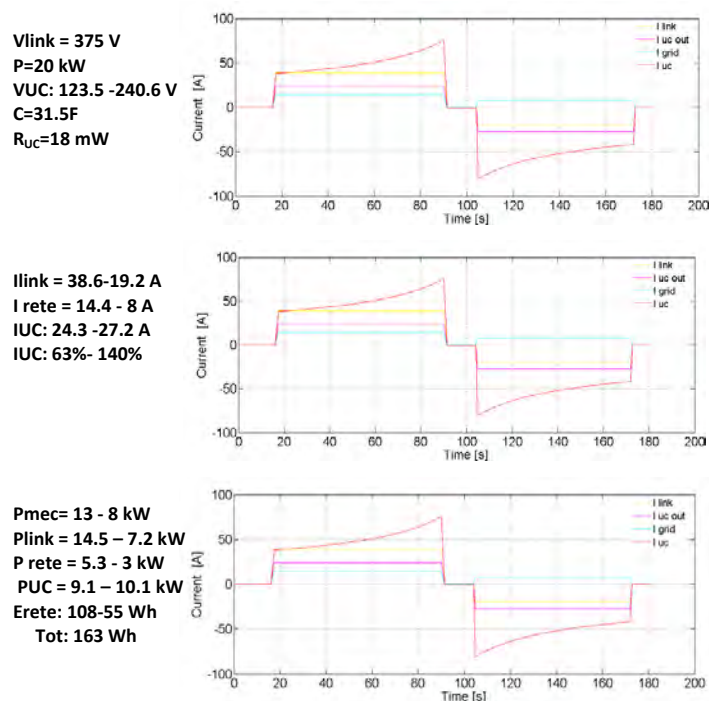


Figura 198. Simulazione dell'impianto realizzato

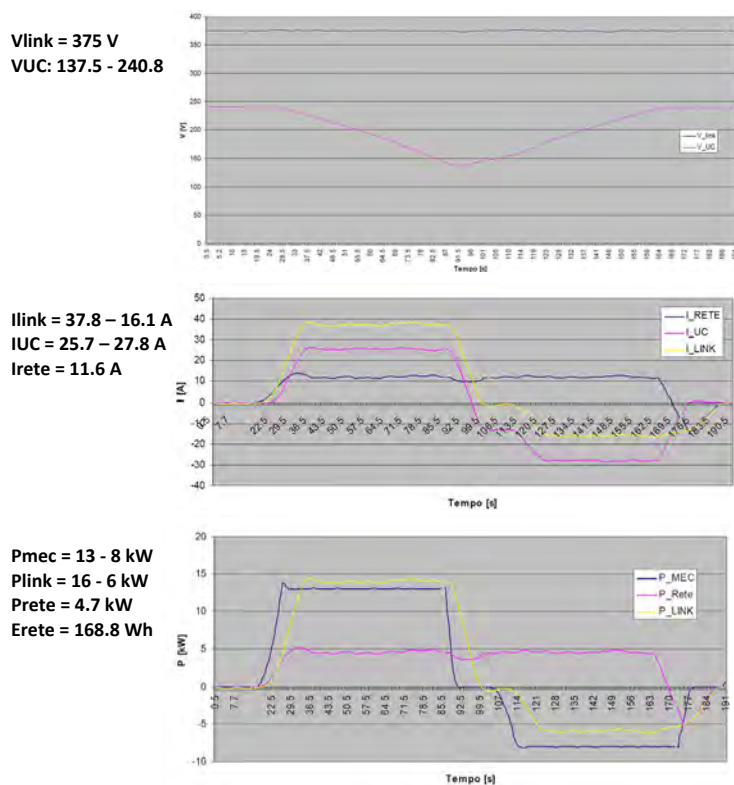


Figura 199. Risultati sperimentali ottenuti dall'impianto realizzato



Per quanto attiene lo scambio di energia con la rete, nel caso in cui sono presenti gli UC e nel caso in cui questi componenti sono assenti, nel primo caso l'energia scambiata con la rete è di 337 Wh, nel secondo caso il valore finale è di 533 Wh.

Il recupero energetico realizzato, nell'ipotesi di un rendimento meccanico complessivo del 60% (valore utilizzato nel settaggio del freno), è del 40%; questo porta ad un valore del rendimento elettrico complessivo (convertitori, motore e supercondensatori) del 70% circa, valore che va approfondito ma che comunque appare molto buono, indicativo di un rendimento di carica e scarica dell'accumulo prossimo al 90%.

Gli obiettivi principali delle prove sperimentali hanno quindi riguardato l'analisi delle prestazioni ottenute tramite l'impiego dei supercondensatori come unità di accumulo; in particolare sono state analizzate le capacità dei supercondensatori di:

- gestire i picchi di potenza in modo da ridurre l'erogazione dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica durante la fase di sollevamento dei carichi;
- recuperare l'energia cinetica resa disponibile durante la discesa dei carichi.

#### 4) VALUTAZIONI ECONOMICHE

Si vuole a questo punto andare a determinare il tempo di ritorno dell'investimento del sistema di accumulo, valutando il risparmio in termini economici del costo dell'energia elettrica consumata. costo dell'energia elettrica è determinato tramite una tariffazione binomia; il costo dell'energia elettrica, infatti, tiene conto della potenza contrattuale impegnata oltre che dell'energia consumata.

La valutazione economica del tempo di ritorno economico dell'investimento (Pay back period) deve inoltre tenere conto del costo del denaro (*tasso i*), e della variazione del costo dell'energia elettrica per effetto del mercato (*tasso j*). L'analisi, in particolare, terrà conto di due scenari: il primo in cui si considererà il solo costo del denaro *i* (SCENARIO 1) e, un secondo in cui si considereranno entrambi i tassi, con due diversi valori (SCENARI 2 e 3).

Indipendentemente dal valore dei tassi di attualizzazione, i costi di investimento iniziale del sistema di recupero dell'energia di frenatura sono comuni.

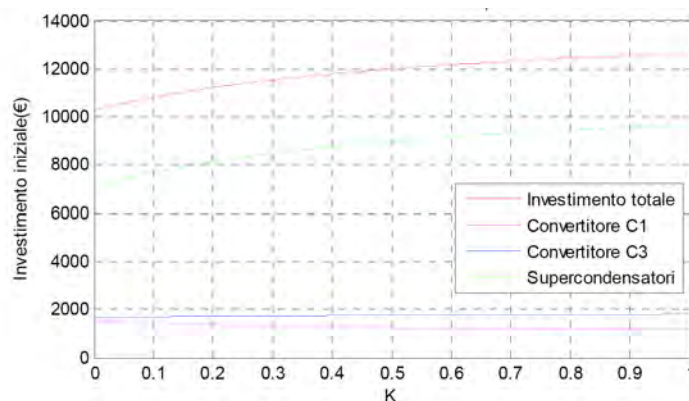


Figura 200. Investimento iniziale in funzione del parametro K

Tutti i costi/risparmi verranno attualizzati, su base annua, al tempo 0 dell'investimento. Questo significa che il costo dell'investimento del sistema di recupero dell'energia di frenatura corrisponde alla somma dei costi attuali precedentemente valutati ed esposti in Figura 200, mentre i risparmi futuri vengono attualizzati al tempo 0.

Rimandando al rapporto del Politecnico di Milano (disponibile sul sito Web), per gli altri risultati, si espongono di seguito solo quelli relativi allo scenario 3, che si ritiene il più plausibile e che va a considerare i seguenti valori dei tassi *i* e *j*.

*tasso i*: 5%;

*tasso j*: 10%.

Si considera inoltre un tempo di vita d'impianto pari a 20 anni e di eseguire un numero pari a 50 cicli al giorno del tipo di figura 185 (a,b). In Figura 201 e 202 si riportano gli andamenti delle due grandezze.

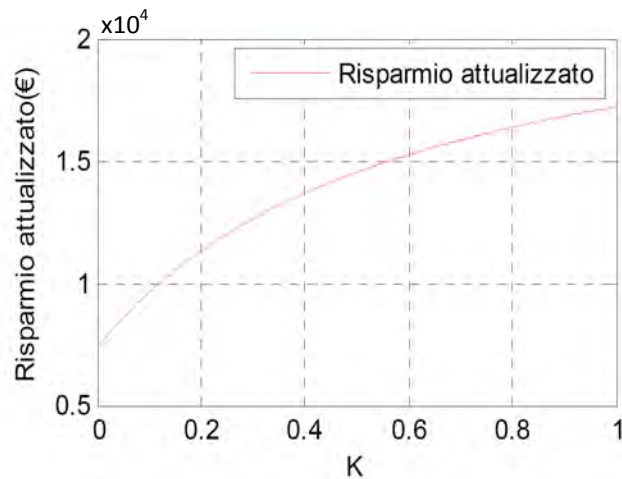


Figura 201. Risparmio attualizzato a fine ciclo di vita in funzione del parametro K

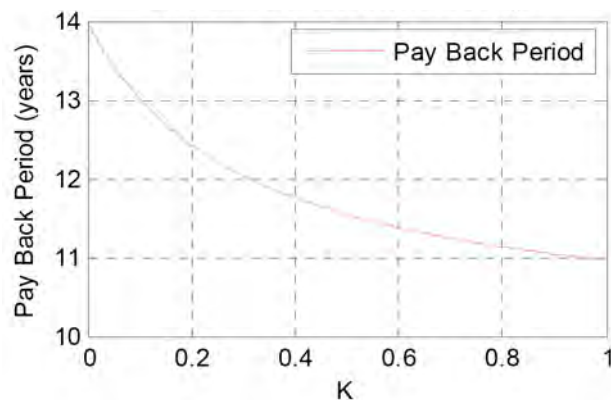


Figura 202. Tempo di ritorno dell'investimento del sistema di recupero dell'energia

A fine vita impianto il risparmio attualizzato al tempo 0 (risparmi totali del costo dell'energia attualizzati al tempo zero diminuiti dell'investimento iniziale) sono compresi tra 7.500€ e 17.000€ (a seconda della dimensione del sistema di accumulo) a fronte di un investimento iniziale compreso tra 10.000 € e 13.000 €.

Si osservi come la frequenza d'uso indicata, 50 cicli/giorno, è relativa a poco più di 2 sollevamenti l'ora, valore tipico per i carri ponte utilizzati in officine meccaniche. Considerando invece carriponte inseriti nel processo di produzione, con frequenze d'uso di 10-20 operazioni ogni ora, come ad esempio in un'acciaieria, il tempo di ritorno è compreso tra i due anni nel caso di 500 di sollevamenti/giorno ed i 4 anni per 250 sollevamenti. Tutta l'analisi ha inoltre preso in considerazione di recuperare la sola energia potenziale nella fase di discesa dei container movimentati. In molte applicazioni, però, vi è un'altra quota di energia recuperabile e per nulla trascurabile, ossia quella relativa alla fase di frenata dell'intera struttura carroponete/gru portuale. In questo caso il ritorno dell'investimento è sicuramente relativo a un intervallo temporale più breve che può arrivare sino a dimezzarsi.

Nella parte finale del lavoro, al fine di completare il metodo d'analisi relativo alla valutazione tecnico – economica del sistema d'accumulo per il recupero dell'energia cinetica di frenatura e/o potenziale di discesa, viene illustrato il dimensionamento di un sistema d'accumulo centralizzato, nel caso in cui vi siano più utilizzatori (es. carroponete/gru) alimentati da un'unica rete d'alimentazione. L'analisi si basa su di un approccio probabilistico e non su di un concetto cronologico: che un valore di potenza, necessario ad alimentare tutti gli utilizzatori, sia richiesto al sistema di accumulo, è solo un concetto statistico. L'analisi, in particolare, considera che i diversi eventi (assorbimenti di potenza) siano statisticamente indipendenti, quindi la probabilità che si verifichino un certo assorbimento di potenza globale dal sistema di accumulo è data dal prodotto delle probabilità che si verifichino i singoli assorbimenti da parte dei diversi carichi. La sommatoria di tutti i prodotti è 1 in quanto nel suo insieme l'evento assorbimento di un certo valore di potenza è un evento certo.

Con quest'approccio il sistema d'accumulo verrà dimensionato al fine di soddisfare la totalità degli eventi che hanno una probabilità di verificarsi maggiore, o uguale, ad un valore definito in fase di progetto. Il sistema d'accumulo sarà tanto più piccolo quanto minore è il valore della probabilità definito in fase progettuale.



Nell'ambito delle applicazioni di sistemi di accumulo elettrico di cui ai precedenti punti 7 e 8, all'attività di studio e di analisi delle Università si è quindi affiancata una importante attività sperimentale svolta presso i laboratori ENEA della Casaccia. Un primo tipo di attività sperimentali è stato rivolto alla sperimentazione in laboratorio dei sistemi di accumulo prescelti per le due applicazioni. Altro tipo di prove sono quelle "hardware emulated", dove nella sperimentazione di sistema i componenti e sottosistemi sono in maggioranza reali e solo in parte sostituiti da appositi emulatori. La sola modellistica non avrebbe infatti offerto, specie dal punto di vista della misura dell'efficienza energetica del sistema di accumulo, nessuna garanzia di attendibilità dei risultati ai fini dello sviluppo del software di controllo. Inoltre, l'attività di ricerca sui sistemi di accumulo ha consentito la predisposizione di una metodologia di carattere generale finalizzata a:

- definire le taglie ottimali di convertitori e sistemi di accumulo in funzione dei diversi obiettivi perseguibili (*load levelling*, *peak shaving*, recupero di energia ecc.);
- individuare le strategie di controllo più appropriate dei convertitori e dell'intero sistema;
- approfondire alcuni aspetti relativi alla modellistica dei supercondensatori e al loro comportamento in diverse condizioni di trasferimento ed ambientali;
- individuare le applicazioni industriali e le condizioni d'uso più promettenti, valutando la convenienza economica sull'intero ciclo di vita dell'impianto.

### PRINCIPALI SOGGETTI COINVOLTI

#### A. Ricognizione delle tecnologie elettriche utilizzate nelle utenze industriali e delle tecnologie termiche potenzialmente sostituibili con tecnologie elettriche innovative

Nelle attività sono stati coinvolti la **Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE)** e le seguenti istituzioni universitarie:

- **Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università degli Studi di Pavia** per attività relative alla ricognizione di tecnologie elettriche nelle applicazioni orizzontali, in particolare nel settore industriale e terziario
- **Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia (DIEM) dell'Università degli Studi di Bologna** e **Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Ferrara** per attività riguardanti la ricognizione delle tecnologie innovative ed efficienti nei sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e nei sistemi integrati con unità a pompa di calore nelle applicazioni industriali e del terziario
- **Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura (CITERA) dell'Università di Roma "La Sapienza"**, per l'attività sulle tecnologie separative mediante membrana.

#### B. Realizzazione di una banca dati settoriale, sviluppo di modelli di simulazione per valutare i potenziali di diffusione e costruzione del sito WEB

Alle attività relative alla creazione del data-base sulle tecnologie e del sito hanno partecipato:

- **Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE)**
- **Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura (CITERA) dell'Università di Roma "La Sapienza"**

#### C. Identificazione di progetti dimostrativi (3-4 applicazioni) di miglioramento dell'efficienza; analisi di fattibilità e valutazione ricadute

#### D. Progettazione degli interventi dimostrativi (sistemi di accumulo elettrico, pompe di calore ad alta temperatura, motori elettrici ad alta efficienza), acquisizione della sensoristica

#### E. Modellazione degli interventi dimostrativi e sperimentazione preliminare

Nell'ambito di questi obiettivi sono state svolte attività da parte delle seguenti istituzioni universitarie:

- **Dipartimento di Energetica (DENER) del Politecnico di Torino**, per una attività di ricerca sulle applicazioni locali di micro-cogenerazione con tecnologie di piccola taglia
- **Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova**, per uno studio sperimentale di pompe di calore ad aria con un sistema innovativo di sbrinamento

- **Dipartimento di Industrial Design, Arti, Comunicazione e Moda (INDACO) del Politecnico di Milano**, per lo sviluppo delle specifiche della piattaforma software per la progettazione assistita e dei dispositivi di controllo di impianti illuminotecnica
- **Dipartimento di Informatica e Comunicazione dell'Università degli Studi di Milano**, per lo sviluppo delle specifiche software della progettazione interattiva in realtà virtuale
- **Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi di Roma la "Sapienza"**, per attività di ricerca sull'integrazione luce naturale/artificiale in ambito industriale
- **Dipartimento di Sistemi elettrici e Automazione dell'Università di Pisa**, per attività di ricerca sull'accumulo elettrico con batterie nel terziario; applicazione ad una funivia
- **Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università di Roma Tre**, per la definizione delle strategie di controllo e gestione e partecipazione alla sperimentazione per l'applicazione ad un carro ponte
- **Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli "Federico II"**, per lo sviluppo del software di gestione del sistema per l'applicazione ad un carro ponte
- **Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano**, per lo studio di sistema e valutazioni tecnico-economiche per l'applicazione ad un carro ponte.

ENEA si è avvalsa inoltre del supporto di:

- due partner industriali. le società **CLIVET SpA** e **ROBUR SpA**, che hanno collaborato alla realizzazione del progetto fornendo in comodato d'uso gratuito le pompe di calore
- **Sistema s.r.l.** per attività di consulenza relative all'aggiornamento tecnologico dell'impianto di climatizzazione aria del Centro ENEA di Ispra. In particolare, l'attività era finalizzata alla realizzazione di un modello di simulazione di un sistema edificio-impianto di climatizzazione per consentirne il corretto dimensionamento e la valutazione delle sue prestazioni energetiche.
- **IZI S.p.A. di Roma**, per la realizzazione della caratterizzazione energetica delle aziende del Macrolotto 1° di Prato, consistente nel monitoraggio, raccolta e analisi dati relativi ai consumi elettrici delle varie aziende del distretto individuato, nonché rilevamenti topografici ed edili, per individuare le soluzioni integrate di generazione distribuita e di uso finale per l'ottimizzazione dei consumi con le relative valutazioni economiche.

### Tema di Ricerca 5.2.2.2

#### Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone

- Stato dell'arte sulla simulazione della combustione flameless (SOTACARBO)
- Sviluppo e applicazione di codici, prove sperimentali e gas cleaning (SOTACARBO)
- Numerical analysis of liquid and coal water slurry combustion in an innovative reactor (ENEA)
- MILD Combustion Simulation of Coal Water Slurry (ENEA)
- Analisi di sensitività relativa allo studio del reattore ISOTHERM - ITEA alimentato a slurry di carbone (ENEA)
- Modellazione della combustione bifase solido-gas di uno slurry di carbone (ENEA)
- Catena di misura ODC per applicazione su un reattore a ossi-combustione (ENEA)
- Compensazione della componente continua del segnale ODC: Ampliamento della risposta dinamica (ENEA)
- Caratterizzazione della dinamica di sensori ODC (ENEA)
- Sviluppo di metodi per il controllo del processo di oxy-combustione di uno slurry di carbone, mediante tecnologia ODC (ENEA)
- Sviluppo di una pompa volumetrica a flusso continuo per slurry (ENEA)
- Test sperimentale di una pompa triplex a zero pulsatilità per alimentazione slurry di carbone-acqua (ENEA)
- La metodologia ODC applicata alla verifica delle condizioni di funzionamento Flameless di un reattore ad ossi-combustione di slurry di carbone (ENEA)
- Modelli avanzati di combustione del carbone e della produzione di inquinanti. Simulazioni CFD del reattore ISOTHERM-ITEA alimentato con carbone Sulcis (ENEA)
- Caratterizzazione del particolato organico ed inorganico allo scarico del reattore ISOTHERM PWR (Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università di Napoli Federico II)
- Studio teorico-sperimentale relativo alla combustione Flameless di polverino di carbone (Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II)
- Effects of Hot Diluted Oxidant Flow on Reactive Structures in HDDI MILD combustion (Dipartimento di Ingegneria chimica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II)
- Flameless technology for particulate emissions suppression (ITEA S.p.A.; C.N.R.; Università degli studi di Napoli Fererico II)
- Characterization of Nano-Ashes Generated during Pulverized Coal Combustion (C.N.R., I.I.T; Università degli Studi di Napoli Federico II)
- Nanoparticles Formations during High Temperature Pulverized Coal Combustion (Università di Napoli Federico II; C.N.R.)
- Modellazione del rilascio di composti solforati (Politecnico di Milano)

### Tema di Ricerca 5.2.5.2

#### Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

- Valutazione del processo di gassificazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub> (SOTACARBO)
- Sviluppo di modelli e simulazioni numeriche del processo di gassificazione che utilizza miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub> (SOTACARBO)
- Predisposizione delle prove di appoggio (SOTACARBO)
- Sviluppo attività sperimentali di gassificazione (SOTACARBO)
- Analisi comparativa di diversi sorbenti nel processo di desolforazione a caldo (SOTACARBO)
- Studio preliminare per l'applicazione di tecniche ECBM nel bacino carbonifero del Sulcis (SOTACARBO)
- Impostazione del progetto dell'impianto Test Site (SOTACARBO)
- Attività preliminari alla applicazione delle tecniche ECBM al bacino del Sulcis (SOTACARBO)
- Analisi e sperimentazione di processi di assorbimento e desorbimento per la desolforazione a caldo del syngas e lo stoccaggio indefinito della CO<sub>2</sub> ((Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università di Cagliari)
- Progetto di immagazzinamento geologico dell'anidride carbonica con estrazione di metano nel bacino carbonifero del Sulcis. Proposta di un sistema di monitoraggio del processo di iniezione della CO<sub>2</sub> e delle eventuali riemissioni in atmosfera (Dipartimento DIGITA dell'Università di Cagliari)
- Preparazione di miscele acqua-carbone. Studio sperimentale sull'influenza delle caratteristiche del carbone e delle variabili operative sulle proprietà reologiche delle miscele CW (Dipartimento DIGITA dell'Università di Cagliari)
- Sviluppo e validazione di modellistica di processi di gassificazione e combustione con ricircolo dei prodotti in diverse tipologie di reattori (Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari)

- Sviluppo e validazione di un modello “zero-dimensionale” per la simulazione numerica di processi di gassificazione in letto fisso utilizzando miscele di  $O_2$  e  $CO_2$  o syngas ricircolato quali agenti gassificanti (Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell’Università di Cagliari)
- Sviluppo di modellistica di impianti di generazione elettrica integrati con processi di gassificazione di carbone che utilizzano una miscela di  $CO_2$  e  $O_2$  come agente gassificante (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- Sviluppo di modellistica di impianti di generazione elettrica integrati con processi di gassificazione di carbone che utilizzano tecnologie di desolforazione a caldo del syngas prodotto (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- Sviluppo e caratterizzazione di sorbenti e catalizzatori da impiegare nei processi di trattamento del syngas proveniente dalla gassificazione del carbone (Dipartimento di Scienze Chimiche dell’Università di Cagliari)
- Analisi termogravimetrica su campioni di carbone (ENEA)
- Analisi e modellazione di processi di gassificazione con  $CO_2$  (ENEA)
- Attività sperimentali sulla gassificazione del carbone (ENEA)
- Sperimentazione di diversi sorbenti nel processo di desolforazione a caldo (SOTACARBO)

#### **Tema di Ricerca 5.2.5.9**

##### **Centrali elettriche per la coproduzione di energia elettrica e idrogeno**

- Modello short-cut dinamico di un reattore catalitico per la cattura dell’anidride carbonica con dolomite (ENEA)
- Produzione Sostenibile di Energia Elettrica da Combustibili Fossili: Obiettivo Zero Emission - Le Tecnologie CCS (Carbon Capture & Storage), Position Paper ENEA su CCS
- Prove di gassificazione e combustione del carbone su scala di laboratorio (ENEA)
- Attività di caratterizzazione del carbone (ENEA)
- Analisi di un impianto sperimentale per la coproduzione di energia elettrica e di idrogeno da carbone con "quasi" zero emissioni di anidride carbonica (ENEA)
- Attività sperimentale da laboratorio sul ciclo  $CaO-CaCO_3$  per la cattura della  $CO_2$  ad alta temperatura (ENEA)
- Modelli di calcolo di un processo per l’arricchimento dell’idrogeno nel syngas (SOTACARBO)
- Modeling, Simulation and Optimization of a Syngas Desulfurization Device (Dipartimento di Meccanica e Aeronautica dell’Università di Roma La Sapienza)
- Definizione e progettazione di un dimostrativo innovativo completo di produzione di idrogeno ed elettricità con cattura della  $CO_2$ : condizioni operative del reattore di steam reforming, nelle fasi di assorbimento e rilascio (calcinazione) della  $CO_2$ . Modello per la reazione di assorbimento della  $CO_2$  all’interno di una particella di sorbente. Studio sperimentale dello steam reforming di idrocarburi, in combinazione con la cattura di  $CO_2$  su sorbente solido (Dipartimento di Chimica, ingegneria chimica e materiali dell’Università de L’Aquila)
- Studio di processi per l’arricchimento dell’idrogeno nel syngas (SOTACARBO)
- Survey geologico e studio delle potenzialità di applicazione di tecnologie ECBM nel giacimento carbonifero del Sulcis (CARBOSULCIS)
- Valutazione del potenziale di confinamento della  $CO_2$  in depositi di carbone nel bacino carbonifero del Sulcis e nelle nazioni europee partecipanti ai progetti Gestco e GeoCapacity (OGS)

#### **Tema di Ricerca 5.2.5.5**

##### **Censimento del potenziale energetico nazionale delle biomasse**

- Rilievo delle produttività delle colture energetiche in Italia e analisi del loro mercato (Dipartimento DISTA dell’Università di Bologna)
- Rilievo indici di relazione tra produzioni agricole e biomassa residuale associata, analisi del mercato della biomassa residuale nelle province delle regioni Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria, Sicilia, Sardegna (Dipartimento di Economia e Politica Agraria dell’Università di Napoli)
- Indici di produttività boschiva, rilievo indici di relazione tra produzioni forestali e biomassa residuale associata, analisi del mercato della biomassa forestale in Italia (Università della Toscana)
- Rilievo indici di relazione tra produzioni agricole e biomassa residuale associata, analisi del mercato della biomassa residuale nelle province delle regioni Valle d’Aosta, Piemonte, Liguria, Lombardia, Trentino Alto Adige, Toscana, Lazio (Centro interdipartimentale CREAR dell’Università di Firenze)
- Rilievo indici di relazione tra produzioni agricole e biomassa residuale associata, analisi del mercato della biomassa residuale nelle province delle regioni Friuli Venezia Giulia, Veneto, Marche, Emilia Romagna, Umbria, Abruzzo (CRB dell’Università di Perugia)
- Censimento potenziale energetico biomasse, metodo indagine, atlante biomasse su WEB-GIS (ENEA)
- La stima del potenziale di biogas da biomasse di scarto del settore zootecnico in Italia (ENEA)

### Tema di Ricerca 5.2.5.8

#### Nuovo nucleare da fissione

*Studi sul nuovo nucleare, partecipazioni e accordi internazionali/bilaterali, supporto alle istituzioni*

- NEA-WPFC/FCTS Benchmark for Fuel Cycle Scenarios Study with COSI6(Dipartimento di Ingegneria energetica, nucleare e del controllo ambientale - DIENCA dell'Università di Bologna)
- Nucleare da fissione - Stato e prospettive (ENEA)
- Metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi innovativi: sviluppo e applicazione(ENEA)
- Studi di scenario ed estensione del modello economico-finanziario per la realizzazione di un parco reattori nucleari nell'orizzonte 2020-2030 (CIRTEN, ENEA)
- Modello per la valutazione economico-finanziaria di reattori nucleari di taglia medio/piccola e sue applicazioni(CIRTEN)
- Elementi di valutazione del costo dell'energia elettrica prodotta dai reattori di nuova generazione rilevanti per il rilancio dell'opzione nucleare in Italia (ENEA)
- Analisi di scenari energetici: introduzione di reattori nucleari innovativi(CIRTEN)
- Elettroaffinazione di lantanidi mediante impianto pilota PYREL II (ENEA)
- Raccolta dei rendiconti della partecipazione ai Comitati internazionali sul nucleare da fissione (ENEA)

*Reattori evolutivi*

- SPES-3 Test Specification (ENEA, Politecnico di Milano; Westinghouse)
- Piano di qualità per la realizzazione dell'impianto SPES-3 (ENEA)
- Quality Plan of IRIS SPES-3 Project (SIET)
- Progettazione e predisposizione del sito per l'impianto sperimentale SPES-3 (SIET)
- Analysis of the two-phase flow meters and densitometers with the reference to the SPES-3 facility (CIRTEN)
- Analisi fluidodinamica del downcomer di IRIS, implementazione di modelli di turbolenza e messa a punto di protocolli di accuratezza per analisi CFD (CIRTEN)
- Calcolo delle probabilità di rottura al sisma (fragility curves) e sviluppo di una metodologia innovativa e sua applicazione all'edificio del reattore IRIS (CIRTEN)
- Verifiche neutroniche relative a due modelli di nocciolo per reattore PWR con gestione del combustibile a 4 cicli di ricarica e a ciclo unico di irraggiamento (CIRTEN)
- Progettazione realizzazione e sviluppo di una catena di misura anemometrica (ENEA)
- Specifica tecnica per le sonde a termocoppia riscaldata (ENEA)

*Reattori innovativi*

- Analisi semplificata del transitorio conseguente all'ipotetica rottura di uno dei tubi del DHR tramite il codice SIMMER III (CIRTEN)
- W-DHR Testing in CIRCE Facility – RELAP5/Mod. 3.3 Pre-Test Calculations (CIRTEN)
- Realizzazione girante pompa e test in piombo (ENEA)
- Descrizione di sistemi di purificazione e controllo dell'ossigeno per sistemi a piscina (ENEA)
- Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 - definizione della matrice di test (ENEA)
- Set Up and Preliminary Assessment of a 3D Numerical Model for the Thermo-Fluid Dynamics Analysis of an Open Square Lattice Core of a Lead Cooled Reactor (ENEA)
- A Three-Dimensional CFD Program for the Simulation of the Thermo-Hydraulic Behaviour of a an Open Core Liquid Metal Reactor (Università di Bologna)
- Convezione naturale in fluidi a basso numero di Prandtl con generazione interna di potenza: risultati computazionali per diverse geometrie (CIRTEN)
- Neutronic Methods for Core Calculations of the LFR Innovative Reactor (CIRTEN)
- Preliminary Seismic Analysis on an Isolated Simplified LFR Reactor Type (CIRTEN)
- HE-FUS3 Experimental Campaign for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes: Pre-Test Analysis and Test Specifications (ENEA)
- HE-FUS3 Experimental Campaign for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes: Post-Test Analysis (ENEA)
- Simulazioni neutroniche e progettazione set-up TAPIRO per interfaccia core-riflettore VHTR (ENEA)
- Simulazioni Monte Carlo di misure spettrali nelle interfacce grafite/uranio e grafite/ferro nella colonna termica del reattore sorgente veloce TAPIRO (CIRTEN)

*Deposito rifiuti*

- Le attività condotte dall'ENEA fra il 1996 e il 2003 per il sito nazionale di deposito dei rifiuti radioattivi (ENEA)
- Analisi propedeutiche alla progettazione dei depositi per rifiuti di II e III categoria (CIRTEN)

- Performance Assessment: 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 e operazione del deposito stesso (CIRTEN)
- Linee guida per comunicazione e informazione – Attività di comunicazione nell’ambito della valutazione e gestione della sicurezza di un deposito di rifiuti radioattivi. Analisi critica di esperienze internazionali (CIRTEN)
- Linee guida per formazione ed educazione – Attività di formazione nell’ambito della valutazione e gestione della sicurezza di un deposito di rifiuti radioattivi. Analisi critica di esperienze internazionali (CIRTEN)
- Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia (ENEA)
- Le ricerche condotte dall’ ENEA fra il 1976 e il 1991 sul confinamento geologico delle scorie radioattive a lunga vita e ad alta attività (ENEA)
- Supporto al Gruppo di Lavoro DM 25 febbraio 2008 (ENEA)
- Attività relative alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi da conferire al sito di smaltimento e di deposito (ENEA)
- Linee guida per il trasporto dei rifiuti radioattivi al deposito nazionale (ENEA)
- Il rapporto della Commissione Cenerini (ENEA)
- Nuclear Security: un approccio per il deposito nazionale per lo smaltimento di rifiuti radioattivi (ENEA)
- Deposito nazionale per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi: linee guida per la definizione di un piano di azioni per informare, coinvolgere e ottenere il consenso del pubblico (ENEA)
- Requisiti minimi per la localizzazione e la progettazione di un deposito di smaltimento per i rifiuti radioattivi di seconda categoria (ENEA)
- Revisione critica dell’inventario nazionale dei rifiuti radioattivi ai fini dello smaltimento (ENEA)

#### Tema 5.2.5.11

##### Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative

- Rapporto tecnico-scientifico relativo alle attività svolte per la realizzazione di matrici in plastico (FN S.p.A.)
- Sviluppo di un processo a basso costo per la produzione di gamma alluminato di litio per celle a combustibile a carbonati fusi (Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell’Università di Genova)
- Caratterizzazione chimico-fisica di compound plasto-ceramici per la produzione di matrici per celle a combustibile a carbonati fusi e prove funzionali su componenti ottenuti (Politecnico di Torino, sede di Alessandria)
- Sviluppo di un modello numerico per la gestione di un dispositivo innovativo da utilizzare per prove di condizionamento dei componenti prodotti mediante la tecnologia delle materie plastiche (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino)
- Sviluppo di sistemi alimentati con gas derivante da scarti e residui agricoli e zootecnici (ENEA)
- Studio dei meccanismi di avvelenamento della cella da parte delle impurezze a base di zolfo. Studio e messa a punto di nuovi componenti di cella più tolleranti allo zolfo. Caratterizzazione mediante analisi termica degli elementi per MCFC prodotti da FN (ENEA)
- Digestione anaerobica a singolo e doppio strato di scarti e residui agricoli e zootecnici (Dipartimento di Idraulica, Trasporto E Strade dell’Università di Roma La Sapienza)
- Analisi e stima quantitativa della potenzialità di produzione energetica da biomassa digeribile a livello regionale. Studio e sviluppo di un modello per unità energetiche (Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Applicata E Condizionamento Ambientale dell’Università di Napoli Federico II):
  - Parte 1 - Metodologia
  - Parte 2 - Database regionale: tutte le categorie di biomassa
  - Parte 3 - Database provinciale : categoria frazione organica dei rifiuti solidi urbani
  - Parte 4 – Studio di un modello energetico
- Studio dell’influenza di agenti contaminanti sulle prestazioni delle celle a combustibile a carbonati fusi mediante prove in monocelle MCFC (Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Perugia)
- Definizione delle caratteristiche funzionali di un impianto sperimentale di simulazione di sistemi ibridi MCFC/turbina con potenze dell’ordine del MW e sviluppo del relativo sistema di simulazione (Dipartimento di Meccanica e Aeronautica dell’Università di Roma La Sapienza)
- Riduzione chimica diretta di catalizzatori su membrane polimeriche. Ottimizzazione degli assemblati membrana-elettrodi (ENEA; Dipartimento di Ingegneria chimica, dei materiali, delle materie prime e metallurgia dell’Università di Roma La Sapienza)
- Alimentazione di celle a carbonati fusi con biogas: sperimentazione dei processi e progettazione di un sistema completo digestore/ clean u; prove in cella con gas simulanti, con componenti sia tradizionali che innovativi (ENEA)
- Sistemi con celle a combustibile ad elettrolita polimerico. Progettazione e realizzazione di una stazione di prova di un sistema da 5 kW. Valutazione di tecnologie diverse per la realizzazione dei componenti di cella e caratterizzazione di diverse tipologie di catalizzatori per la riforma di vari combustibili (ENEA)
- Stato di avanzamento delle attività DICMA (Dipartimento di Ingegneria chimica, materiali e ambiente dell’Università di Roma La Sapienza; ENEA)

- Sviluppo e ottimizzazione dei sistemi di fuel processing (Dipartimento di Ingegneria Chimica e alimentare dell'Università di Salerno)
- Simulazione stazionaria e dinamica di un sistema cogenerativo da 5 kW e supporto alla progettazione (Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Cassino; ENEA)
- Clean-up di combustibili gassosi per sistemi con celle a combustibile (Dipartimento di Scienza dei materiali e ingegneria Chimica del Politecnico di Torino)
- Celle a combustibile: stato di sviluppo e prospettive della tecnologia (ENEA)
- International Status of Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) Technology (ENEA)

#### **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**

##### *Aggiornamento Archivio dati climatici e censimento stazioni meteo*

- Un approccio razionale alla definizione delle zone climatiche di un territorio per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione degli edifici: dai gradi-giorno invernali agli indici di severità climatica "all weather" (ENEA)
- Analisi per la definizione degli indici di severità climatica (ISES Italia)
- Metodologia per l'elaborazione dei dati climatici necessari per la progettazione degli impianti per il riscaldamento degli edifici (CTI)

##### *Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali*

- Documento di sintesi delle attività di partecipazione a gruppi internazionali IEA su efficienza energetica degli edifici e applicazioni solari per il condizionamento (ENEA)
- Solar Air-Conditioning and Refrigeration, Rapporto sulle attività della IEA SHC Task 38 (Dipartimento Energia del Politecnico di Milano, Dipartimento DREAM dell'Università di Palermo)
- Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in Different Italian Climatic Zones" A Report of Subtask C of FC+COGEN-SIM - Annex 42 of the International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ENEA)
- Elementi responsivi e concetti integrati edificio/impianto, Rapporto sulle attività della IEA ECBCS Annex 44 (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino)
- Energy Efficient Future Electric Lighting for Buildings, Rapporto sulle attività della IEA ECBCS Annex 45 (ENEA; Università di Roma La Sapienza)
- Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings (EnERGo), Rapporto sulle attività della IEA ECBCS Annex 46 (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- Heat Pumping and Reversible Air Conditioning, Rapporto sulle attività della IEA ECBCS Annex 48 (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino)
- Low Exergy Systems for High-Performance Built Environments, Rapporto sulle attività della IEA ECBCS Annex 49 (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano; Università IUAV di Venezia; Dipartimento di Fisica tecnica dell'Università di Padova)
- IEA Wind Energy Annual Report 2007 - Italy Chapter (ENEA)
- IEA Wind Energy Annual Report 2008 - Italy Chapter (ENEA)

##### *Caratterizzazione di materiali e componenti semitrasparenti di facciata*

- Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e sistemi schermanti (ENEA)

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

- Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati (ENEA)
- Caratterizzazione energetica del settore alberghiero in Italia (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso ufficio (CRESME RICERCHE SpA)
- Caratterizzazione del parco edilizio nazionale. Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio (ENEA)
- Indagine sui consumi degli edifici pubblici (direzionale e scuole) e potenzialità degli interventi di efficienza energetica (ENEA)
- Sviluppo di modelli di calcolo semplificati per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)

##### *Influenza dei sistemi semitrasparenti sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici*

- Documento di sintesi sulle attività per la determinazione dell'influenza dei sistemi semitrasparenti sulle prestazioni energetiche e luminose degli edifici e interazione condizionamento-illuminazione (ENEA)
- Integrazione luce naturale/artificiale in ambito terziario e abitativo (Università di Roma La Sapienza)



- Analisi dello stato dell'arte nazionale ed internazionale dei sistemi integrati di illuminazione naturale/artificiale in relazione all'involucro edilizio nel caso di edifici del terziario e abitativi, ai fini di un loro impiego nell'ambito della certificazione energetica degli edifici (Dipartimento DREAM dell'Università di Palermo)
- Sistemi di gestione e controllo della luce naturale e artificiale (Politecnico di Torino)
- Sistemi di integrazione della luce naturale e artificiale applicati a diverse tipologie edilizie: Rapporto sugli esiti di simulazioni numeriche e sperimentazioni in campo (Politecnico di Torino)

#### **Tema di Ricerca 5.4.1.4**

##### **Sviluppo di linee guide ed indici di riferimento per il legislatore**

Analisi della normativa vigente in ambito nazionale ed europeo

Guida alla Legislazione sull'energia (FIRE)

*Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici.*

- Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a uffici - usi termici - analisi del potenziale di risparmio energetico (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici residenziali (Università Napoli RIAS)
- Definizione degli indici e livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici adibiti a scuole - consumi energetici delle scuole primarie e secondarie (Dipartimento di Progettazione e studio dell'architettura dell'Università Roma Tre; ENEA)
- Caratterizzazione dei consumi energetici nazionali delle strutture ad uso ufficio (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Roma La Sapienza; ENEA)
- Definizione degli indici e dei livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici e valutazione dei consumi nell'edilizia esistente nel settore alberghiero (Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente)

*Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati*

- Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri (Dipartimento di Energetica dell'Università di Pisa; ENEA)
- Definizione degli indici e dei livelli di fabbisogno dei vari centri di consumo energetico degli edifici e valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati (Istituto per le tecnologie della costruzione – ITC del C.N.R.)

*Creazione di un database di sistemi e tecnologie di generazione distribuita*

- Creazione di un database di sistemi di microcogenerazione (Università del Sannio, Benevento; ENEA)

#### **Tema di Ricerca 5.4.4.7/8**

##### **Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e di pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici a scala territoriale e urbana**

- Tecnologie per la riduzione della domanda e l'ottimizzazione della fornitura di energia (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- Casi di Studio (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- Modelli per la simulazione energetica (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- Elementi per la formulazione di un ambiente integrato di simulazione energetica (Dipartimento BEST del Politecnico di Milano)
- Modelli Simulink per la simulazione dei moderni impianti di solar cooling: collettori e chiller (Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano)
- E3: Energy and Economic Evaluation. Sviluppo di un tool per la stima dei consumi energetici di impianti termici (Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento)
- Definizione di sistemi DEC di riferimento e raccolta algoritmi disponibili per componenti unitari" (Università di Palermo - Dip. DREAM)
- Ricognizione normativa sui vincoli legislativi alla costituzione di una ESCo mista (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova)
- Definizione delle modalità operative della ESCo mista e della sua organizzazione, con particolare riferimento alla costituzione della ESCo sperimentale (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova)
- Analisi degli strumenti contrattuali adeguati per l'utilizzo delle modalità EPC in Italia e delle procedure amministrative per la costituzione di una ESCo mista (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova)
- Progettazione di una rete di generazione distribuita dell'energia quale esempio dimostrativo di impiego di tecnologie energeticamente efficienti (Centro interdisciplinare territorio, edilizia, restauro, ambiente – Citera – dell'Università di Roma La Sapienza)

- Contributo allo sviluppo di un ambiente integrato per la progettazione degli interventi di efficientamento (Centro interdisciplinare territorio, edilizia, restauro, ambiente – Citera – dell'Università di Roma La Sapienza)
- Sviluppo di metodi di controllo per il sistema edificio-impianto (Dipartimento di Informatica e Automazione dell'Università Roma Tre)
- Recupero funzionale edificio A2 presso la Cittadella della Ricerca di Brindisi (ENEA)
- Studio di fattibilità tecnico-economica: riqualificazione dell'edificio F51 - Centro Ricerca ENEA della Casaccia (ENEA)
- Le Energy Service Company E.S.Co. come strumento per la diffusione dell'efficienza energetica (ENEA e Università di Roma La Sapienza)
- Sviluppo dell'ambiente di progettazione Optimal DESign for Smart Energy – ODESSE (ENEA)
- Studio e dimostrazione di forme di finanza innovativa e di strumenti di programmazione e di pianificazione per la promozione di tecnologie efficienti per la razionalizzazione dei consumi elettrici su scala territoriale e urbana (Unità tecnica Finanza di Progetto della Presidenza del Consiglio dei Ministri)

#### **Tema di Ricerca 5.4.3.1**

##### **Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali**

###### *Ricognizione sulle tecnologie*

- Le tecnologie innovative ed efficienti nei sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e nei sistemi integrati con unità a pompa di calore nelle applicazioni industriali e del terziario (Dipartimento DIEM dell'Università di Bologna; Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara; FIRE; ENEA)
- Ricognizione sulle tecnologie elettriche nelle applicazioni industriali e del terziario (Dipartimento di Ingegneria elettrica dell'Università di Pavia; FIRE; ENEA)
- Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali (FIRE; ENEA)
- Le tecnologie separative mediante membrana (ENEA, con la collaborazione di CITERA - Università di Roma "La Sapienza")

###### *La microgenerazione nel settore residenziale*

- Supporto allo sviluppo di modelli per la simulazione di impianti di micro cogenerazione per applicazione residenziale e terziaria: principali indicatori energetici definiti dalla normativa vigente e prestazioni a regime parziale delle principali tecnologie disponibili in commercio (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino; ENEA)
- Calibrazione del modello dinamico di microcogeneratore con turbina a gas sviluppato da ENEA con macchina ELLIOT 100 a servizio della rete di teleriscaldamento del Politecnico di Torino (Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino; ENEA)
- Complesso residenziale popolare ATC Biella - Intervento di riqualificazione energetica (Studio di fattibilità ENEA) (ENEA; SISTEMA s.r.l.)

###### *Le pompe di calore nel settore terziario*

- Studio del brinamento delle batterie su pompe di calore a compressione (Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova)
- Calcolo dei Carichi Termici dell'Edificio ENEA di Ispra (Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova)

###### *i distretti industriali*

- Analisi di interventi di efficientamento per il 1° Macrolotto industriale di Prato (IZI S.p.A.)
- Attività 6: le reti di illuminazione industriale
- Visualizzazione in ambienti di Realtà Virtuale di scenari fotorealistici basati su dati e calcoli illuminotecnici (Dipartimento di Informatica e Comunicazione dell'Università di Milano)
- Integrazione luce naturale/artificiale in ambito industriale (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma La Sapienza):
  - Parte 1: Analisi dell'ambiente luminoso del capannone AleniaAermacchi
  - Parte 2: Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per l'illuminazione artificiale/naturale
  - Parte 3: Simulazioni numeriche delle possibili soluzioni per il capannone AleniaAermacchi
  - Parte 4: Linee guida per la progettazione in interni con presenza di illuminazione naturale e progettazione di massima
  - Parte 5: Protocolli di monitoraggio
  - Parte 6: Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi
- Eco Light Design - Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza ecc. nella progettazione di impianti di illuminazione (Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano)

- Eco Light Design- Analisi della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc (Dipartimento InDACO del Politecnico di Milano)
- Eco Light Design - Linee guida impianto di illuminazione nuovo capannone AleniaAermacchi (Dipartimento InDACO del Politecnico di Milano)

- AleniaAermacchi. Nuovo capannone. Linee guida per la progettazione dell'impianto di illuminazione. Parte generale (ENEA)

*L'accumulo elettrico con batterie (applicazione ad una funivia)*

- Accumulo elettrico con batterie nel terziario: l'applicazione ad una funivia (Dipartimento di Sistemi elettrici e Automazione dell'Università di Pisa)

*L'accumulo elettrico con supercondensatori (applicazione ad un carro ponte)*

- Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli Federico II)
- Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: definizione delle strategie di controllo e gestione e partecipazione alla sperimentazione per l'applicazione ad un carro ponte (Dipartimento di Ingegneria Meccanica Industriale dell'Università di Roma Tre)
- Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: studio di sistema e valutazioni tecnico-economiche per l'applicazione ad un carro ponte (Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano; Aros di Cormano MI)

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito ENEA all'indirizzo:

[http://www.enea.it/attivita\\_ricerca/energia/ricerca\\_sistema\\_elettrico.html](http://www.enea.it/attivita_ricerca/energia/ricerca_sistema_elettrico.html)

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

ENEA

Innovazione

Home L'ENEA La Ricerca L'ENEA Per il Paese Attività Internazionali Produzione scientifica Comunicare la ricerca Opportunità Link utili

Home » La Ricerca » Energia » Ricerca di Sistema elettrico

**LA RICERCA**

- ENERGIA
  - Fusione nucleare
  - Fissione nucleare
  - Fonti rinnovabili
  - Efficienza energetica
  - Tecnologie avanzate per l'energia e l'industria
  - Ricerca di Sistema elettrico**
- SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE
- NUOVE TECNOLOGIE

**Ricerca di Sistema elettrico**

**LA RICERCA AL SERVIZIO DELL'UTENTE**



La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico 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 il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

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

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistematico e pre-normativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 20 Università e 60 dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate.

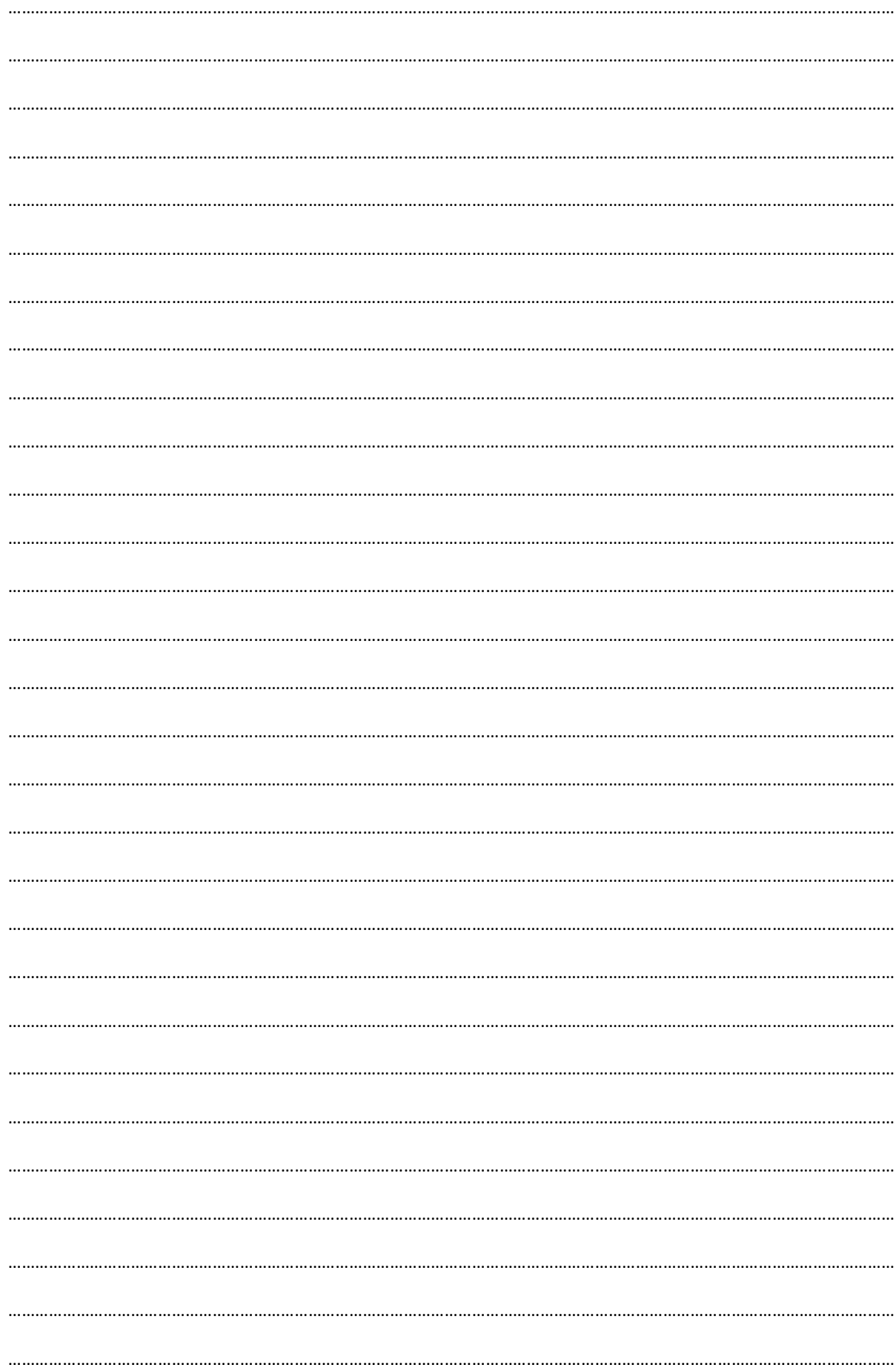
**Area Produzione e fonti energetiche**

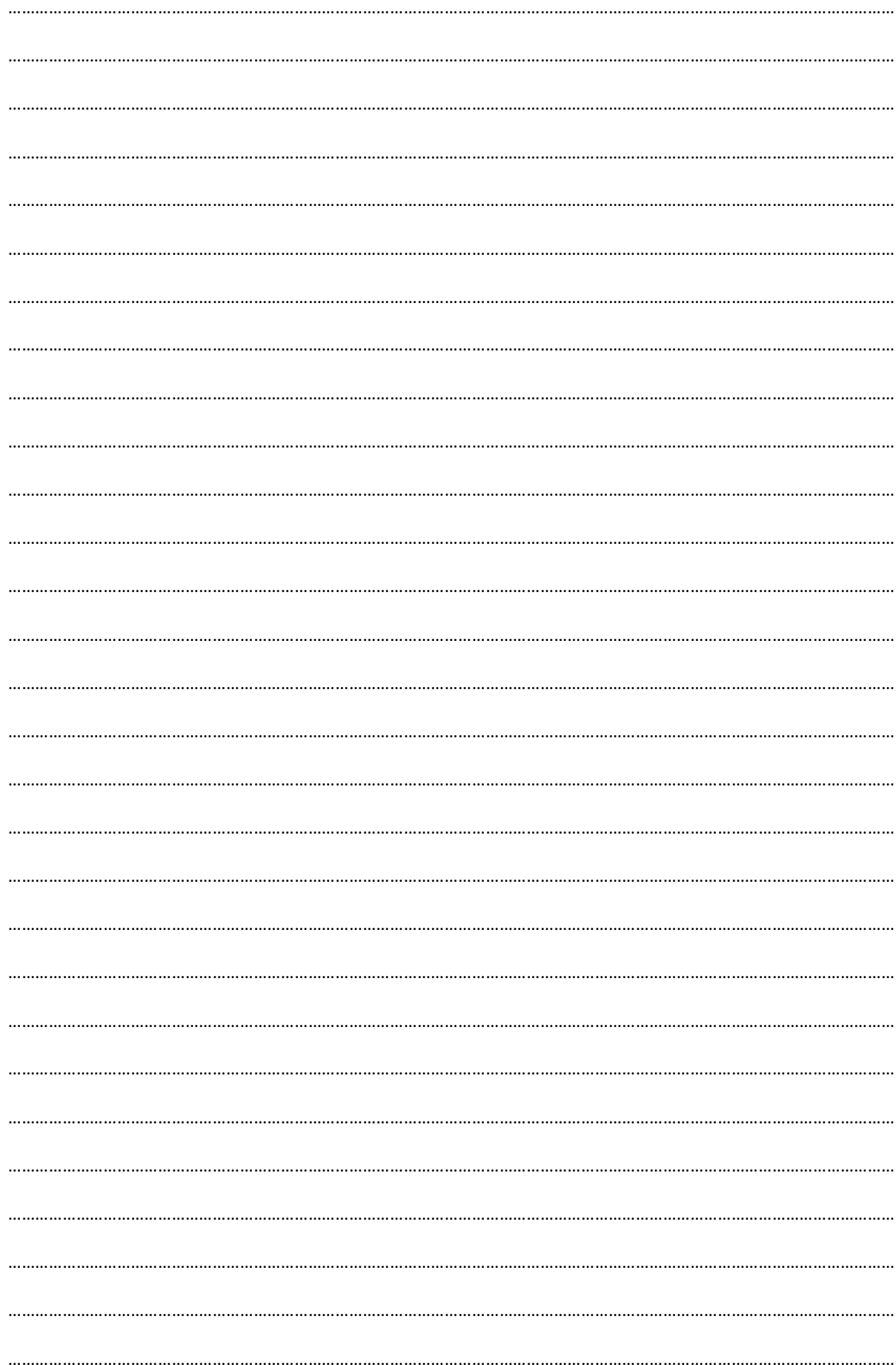
- Censimento potenziale energetico biomasse
- Centrali a polverino di carbone - rendimenti
- Centrali a polverino di carbone - riduzione costi
- Nuovo nucleare da fissione
- Coproduzione di elettricità e idrogeno
- Celle a combustibile per cogenerazione

**Area Usi finali**

- Condizionamento e illuminazione per residenziale e terziario
- Governance e efficienza energetica
- Promozione tecnologie efficienti
- Promozione tecnologie elettriche innovative

[illegible]





Edito dall'ENEA  
Unità Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 – 00196 Roma  
*[www.enea.it](http://www.enea.it)*

Copertina: Bruno Giovannetti

Stampa: Fabiano Editore (Canelli - Asti)  
Finito di stampare nel mese di ottobre 2010