AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

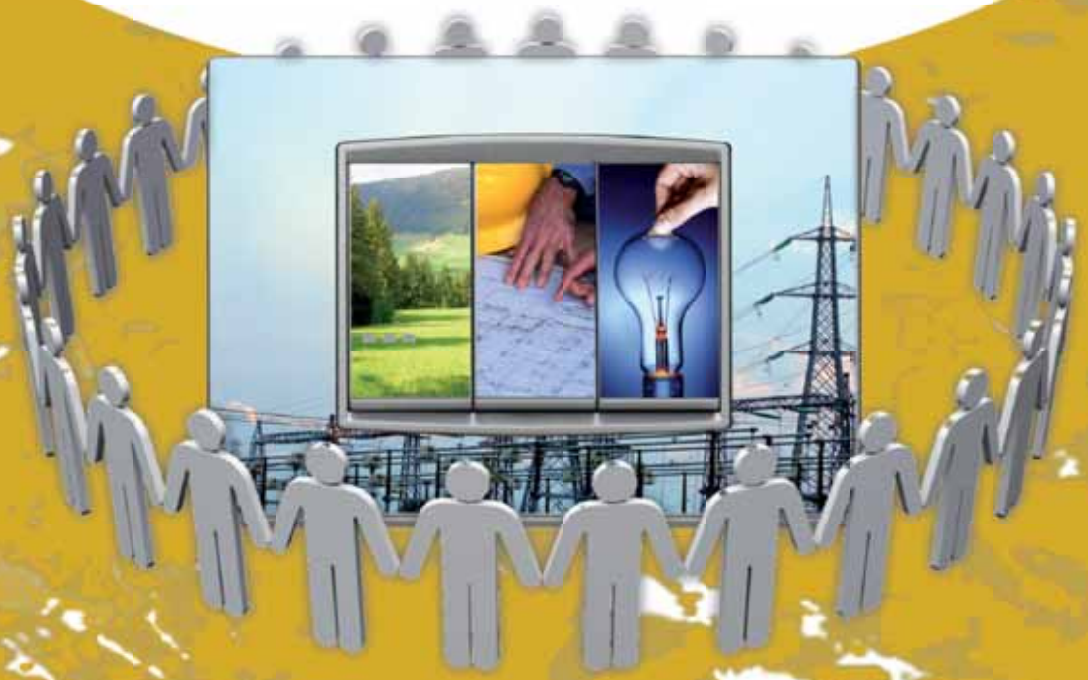
Ministero dello Sviluppo Economico

Accordo di Programma MSE/ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del primo anno di attività

A cura di
Vincenzo Gerardi



NOVEMBRE 2011

Accordo di programma MSE-ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del primo anno di attività

A cura di Vincenzo Gerardi

con i contributi di

M. Conte, P. Meloni, A. Moreno, P. Delli Veneri, G. Sannino, A. Calabrò, I. Bertini,

S. Fumagalli, G. Fasano, N. Calabrese, G. Pede

2011 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76

00196 Roma

ISBN 978-88-8286-252-7

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

Accordo di Programma MSE/ENEA 2009-2011

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del primo anno di attività

A cura di

Vincenzo Gerardi

con i contributi di
M. Conte, P. Meloni, A. Moreno, P. Delli Veneri, G. Sannino, A. Calabrò,
I. Bertini, S. Fumagalli, G. Fasano, N. Calabrese, G. Pede

NOVEMBRE 2011

Ringraziamenti

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

Vincenzo Cincotti
Agostino Iacobazzi
Rosa Provaroni
Marina Ronchetti

Indice

PRESENTAZIONE **9**

SISTEMI AVANZATI DI ACCUMULO DI ENERGIA **11**

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 11
Ricerca fondamentale su batterie a litio *12*
Ricerca fondamentale sulle tecnologie di controllo e di interfaccia del sistema di accumulo in batterie al litio con la rete *31*
Dimostrazioni e attività di supporto *45*
Principali soggetti esterni coinvolti *59*

NUOVO NUCLEARE DA FISSIONE: COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI E SVILUPPO COMPETENZE IN MATERIA NUCLEARE **61**

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 61
Studi sul nuovo nucleare *62*
Reattori evolutivi *69*
Reattori di IV Generazione *73*
Rifiuti radioattivi *81*
Qualifica di componenti e sistemi *84*
Principali soggetti esterni coinvolti *87*

STUDI SULLA PRODUZIONE ELETTRICA LOCALE DA BIOMASSE E SCARTI **95**

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 95
Ottimizzazione della produzione di biogas mediante processi fermentativi e sviluppo di un prototipo da laboratorio *96*
Ottimizzazione dei processi di abbattimento degli inquinanti dal biogas e di trattamento del digestato *98*
Sviluppo di processi e sistemi per l'arricchimento in metano di biogas *99*
Sistemi di generazione/cogenerazione a biogas o syngas da biomasse *109*
Principali soggetti esterni coinvolti *122*

RICERCA SU CELLE FOTOVOLTAICHE INNOVATIVE **127**

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 128
Sviluppo e realizzazione di strati assorbitori alternativi e innovativi per celle tandem di silicio *129*
Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo a film sottile di silicio *134*
Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici *143*
Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI *144*
Principali soggetti esterni coinvolti *147*

STUDI E VALUTAZIONI SUL POTENZIALE ENERGETICO DELLE CORRENTI MARINE **149**

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 149
Sviluppo del modello numerico per la simulazione della circolazione marina e del modello del moto ondoso per il bacino Mediterraneo *149*
Produzione delle mappe degli indicatori del potenziale energetico relative alle simulazioni sul bacino del Mediterraneo *154*
Analisi dettagliata delle tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina *158*
Principali soggetti esterni coinvolti *165*

UTILIZZO PULITO DEI COMBUSTIBILI FOSSILI E CATTURA E SEQUESTRO DELLA CO_2 ..... **167**

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 168
Produzione e trattamento combustibili gassosi e liquidi da carbone *169*
Aumento dell'efficienza delle tecnologie di cattura della CO_2 con produzione di elettricità "zero emission" *183*
Tecnologie di sequestro e utilizzo della CO_2 e progettazione di un impianto dimostrativo *199*
Principali soggetti esterni coinvolti *202*

STRUMENTI E TECNOLOGIE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI SERVIZI 205

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 205
Sviluppo delle specifiche per la progettazione ecocompatibile: promozione della nuova etichetta energetica 205
Implementazione e controllo dell'etichettatura energetica e dei requisiti Ecodesign 208
Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi 208
Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio-impianto in un contesto di rete complessa 220
Principali soggetti esterni coinvolti 245

TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ELETTRICO NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA 249

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 249
Sviluppo sistemi intelligenti per la gestione della "Smart Street" 249
Realizzazione pilota di illuminazione efficiente 265
Principali soggetti esterni coinvolti 275

TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ELETTRICO NEL SETTORE CIVILE 277

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 277
Aggiornamento dei parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva 278
Edifici tipo e indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio 279
Definizione di una metodologia per l'audit energetico negli edifici ad uso residenziale e terziario 287
Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile 307
Efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica 319
Sviluppo ed assessment di Cool Material per l'efficienza energetica ed il controllo ambientale a scala urbana e di edificio 323
Principali soggetti esterni coinvolti 327

UTILIZZO DELL'ENERGIA ELETTRICA E SOLARE PER LA CLIMATIZZAZIONE ESTIVA 331

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 331
Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi 332
Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling 348
Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici 355
Principali soggetti esterni coinvolti 362

NUOVI MATERIALI E COMPONENTI INNOVATIVI PER I MEZZI DI TRASPORTO 363

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI 363
Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS (Battery Management System). 364
Studio di altri sistemi avanzati di accumulo di energia, quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori) 367
Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida 371
Life Cycle Assessment energetico ambientale delle tecnologie 373
Analisi dello stato dell'arte e qualificazione chimico/fisica di AFS standard e sviluppo di processi di schiumatura innovativi. 374
Sviluppo di tecnologie di giunzione 377
Sviluppo di processi di ibridizzazione di microsfere metalliche con polimeri termoplastici e di processi per l'impiego di fibre naturali in compositi termoplastici 379
Principali soggetti esterni coinvolti 384

ELENCO DEI REPORT 385

SISTEMI AVANZATI DI ACCUMULO DI ENERGIA 385
NUOVO NUCLEARE DA FISSIONE: COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI E SVILUPPO COMPETENZE IN MATERIA NUCLEARE 385
STUDI SULLA PRODUZIONE ELETTRICA LOCALE DA BIOMASSE E SCARTI 389

RICERCA SU CELLE FOTOVOLTAICHE INNOVATIVE 390
STUDI E VALUTAZIONI SUL POTENZIALE ENERGETICO DELLE CORRENTI MARINE 390
UTILIZZO PULITO DEI COMBUSTIBILI FOSSILI E CATTURA E SEQUESTRO DELLA CO_2 390
TECNOLOGIE PER L'EFFICIENZA ENERGETICA NEI SERVIZI 392
TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ELETTRICO NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA 393
TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ELETTRICO NEL SETTORE CIVILE 394
UTILIZZO DELL'ENERGIA ELETTRICA E SOLARE PER LA CLIMATIZZAZIONE ESTIVA 395
NUOVI MATERIALI E COMPONENTI INNOVATIVI PER I MEZZI DI TRASPORTO 395

Presentazione

Il presente volume riporta i risultati delle attività svolte dall'ENEA, in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 27 Università con 67 dipartimenti coinvolti) e le società partecipate Sotacarbo ed FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, nella prima annualità (PAR 2008-09) dell'Accordo di Programma 2009-11 con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

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

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico (2009-11), il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato una serie di Accordi di Programma con vari soggetti, tra cui l'ENEA.

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

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

Le attività svolte hanno riguardato 11 progetti di ricerca all'interno, come previsto dal Piano triennale, di tre grandi aree : Area governo, Gestione e Sviluppo del Sistema Elettrico Nazionale (studi e ricerche su sistemi avanzati di accumulo energia, nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze), Area Produzione e fonti energetiche (studi e ricerche sull'utilizzo sostenibile del carbone e le tecnologie di cattura e sequestro dell'anidride carbonica, ricerche sul fotovoltaico innovativo, studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine e sulla produzione locale di energia elettrica da biomasse e scarti) e Area Usi finali (tecnologie per il risparmio energetico nel settore civile, dei servizi e dell'illuminazione pubblica, studi e ricerche per l'utilizzo dell'energia solare per la climatizzazione estiva, sviluppo di nuovi materiali e componenti innovativi per il risparmio di energia mezzi di trasporto).

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

Vincenzo Porpiglia
Responsabile Unità di Progetto
Ricerca di Sistema Elettrico

Sistemi avanzati di accumulo di energia

(Referente Mario Conte)

La richiesta di sistemi di accumulo nelle reti elettriche sta crescendo notevolmente di pari passo con l'evoluzione tecnica ed economica del sistema di generazione, distribuzione ed usi finali dell'energia elettrica. I sistemi elettrici stanno evolvendo verso un più ampio uso di tecnologie digitali (smart grids) per una crescente integrazione di una varietà di fonti primarie (generazione distribuita = GD). La tecnologia dell'informazione applicata alle reti elettriche sarà funzionale al miglioramento dell'affidabilità, della sicurezza e dell'efficienza delle reti, favorendo l'introduzione massiva di fonti energetiche rinnovabili, per loro natura intermittenti, con l'utilizzo di sistemi di gestione e controllo sempre più sofisticati per rispondere ad una maggiore richiesta di qualità della fornitura di energia che ha notevoli impatti economici sui processi industriali.

In aggiunta, la diversificazione dei combustibili nei trasporti stradali si sta sempre più orientando verso un crescente utilizzo dell'energia elettrica con lo sviluppo di una rilevante flotta di veicoli elettrici in grado di svolgere una funzione non solo di carico della rete, ma anche, eventualmente, di accumulo distribuito, purché tali veicoli siano dotati di un sistema di accumulo di caratteristiche adeguate e opportunamente controllati e gestiti per interloquire in maniera intelligente con il sistema elettrico.

Questo progetto mira appunto a promuovere la disponibilità industriale di batterie al litio e valutare in condizioni di reale utilizzo le soluzioni più convenienti da un punto di vista tecnologico ed economico, sia per l'utente finale che per il settore industriale e il gestore/fornitore del servizio, in linea con quanto previsto dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale. Le attività riguardano la ricerca, lo sviluppo e la verifica in condizioni pilota assimilabili ad usi reali di elevato interesse energetico e commerciale di accumulatori (più comunemente denominate batterie) al litio, che sono ancora scarsamente sviluppati e provati per le applicazioni stazionarie tipiche per le reti elettriche.

Un'altra linea di attività riguarda lo studio e la progettazione di sistemi di accumulo con batterie al litio, integrati con opportune tecnologie di gestione ed interfaccia intelligenti con un'analisi dei possibili vantaggi energetici ed economici, anche rispetto ad altri sistemi e metodi di accumulo, con particolare attenzione alle implicazioni legate all'introduzione di impianti con fonti rinnovabili ed agli effetti connessi alla ricarica dei veicoli elettrici stradali.

La terza linea di attività si concentra sulla valutazione sperimentale di alcune soluzioni pilota particolarmente significative con la progettazione esecutiva e realizzazione di alcuni prototipi: a titolo indicativo, sono valutate sperimentalmente alcune soluzioni progettuali di particolare interesse energetico ed economico, operando nelle prossimità del confine tra reti di distribuzione/trasmissione ed utenze finali, e quindi applicazioni quali la "casa attiva" (per utenze domestiche anche con veicoli elettrici inclusi) e qualche utenza industriale/servizi. Nelle valutazioni sperimentali (pilota), è stato dato spazio alla possibilità, in virtù delle competenze disponibili sulle batterie al litio, di "rivitalizzare le batterie al litio" dopo l'uso nei veicoli elettrici.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Il progetto è strutturato su tre linee di attività principali che mirano alla ricerca di base su accumulatori al litio particolarmente indicati per le applicazioni stazionarie nelle reti elettriche ed, in parte, anche in quelle mobili in veicoli a trazione elettrica, che possano svolgere anche funzioni di accumulo distribuito:

- la ricerca fondamentale su batterie a litio, per arrivare alla progettazione, realizzazione e prova di celle da laboratorio di scala significativa per applicazioni stazionarie nelle reti elettriche e mobili per veicoli elettrici a più alto rendimento energetico e più compatibili con eventuali ricariche rapide; queste batterie dovranno avere prestazioni, affidabilità e costi molto diversi da quelle attualmente disponibili sul mercato.
- La ricerca fondamentale sulle tecnologie di controllo e di interfaccia con la rete, con una valutazione tecnica ed economica delle diverse tipologie di accumulo nell'ottica di una loro integrazione con impianti a fonti rinnovabili con particolare attenzione alle applicazioni nella distribuzione e negli usi finali, dove le caratteristiche delle batterie sono potenzialmente più interessanti e competitive rispetto ad altri sistemi di accumulo.
- La progettazione e realizzazione prototipale di soluzioni impiantistiche ottimizzate per diverse applicazioni, anche in accoppiamento con supercondensatori, atte a migliorare l'efficienza energetica e il valore economico dei sistemi di generazione ed utilizzo con fonti rinnovabili, includendo anche la possibilità di valutazione dell'interfaccia con varie utenze finali, quali utenze domestiche e reti di ricarica per veicoli a trazione elettrica; lo studio di altri sistemi avanzati di accumulo di energia, quali, ad esempio, supercondensatori elettrochimici

e sistemi di accumulo termico con valutazione delle potenzialità applicative anche mediante verifiche sperimentali.

Sono state condotte attività su tutte e tre le linee previste, in particolare avviando la ricerca sui materiali per le batterie al litio, svolgendo l'analisi preliminare sulle necessità di gestione e controllo del sistema di accumulo verso le reti elettriche e completando alcune attività sperimentali di verifica in casa reale di vari tipi di sistemi accumulo (batterie al litio e supercondensatore) per verificare i vantaggi applicativi. Infine sono stati svolti alcuni studi di supporto per valutare le potenzialità applicative dei sistemi di accumulo.

Ricerca fondamentale su batterie a litio

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

L'attività prevedeva la ricerca di materiali catodici per celle al litio particolarmente adatti per le applicazioni nelle reti elettriche. I materiali dovranno essere scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e basso impatto ambientale. I materiali sono stati selezionati, dopo una breve indagine preliminare, per produrre composizioni catodiche ottimizzate da caratterizzare in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti sono stati costruiti e caratterizzati gli elettrodi in celle di riferimento. In particolare, si è concentrati sui materiali attivi catodici ($LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$, $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$) tra quelli disponibili in commercio in base alle caratteristiche nominali (capacità e energia), costo e impatto ambientale. I materiali catodici sono stati caratterizzati da un punto di vista morfologico e strutturale. Si sono sintetizzato materiali catodici innovativi in varie tipologie ($LiFePO_4$ commerciale, ed olivine del tipo $LiMnPO_4$ e $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$) che sono stati poi caratterizzati secondo modalità concordate. Infine, si è posto l'attenzione sulla sintesi del materiale $LiFePO_4$, mirando ad ottenere una ricopertura (coating) da carbone al fine di incrementare considerevolmente la conducibilità elettronica del materiale.

I materiali catodici selezionati sono stati preparati in forma di nastri catodici, costituiti dal materiale attivo, da un conduttore elettronico e da un opportuno legante. La composizione dei nastri catodici è stata investigata ed ottimizzata in funzione della natura e del contenuto dei vari componenti al fine di ottenere conducibilità (elettronica e ionica), porosità e comportamento termico ottimali per applicazioni in batterie litio-ione. Infine, sono stati caratterizzati i nastri catodici preparati in termini di capacità ed energia erogate, ritenzione di capacità, cicli di vita, efficienza coulombica a differenti densità di corrente e temperature. I test elettrochimici sono stati eseguiti all'interno di ambienti ad umidità controllata, su celle costituite dal catodo in esame, contro-elettrodo di litio ed elettrolita liquido.

Selezione materiali attivi catodici

Il litio ferro fosfato ($LiFePO_4$) è uno dei più interessanti e promettenti (a tuttora largamente investigato) materiali catodici per le batterie al litio. Esso presenta numerosi vantaggi rispetto sono altri materiali: elevata capacità specifica (valore teorico: 170 mA h g^{-1}), tensione di scarica elevata (circa 3,5 V) e costante durante la quasi totalità sia della carica che della scarica, elevata ciclabilità (scarsa degradazione del materiale), possibilità di impiego in applicazioni anche ad elevate temperature (nessuna transizione di fase anche oltre 100 °C), basso impatto ambientale, basso costo. Esso presenta una conducibilità elettronica piuttosto modesta a cui si è ovviato (con successo) ricorrendo con una copertura (coating) delle particelle di $LiFePO_4$ mediante carbone. Infine la sintesi del $LiFePO_4$ è oramai orientata verso materiali aventi particelle di dimensioni nanometriche al fine di ridurre i fenomeni diffusivi dovuti all'intercalazione dello ione litio.

L'ossido di manganese litiato ($LiMn_2O_4$, spinello) è un materiale notevolmente investigato in passato (e tuttora) dovuto ad una buona capacità specifica (valore teorico: 148 mA h g^{-1}), tensione di scarica elevata (circa 4 V), basso impatto ambientale, basso costo. Presenta, tuttavia, una moderata ciclabilità a causa di processi di degradazione del materiale. Inoltre non può essere utilizzato come materiale catodico in sistemi operanti al di sopra di 50 °C a causa di transizione di fase (all'interno del $LiMn_2O_4$) che rendono irreversibile il processo di intercalazione del litio, comportando un rapido decadimento della capacità erogata dopo i primi 4-5 cicli di carica/scarica. È stato selezionato come materiale attivo catodico di confronto.

Gli ossidi misti del tipo $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$, derivati per sostituzione parziale di Mn con Ni (nickel) e Co (cobalto) presentano una stabilità più elevata alla ciclazione (maggiore ritenzione di capacità) rispetto $LiMn_2O_4$. Inoltre presentano un valore di capacità specifica (circa 160 mA h g^{-1}) più elevato e possono operare a tensioni maggiori di 4 V, comportando un marcato incremento (circa 30%) dell'energia gravimetrica. Tuttavia, questi materiali esibiscono, rispetto $LiMn_2O_4$, una maggiore tossicità e costo (data la presenza di Co e Ni).

La selezione del fornitore è stata condotta tenendo conto sia delle caratteristiche nominali (capacità, ciclabilità) che della disponibilità commerciale e del costo di questi materiali attivi. Pertanto, la scelta è caduta su LinYi Gelon

LTD (Cina) per quanto riguarda $LiFePO_4$ e $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$ e su EM Industries, Inc. per $LiMn_2O_4$, che sono in grado di fornire materiali a basso costo (≤ 30 Euro kg^{-1}) fino a centinaia di kg.

A titolo esemplicativo si illustra il materiale attivo $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$ che viene prodotto da LinYi Gelon LTD a differenti rapporti stechiometrici per Mn, Ni e Co. Tuttavia, indagini condotte in via preliminare nei nostri laboratori hanno evidenziato che la composizione Mn:Ni:Co = 3:5:2 esibisce, rispetto altre stechiometrie, migliori prestazioni in termini di capacità erogata in particolare ad elevate densità di corrente, come riportato in Tabella 1.

Tabella 1. Capacità specifica erogata da materiali catodici $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$ (LinYi-Gelon LTD) avente differente rapporto stechiometrico Mn:Ni:Co

Rate (C/n)	Densità di corrente (mA cm^{-2})	1:1:1	4:4:2	3:5:2
		Capacità erogata in scarica (mA h g^{-1})		
C/10	0,22	144,1	144,7	166,6
C/5	0,44	126,9	126,1	160,8
C/2	1,1	107,9	105,8	149,2
1C	2,2	92,7	87,5	135,2
2C	4,4	75,4	64,0	113,1
3C	6,6	52,4	43,6	94,7

Si è concentrati sulla sintesi e caratterizzazione di nuovi materiali catodici a base di $LiMPO_4$ a struttura olivinica, dove M = Mn e Fe e loro miscele, e sull'ottimizzazione della formulazione degli elettrodi catodici a base di $LiFePO_4$ commerciale di fornitore diverso da quello selezionato da ENEA. Il $LiFePO_4$, materiale a struttura olivinica, è non tossico e di basso costo; il forte legame covalente fra gli ioni O^{2-} e P^{5+} nel gruppo PO_4^{3-} ne stabilizza la struttura durante l'inserzione-deinserzione di Li^+ e lo rende resistente alla sovracarica e alla degradazione termica. Le olivine sono pertanto materiali più sicuri rispetto agli ossidi per batterie litio-ione e dopo più di 10 anni di intensi studi è oggi possibile trovare sul mercato $LiFePO_4$ in grado di fornire valori di capacità vicini al teorico.
Un altro membro della famiglia delle olivine, il $LiMnPO_4$, anch'esso non tossico e di basso costo, con un potenziale operativo di 4,0 vs Li/Li^+, quindi entro il limite massimo di potenziale accessibile a molti elettroliti, potrebbe essere un ottimo materiale catodico per batterie litio-ione in grado di fornire energie specifiche teoriche del 20% superiori a quelle con litio ferro fosfato. Il $LiMnPO_4$ è caratterizzato da una più bassa conducibilità elettronica rispetto a $LiFePO_4$ ed è ancora un materiale abbastanza giovane. Il $LiMnPO_4$ è caratterizzato da una più bassa conducibilità elettronica rispetto al $LiFePO_4$ ed è ancora un materiale abbastanza giovane che necessita di studi approfonditi. Il $LiMnPO_4$ è stato da noi sintetizzato seguendo tre diverse strategie di sintesi, partendo da tre diversi precursori del manganese, facendo riferimento alla letteratura.

Per quanto riguarda la preparazione di nuovi materiali catodici a base di olivine, si è effettuato la sintesi sol-gel di $LiMnPO_4$ partendo da tre diversi precursori e con diverse procedure di sintesi. I campioni sono stati poi caratterizzati mediante XRD e TGA (Figura 1). Per superare i problemi legati alle limitate prestazioni elettrochimiche del $LiMnPO_4$, si è sintetizzato un'olivina mista, $LiFe_xMn_{1-x}PO_4$, contenente il 20% di ferro e l'80% di manganese. La sintesi del $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$ è stata eseguita seguendo lo stesso schema seguito per il $LiMnPO_4$.

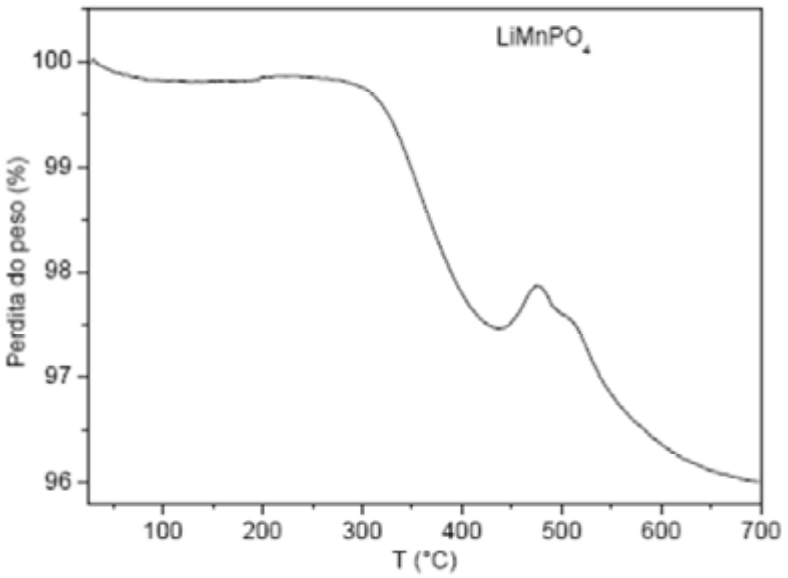


Figura 1. TGA di un campione di $LiMnPO_4$ sintetizzato

Per quanto riguarda la sintesi del $LiFePO_4$, ci si è basati su una nuova procedura che consiste nella sintesi di litio ferro fosfato cristallino nanostrutturato contenente intrinsecamente carbone. La nuova via sintetica proposta si basa nella reazione ad alta temperatura, di un fosfonato alchilico o arilico di ferro (II) con carbonato di litio.

In quest'attività si è seguito la procedura del doppio trattamento modificando i tempi e le temperature di sintesi. Inoltre ha tentato di preparare il $LiFePO_4$ utilizzando come precursore del litio oltre al classico carbonato (Li_2CO_3) un fenilfosfonato di litio, allo scopo di far aumentare la quantità di carbone nel composto finale. In particolare:

- sono stati sintetizzati cinque campioni di $LiFePO_4$, di cui quattro a partire da Fe fenilfosfonato e carbonato di litio [$Fe(C_6H_5PO_3)$ e Li_2CO_3] e uno avente come precursori Li fenilfosfonato e Fe fenilfosfonato [$Li_2C_6H_5PO_3$ e $Fe(C_6H_5PO_3)$], dopo essere stati miscelati nel mulino meccanico, i campioni sono stati sottoposti a differenti condizioni di calcinazione, variando la temperatura, il tempo e l'atmosfera.
- I campioni sono stati sottoposti a caratterizzazione strutturale, mediante analisi ai Raggi X, ad analisi chimica-fisica mediante spettrofotometria IR, termogravimetria e calorimetria differenziale a scansione e inoltre per determinare la dimensione delle particelle i campioni sono stati analizzati tramite microscopio elettronico a scansione.
- I campioni sono stati sottoposti a tests elettrochimici in celle a due tre elettrodi con controelettrodo ed elettrodo di riferimento di litio metallico. Con le celle cosi realizzate sono state eseguite sia prove di ciclazioni galvanostatiche che prove di spettroscopia di potenziale.

La Tabella 2 riassume le caratteristiche dei campioni preparati.

Tabella 2. Diverse condizioni di sintesi di $LiFePO_4$

Campione	Precursori	1ª Macinazione ed aspetto della polvere	1° Trattam. termico	2ª Macinazione	2° Trattam. termico	Ambiente di reazione ed analisi finale
1	Li_2CO_3 e $Fe(C_6H_5PO_3)H_2O$	2 h con mulino meccanico polvere sottile grigio chiaro	20 h a 620 °C rampa 2 °C/min			Hydrostar (95% Ar + 5% H_2) C=2,99% ; H=0,109% N=0% ; S=0%
2	Li_2CO_3 e $Fe(C_6H_5PO_3)H_2O$	2 h con mulino meccanico	20 h a 600 °C rampa 2 °C/min	1 h con mulino meccanico	16 h a 620 °C	Inerte per N_2 C=11,15% ; H=0% N=0% ; S=0%
3	Li_2CO_3 e $Fe(C_6H_5PO_3)H_2O$	2 h con mulino meccanico polvere sottile bianco-grigia	20 h a 600 °C	1h con mulino meccanico	16 h a 800 °C	Inerte per N_2 C=13,26% ; H=0% N=0% ; S=0%
4	Li_2CO_3 e $Fe(C_6H_5PO_3)H_2O$	2 h con mulino meccanico polvere sottile beige scuro (presenza di un contaminante di Fe^{3+})	16 h a 620 °C	1 h con mulino meccanico	20 h a 620 °C	1° tratt. termico atmosfera inerte per N_2 2° tratt. termico atmosfera riducente per Hydrostar C=9,80% ; H=0% N=0% ; S=0%
5	$Li_2C_6H_5PO_3$ e $Fe(C_6H_5PO_3)H_2O$	1 h con mulino meccanico polvere nera, in superficie rosso mattone (presenza contaminante di Fe^{3+})	16 h a 620 °C	1 h con mulino meccanico	10 h a 620 °C	1° trattam. termico atmosfera inerte per N_2 2° Tratt. termico atmosfera riducente per Hydrostar C=6,45% ; H=0,12% N=0% ; S=0%

Caratterizzazione chimico-fisica dei materiali attivi catodici

I materiali commerciali selezionati sono stati caratterizzati mediante diffrazione a raggi X (XRD), microscopia a scansione elettronica (SEM) ed analisi termo-gravimetrica (TGA). La morfologia superficiale dei materiali catodici è stata investigata mediante un microscopio a scansione elettronica Jeol JSM-5510LV. Le scansioni sono state eseguite, alla temperatura ambiente, a differenti ingrandimenti. Le misure XRD (analisi strutturale dei materiali) sono state eseguite, alla temperatura ambiente, mediante un diffrattometro a raggi X Rigaku Miniflex con una lampada in rame (l = 1,54 Å). Le misure termo-gravimetriche sono state condotte in aria mediante una termo-bilancia SDT 2960 accoppiata con un calorimetro TG-DTA (TA Instruments). I materiali sono stati alloggiati in crogioli di alluminio (aventi area sezionale pari a 0,32 cm^2), mentre le scansioni termiche (10 °C min^{-1}) sono state eseguite dalla temperatura ambiente sino a 700 °C. La Figura 2 illustra i diffrattogrammi ottenuti dalle misure XRD relative ai materiali $LiFePO_4$ (A) $LiMn_2O_4$ (B) e $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$ (C). Si osservano i picchi relativi alle varie fasi cristalline presenti nei materiali attivi selezionati.

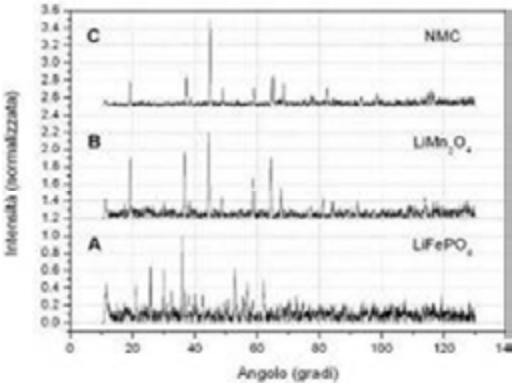
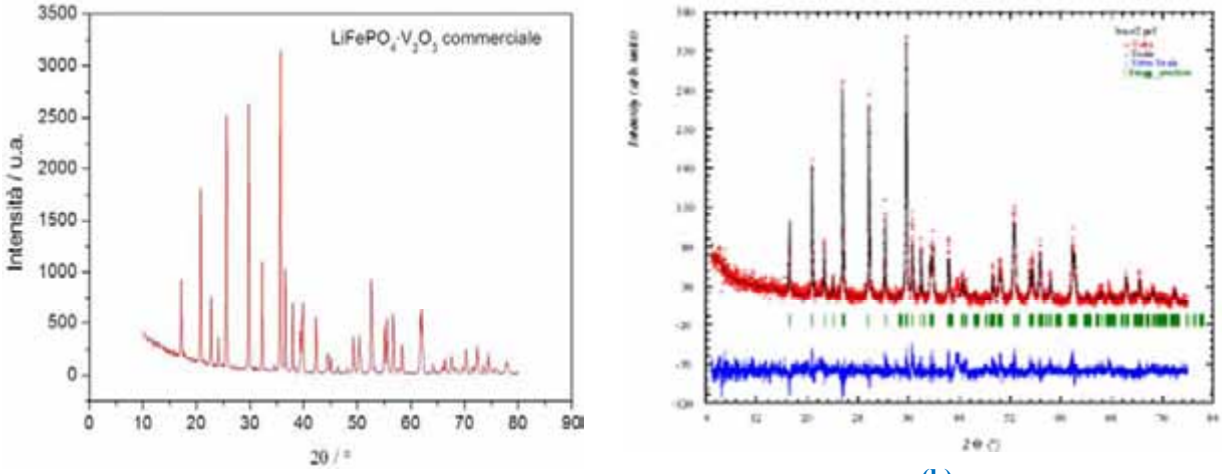


Figura 2. Diffrattogrammi XRD relativi ai materiali $LiFePO_4$ (A) $LiMn_2O_4$ (B) e $LiMn_{1-x-y}Ni_xCo_yO_2$ (C)

Le analisi hanno mostrato che il materiale $LiFePO_4$ presenta la minore granulometria. Si osserva inoltre una certa distribuzione circa le dimensioni delle particelle di materiale attivo. Nelle attività svolte per l'ottimizzazione di materiali catodici a base di $LiFePO_4 \cdot V_2O_3$ (Advanced Lithium Electrochemistry Co., Ltd.) acqustati ed olivine sintetizzate, si sono effettuate varie caratterizzazione: analisi diffrattometrica, termogravimetrica, granulometrica e porosimetrica. La Figura 3 mostra un diffrattogramma di un campione commerciale usato (a) e quello del campione (b) prodotto in laboratorio, che ha effettuato una completa caratterizzazione, sia cristallografica che termogravimetrica, dei campioni prodotti.



(a) (b)

Figura 3. Diffrattogramma campione commerciale (a) e di un campione di laboratorio (b) di $LiFePO_4 \cdot V_2O_3$

Dall'analisi dei raggi X del campione risulta che l'unica fase cristallina presente nella polvere analizzata è $LiFePO_4$. L'analisi Rietveld eseguita sul diffrattogramma di questo campione ha rilevato la presenza di un'unica fase cristallografica ortorombica con il gruppo spaziale Pnma avente i seguenti parametri di cella: a=10,32710; b=6,00620; c=4,69240. Tale struttura cristallina corrisponde a $LiFePO_4$.

Il campione 5 non sembra avere caratteristiche ottimali per ottenere buone prestazioni elettrochimiche, in quanto ha dei grani di dimensioni elevate e soprattutto la quantità di carbonio presente nel composto non è sufficiente a garantire un contatto intimo tra le particelle.

Ottimizzazione del processo di miscelazione $LiFePO_4$/Carbone e di preparazione dei nastri catodici

Al fine di garantire una buona conduzione elettronica nei catodi a base di $LiFePO_4$ è opportuno ricoprire le singole particelle di questo materiale attivo con un conduttore elettronico (processo denominato "coating"). Pertanto, investigazioni preliminari sono state condotte per ottimizzare il tempo necessario al fine di ottenere un sufficiente "coating" del materiale $LiFePO_4$. Quale conduttore elettronico è stato selezionato il carbone Super-P (MMM Carbon) avente una area superficiale pari a 60 m^2 g^{-1}. A tale scopo si è preparato una miscela $LiFePO_4$/Super-P (peso totale pari a 10 g) avente composizione percentuale in peso pari a 10:85. La miscela è stata mescolata in via preliminare in un mortaio di agata e, quindi, suddivisa in 5 frazioni equivalenti (2 grammi ciascuna). Una frazione è stata successivamente mescolata per 20 minuti nel mortaio di agata mentre le altre porzioni sono stata miscelate mediante un gira-giare Spex 2000 ad elevata velocità di rotazione (la disgregazione di eventuali agglomerati sia nel materiale attivo che nel carbone è stata favorita mediante l'introduzione di sfere in acciaio nella giara di

mescolamento). Le quattro miscele sono state mescolate per 2, 4, 8 e 16 minuti, rispettivamente. I campioni prodotti sono stati poi sottoposti a diverse caratterizzazioni strutturali: analisi mediante diffrazione ai raggi X (XRD) e analisi mediante microscopia a scansione elettronica (SEM/EDS). I risultati delle analisi EDS hanno mostrato che il materiale attivo $LiFePO_4$ non subisce variazioni in composizione durante il trattamento di mescolamento. Le miscele $LiFePO_4$/Super-P, ad eccezione di quello mescolato per 4 minuti (rapporto ferro/fosforo quasi stechiometrico) presentano una quantità di ferro superiore rispetto al fosforo (rapporto compreso tra 1,10 e 1,20). I catodi (ottenuti sotto forma di film/nastro) di una batteria al litio sono costituiti dal materiale attivo, un conduttore elettronico (generalmente carbone) ed un opportuno legante polimerico. Pertanto, la composizione dei nastri catodici necessita di essere ottimizzata in funzione della natura e del contenuto dei vari componenti, natura del solvente e tipo di processo al fine di ottenere caratteristiche meccaniche, porosità e conducibilità elettronica (e ionica) ottimali per applicazioni in batterie al litio.

L'ottimizzazione dei nastri catodici in funzione della natura e del contenuto del conduttore elettronico ha previsto la preparazione di set di nastri catodici (dimensioni 3-5 cm × 10-15 cm) aventi analogo contenuto di legante polimerico (fissato al 10% in peso) e contenuto crescente di conduttore elettronico da 0% a 12% in peso. I set differiscono unicamente per la natura del conduttore elettronico. A tale scopo sono stati selezionati due tipi di carbone quale conduttore elettronico, aventi differente area superficiale, che risultano tra i più impiegati nella ricerca di base sulle batterie al litio: i) carbone "Super-P" (MMM Carbon, area superficiale pari a 60 $m^2\ g^{-1}$); ii) carbone "KJB Carbon" (AKZO Nobel, area superficiale pari a 1200 $m^2\ g^{-1}$). La differente area superficiale (e, pertanto, differente granulometria delle relative particelle) del carbone è aspettata influenzare sia la conducibilità elettronica dei catodi che l'efficienza coulombica dei processi di carica e scarica della batteria. Entrambi i tipi di carbone sono stati essiccati sotto vuoto 150 °C per 48 ore al fine di rimuovere eventuali impurezze adsorbite sulla superficie delle particelle. Infine, PoliTetraFluoroEtilene (PTFE, Teflon, Aldrich) in polvere (anche esso molto utilizzato nella preparazione di catodi) è stato selezionato quale legante polimerico. La Tabella 3 elenca i materiali utilizzati nella preparazione dei nastri catodici.

Tabella 3. Elenco componenti dei nastri catodici preparati per ottimizzare il contenuto di carbone

Materiale attivo	Conduttore elettronico	Legante polimerico
$LiFePO_4$ (LinYi-Gelon)	Carbone Super-P (MMM Carbon) Carbone KJB Carbon (AKZO Nobel)	PTFE (Aldrich)

I nastri catodici sono stati preparati mediante mescolamento iniziale del materiale attivo e del carbone al fine di realizzare un adeguato "coating" di carbone sulle particelle di $LiFePO_4$. Questo è stato realizzato mediante trattamento di entrambi i materiali in un gira-giare a rulli (ball-miller). La miscela $LiFePO_4$/carbone viene addizionata al legante polimerico e, successivamente, mescolata in un mortaio di agata al fine di omogeneizzare la miscela catodica. Quest'ultima (sotto forma di pasta) è stata calandrata (mediante calandra a rulli) al fine di ottenere nastri aventi spessore attorno 100 micrometri. La procedura di preparazione dei film catodici può essere schematizzata nel modo seguente:

- le quantità opportune di LiFePO4, carbone e PTFE sono pesate separatamente;
- LiFePO4 e carbone sono introdotti in una giara di polietilene unitamente a sfere di vetro (diametro pari a 5 mm). Da tenere presente che il volume totale dei materiali (incluse le sfere) deve essere compreso tra 1/3 ed 1/2 della giara al fine di garantire una completa omogeneizzazione. Il numero di sfere in vetro (fino ad alcune decine) deve essere adeguatamente valutato (in genere, si introducono sfere sino ad avvertire lo sfregamento delle stesse);
- la giara contenente i materiali viene posta nel ball-miller e miscelata secondo le condizioni descritte in 3.2.1;
- la miscela LiFePO4/carbone viene trasferita in un mortaio di agata e addizionata al PTFE;
- i componenti sono mescolati nel mortaio per almeno 40 minuti;
- la miscela catodica (sotto forma di pasta) è inserita in una calandra a rulli e processata numerose volte (fino ad alcune decine di passaggi sotto la calandra) al fine di ottenere nastri catodici aventi spessore compreso tra 100-300 µm.

I nastri catodici sono stati caratterizzati in termini di conducibilità elettronica per mezzo del metodo delle **"4-punte"**, illustrato in Figura 4. L'obiettivo è quello di definire i rapporti ottimali materiale attivo/conduttore elettronico al fine di garantire elevata conduzione (elettronica) nei catodi.

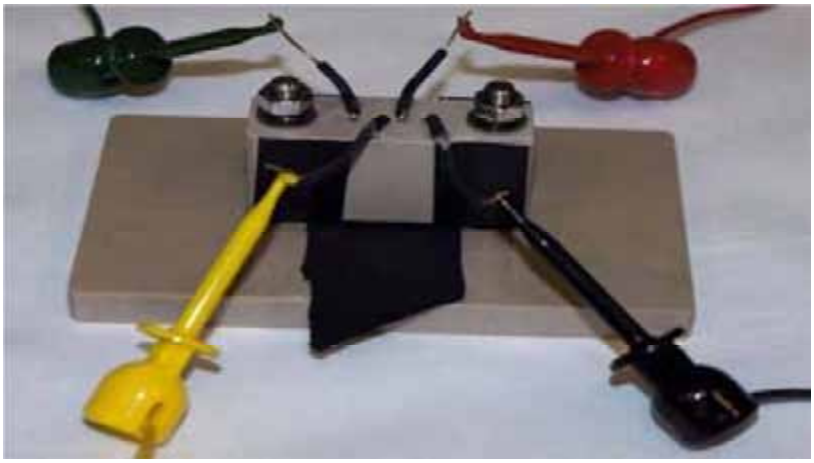


Figura 4. Sistema a "4-punte" per la misura della conducibilità elettronica

Le misure a "4-punte" sono state eseguite su entrambe le superfici di ciascun nastro catodico. La Figura 5 riporta i diagrammi tensione/corrente (V-I) ottenuti per il campione B-3. La misura 1 è relativa ad una superficie del campione, mentre le misure 2 e 3 sono state condotte sulla faccia opposta. I diagrammi sono praticamente sovrapponibili e, pertanto, il valore della resistenza elettronica (ricavato dalla pendenza del diagramma V-I) non varia a seconda della superficie considerata. Ciò indica sia omogeneità del campione che riproducibilità delle misure. Analoghi risultati sono stati ottenuti per tutti i nastri catodici esaminati.

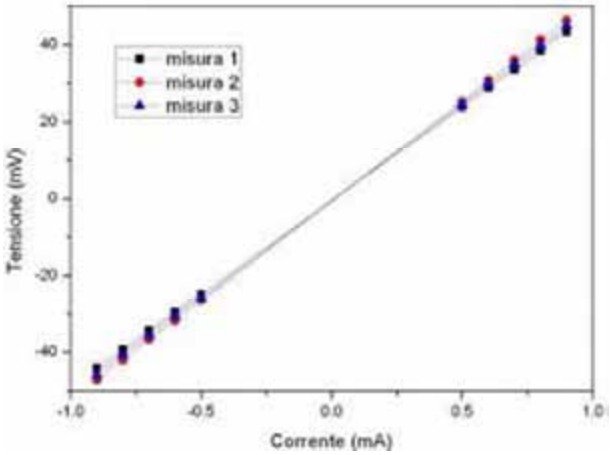


Figura 5. Diagramma tensione/corrente ottenuto su entrambe le superfici del nastro catodico

Si sono quindi preparati delle stese di $LiFePO_4 \cdot V_2O_3$ con formulazione ottimizzata per la preparazione degli elettrodi da caratterizzare come catodi in celle vs Li. La procedura di preparazione di tali stese prevede 90% p/p $LiFePO_4 \cdot V_2O_3$ (puro al 97%, quindi 87,3% di materiale attivo), 5% carboneSuper P e 5% PVDF Kynar HSV 900, su foglio di Al sottoposto ad etching (spessore di 15 m e peso di 4,0 mg cm^{-2}). Le tre polveri (peso totale 4,5 g) sono state miscelate a secco al Mulino Planetario (Planetary mill PULVERISETTE 6) in una giara di agata (80 cm^3) contenente 25 sfere di agata di diametro di 10 mm e le condizioni di macinazione erano: 250 rpm, 15 minuti in senso orario e 15 minuti in senso antiorario. La Tabella 4 mostra i campioni preparati.

Tabella 4. Campioni di elettrodi catodici a base di $LiFePO_4 \cdot V_2O_3$ preparati

CELLA	MATERIALE COMPOSITO		MATERIALE ATTIVO		CORRENTE		POTENZIALI DI CUT-OFF	T DI LAVORO
	mg	mg cm^{-2}	mg	mg cm^{-2}	mA	mA cm^{-2}	V	°C
ENEA_LiFePO4_1	4,88	7,63	4,26	6,66	0,072 (C/10) 0,145 (C/5) 0,241 (C/3) 0,724 (C/1)	0,113 (C/10) 0,227(C/5) 0,377 (C/3) 1,131 (C/1)	2,5 - 4,2	30
ENEA_LiFePO4_5	4,06	6,34	3,54	5,53	0,060 (C/10) 0,120 (C/5) 0,201 (C/3) 0,602 (C/1)	0,094 (C/10) 0,188 (C/5) 0,314 (C/3) 0,941 (C/1)		50
ENEA_LiFePO4_7	6,46	10,09	5,64	8,81	0,096 (C/10) 0,192 (C/5) 0,320 (C/3) 0,959 (C/1)	0,150 (C/10) 0,300 (C/5) 0,500 (C/3) 1,498 (C/1)		10
ENEA_LiFePO4_14	3,70	5,78	3,23	5,05	0,549 (C/1)	0,858 (C/1)		30

In modo analogo sono state preparate le stese di $LiMnPO_4$ con formulazione ottimizzata per la preparazione degli elettrodi da caratterizzare come catodi in celle vs. Li. La procedura adottata è stata simile a quella usata per il materiale commerciale ma con la formulazione di 85% p/p (o 70%) $LiMnPO_4$, 10% (o 20%) carboneSuper P e 5% (o 10%) PVDF Kynar HSV 900, su foglio di Al sottoposto ad etching (spessore di 15 μm e peso di 4,0 mg cm^{-2}). La Tabella 5 riassume i campioni elettrodici preparati da UniBo a base di $LiMnPO_4$.

Tabella 5. Campioni di elettrodi catodici a base di $LiMnPO_4$ preparati

Cella	Materiale elettrodico	Carico $mg_{attivo}cm^{-2}$	T (°C)	Cut - off (V vs. Li)	Capacità $mAh\ g^{-1}_{attivo}$
ENEA_LiMnPO4_4	$LiMnPO_4$ da $MnCO_3$, pirolisi 700°C (85% attivo, 10% Carbone SuperP)	6,16	30	3,0 – 4,6	43
ENEA_LiMnPO4_8	$LiMnPO_4$ da Mn citrato, pirolisi 650°C macinato 20 minuti (85% attivo, 10% Carbone SuperP)	5,36	30	2,7 – 4,6	34
ENEA_LiMnPO4_9		6,45	50		42
ENEA_LiMnPO4_12	$LiMnPO_4$ da $MnCO_3$, pirolisi 650°C macinata 3 ore (85% attivo, 10% Carbone SuperP)	4,88	30		42
ENEA_LiMnPO4_13		4,55	50		59
ENEA_LiMnPO4_16	$LiMnPO_4$ da $MnCO_3$ macinata a umido 3 ore (70% attivo, 20% Carbone SuperP)	2,7	30	2,5 – 4,6	62
ENEA_LiMnPO4_15		2,5	50		69

Tutti questi campioni sono stati sottoposti a caratterizzazione elettrochimica, insieme a misure di conducibilità elettronica con il metodo a 4 punte.

Caratterizzazione elettrochimica dei nastri catodici

Le caratteristiche elettrochimiche dei materiali catodici selezionati sono state investigate in via preliminare al fine di avere risultati "di riferimento" con cui comparare quelli ottenuti per elettrodi successivamente ottimizzati, anche presso i laboratori universitari.

L'elettrodo di una batteria al litio è un nastro composito poroso, depositato su un supporto conduttore di corrente (generalmente alluminio per i catodi) e costituito dal materiale attivo, un conduttore elettronico e un legante (polimerico). $LiMn_2O_4$ è stato scelto come materiale attivo, mentre il carbone Super-P è stato considerato quale conduttore elettronico. Il contenuto di carbone è stato fissato al 5% in peso, in accordo con i risultati ottenuti dall'ottimizzazione del materiale, mentre quello del materiale attivo a 89% in peso (dati precedenti avevano mostrato buone prestazioni dei catodi per un rapporto in peso materiale attivo/carbone pari a circa 18). Al fine di assicurare anche una buona conducibilità ionica l'elettrodo deve possedere un'adeguata porosità (oltre ad avere una struttura morfologica stabile nel tempo) onde poter garantire un sufficiente contenuto di elettrolita liquido. Pertanto il catodo è stato preparato secondo la tecnica (oramai consolidata) denominata "solvent casting" (dispersione di materiali in un solvente opportuno e successiva colatura sopra un supporto). Il legante polimerico utilizzato è PoliVinilideneFluoruro-EsaFluoroPropilene (PVdF-HFP, Aldrich), ampiamente impiegato nella realizzazione di elettrodi per batterie, anziché PTFE (insolubile praticamente in tutti i solventi ed avente un costo più elevato) mentre ciclaesanone (Aldrich) è stato selezionato come solvente (buona capacità a dissolvere PVdF-HFP e relativamente volatile). Il contenuto di legante è stato fissato al 6% (dati precedenti avevano mostrato che tale contenuto di legante era sufficiente a garantire stabilità meccanica ed aderenza del catodo al collettore di corrente unitamente ad una buona porosità.

I risultati ottenuti sono riportati nelle Figura 6 (profilo tensione/capacità relativo a semi-cicli di scarica eseguiti a differenti valori di corrente) e Figura 7 (evoluzione della capacità con il numero di cicli, a differenti valori di corrente). I profili esibiscono due plateau attorno 4,1 V e 4,0 V, del materiale $LiMn_2O_4$, anche ad elevate correnti di scarica. Oltre il 92% della capacità nominale viene viene rilasciata a C/10. I catodi mostrano un'elevata ritenzione di capacità con la corrente sino a C/2 (114 mA h g^{-1} erogati a C/2 contro 120 mA h g^{-1} forniti a C/10, ovvero ad una corrente cinque volte inferiore). Un ulteriore incremento della densità di corrente (≥ 1C) comporta soltanto un decremento della capacità erogata sino 107 mA h g^{-1} (1C) mentre 77 mA h g^{-1} sono erogati a 2C, dovuto a fenomeni diffusivi che si manifestano nell'elettrolita ad elevati regimi di corrente.

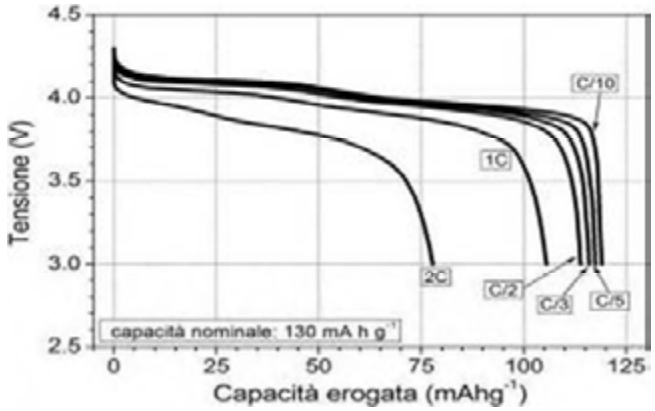


Figura 6. Profilo tensione/capacità, relativo a semi-cicli di scarica eseguiti a differenti valori di corrente, per i nastri catodici a base di $LiMn_2O_4$. T = 20°C

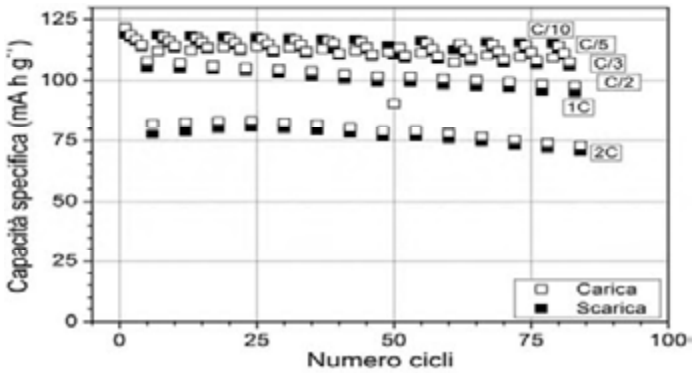


Figura 7. Evoluzione della capacità degli elettrodi con il numero di cicli, a differenti valori di corrente, relativo ai nastri catodici $LiMn_2O_4$. T = 20°C

La Figura 7 mostra una buona ritenzione di capacità, specie a valori di corrente ≤ 1C (circa il 95% della capacità iniziale viene erogato dopo 80 cicli), con un'efficienza coulombica superiore al 98%.

Le conclusioni sulla caratterizzazione elettrochimica dei materiali acquistati e sviluppati da UniBo confermano l'ottimizzazione della formulazione e della preparazione di elettrodi a base di un $LiFePO_4$ commerciale dell'Advanced Lithium Electrochemistry Co., Ltd ($LiFePO_4$ 90% p/p): a 30 °C la capacità specifica di scarica a C/10 era di 160 mAh/$g_{LiFePO4}$ (1 mAh/cm^2), pertanto gli elettrodi preparati con il suddetto $LiFePO_4$ commerciale hanno fornito ottime prestazioni elettrochimiche e tali elettrodi sono stati utilizzati per l'assemblaggio delle batterie litio-ione. Le prove invece condotte con $LiMnPO_4$ e $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$, prodotti con diverse sintesi sol-gel partendo da diversi precursori hanno dato valori di capacità specifica superiori a 100 mAh/g_{attivo} solo nel caso del $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$, a C/10 e T=50 °C. Questi materiali elettrodici sono quindi da considerarsi ancora "giovani" e richiedono ulteriori studi di ottimizzazione.

Per la caratterizzazione del catodo preparato da UniRoma1, è stata utilizzata come cella un raccordo di tipo idraulico (in polipropilene) a "T" a tenuta, dotato di pistoni di acciaio che servono da portacorrente, e mantengono il pacchetto, costituito dalla sequenza anodo/separatore/catodo, ben compatto. Come elettrolita è stato usato una soluzione 1 M di $LiPF_6$ in etilene carbonato (EC) e dimetilcarbonato (DMC) con un rapporto 1:1 in peso. Il separatore usato è un foglio di lana di vetro (GFD A) di spessore 0,4 mm a secco. Le prove galvanostatiche sono state fatte fissando la corrente di scarica in base ai grammi di materiale attivo degli elettrodi in modo da effettuare scariche a C/n rate desiderato; il valore della capacità dell'$LiFePO_4$ per il calcolo è stato preso quello teorico cioè 170 mAh/g . La carica è stata fatta alla stessa corrente fino al raggiungimento di un potenziale di 4,0 V poi si innescava automaticamente una carica potenziostatica a 4,25 V che si interrompeva quando la corrente raggiungeva 1/10 del valore di corrente impostato per la carica galvanostatica. La Figura 8 mostra la capacità del Campione 3 in funzione del numero di cicli: analoghe prove sono state condotte su tutti i campioni prodotti.

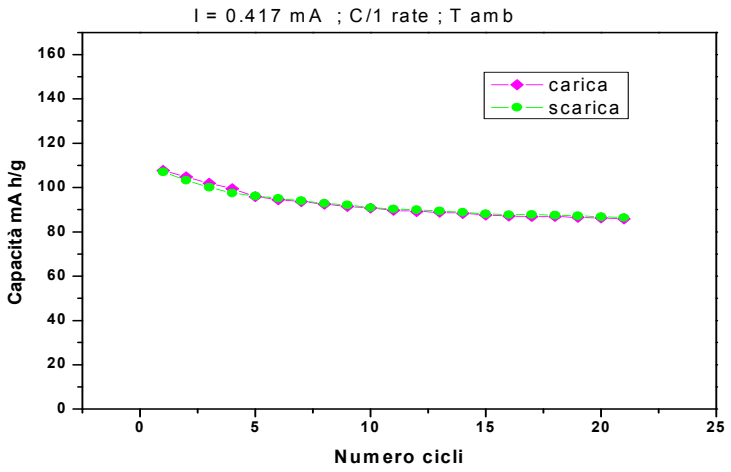


Figura 8. Capacità in funzione del numero di cicli del campione 3 di UniRoma1

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

L'attività riguarda la ricerca di materiali anodici per celle al litio particolarmente adatti per le applicazioni nelle reti elettriche. I materiali sono stati scelti tra quelli più convenzionali (come le grafiti e composti del carbonio) e quelli più innovativi (ossidi metallici), con l'obiettivo di migliorare le prestazioni dei catodi prodotti mantenendo basso il costo e l'impatto ambientale. I materiali sono stati selezionati, dopo una breve indagine preliminare, per produrre composizioni anodiche ottimizzate da caratterizzare in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti sono stati costruiti e caratterizzati gli elettrodi anodici in celle di riferimento.

Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Camerino (UniCa) e, in parte, anche se inizialmente non previsto, con l'Università di Roma "La Sapienza" (UniRoma1).

In particolare, l'ENEA ha selezionato materiali attivi anodici (grafite, carbone) tra quelli disponibili in commercio in base alle caratteristiche nominali (capacità e energia), costo e impatto ambientale. UniCa ha sintetizzato materiali anodici innovativi (grafiti ottimizzate e/o drogate con particelle metalliche). UniRoma1 infine si è occupata della sintesi di materiali anodici innovativi come TiO_2, $Li_4Ti_5O_{12}$ (nanometrici). I materiali anodici sono stati poi caratterizzati da un punto di vista morfologico e strutturale. Successivamente l'ENEA ha preparato nastri anodici utilizzando i materiali attivi selezionati così composti: il materiale attivo, un conduttore elettronico ed un opportuno legante. La composizione dei nastri anodici sarà ottimizzata in funzione della natura e del contenuto dei vari componenti al fine di ottenere conducibilità (elettronica e ionica) e porosità ottimali per applicazioni in batterie litio-ione. Infine, ENEA, UniCa e UniRoma1 hanno i nastri anodici preparati in termini di capacità ed energia erogate, ritenzione di capacità, cicli di vita, efficienza coulombica a differenti densità di corrente e temperature. I test elettrochimici sono stati eseguiti, all'interno di ambienti ad umidità controllata, su celle costituite dall'anodo in esame, contro-elettrodo di litio ed elettrolita liquido.

Selezione materiali attivi anodici

La grafite è il materiale attivo anodico (tuttora largamente investigato) più utilizzato per le batterie al litio. Esso presenta numerosi vantaggi: elevata capacità specifica (valore teorico: 370 mA h g^{-1}), tensione di scarica pari a poche decine di mV rispetto il litio metallico (garantendo pertanto elevata tensione nominale alla cella completa litio-ione), buona ciclabilità, possibilità di impiego in applicazioni anche ad elevate temperature, impatto sull'ambiente non drammatico, basso costo. Presenta inoltre una elevata conducibilità elettronica.

La selezione del fornitore è stata condotta dall'ENEA tenendo conto delle caratteristiche nominali (capacità, ciclabilità), disponibilità commerciale e costo dei materiali attivi. Pertanto, la scelta è caduta su LinYi Gelon LTD (Cina) che è in grado di fornire grafite a costo piuttosto contenuto (20 Euro/kg) e fino a diverse tonnellate. Sono stati opzionati due tipi di grafite, denominate rispettivamente MCMB "high capacity, HC" (aspettata di fornire una maggiore capacità) ed MCMB "high rate, HR" (aspettata di erogare una maggiore ritenzione di capacità a correnti elevate). È attesa una capacità nominale intorno a 320-330 mAh/g. La Tabella 6 presenta le specifiche di una delle frafiti selezionate.

Tabella 6. Specifiche materiale anodico grafite MCMB "high capacity, HC" (LinYi-Gelon LTD)

Analisi elementare		Granulometria
C: ≥ 99,8%	Fe: ≤ 36 ppm	$D_{10\%}$: ≥ 11 µm
Area superficiale: ≤ 1,0 $m^2 g^{-1}$		$D_{50\%}$: 22-26 µm
Densità (*): ≥ 1,29 g cm^{-3}		$D_{90\%}$: ≤ 55 µm

(*) riferita al materiale pressato

In aggiunta alle grafiti anche drogate, si è anche studiato il titanato di litio (LTO) $Li_{4/3}Ti_{5/3}O_4$, un materiale molto interessante, in quanto il suo uso nell'anodo di batterie al litio potrebbe aiutare a risolvere molti dei problemi che caratterizzano il materiale anodico scelto per le batterie Li-Ione classiche, e cioè la grafite. La grafite è in grado di intercalare ioni di litio a potenziali simili, di poco superiori, al potenziale di riduzione degli ioni di litio a litio metallico, e anche se questa condizione contribuisce alla massimizzazione del potenziale di cella di una batteria Li-Ione carica, essa genera problemi intrinseci. Inoltre l'anodo a base di grafite risulta poco tollerante nei confronti della sovraccarica della batteria: questa infatti potrebbe portare alla formazione di dendriti di litio metallico sulla superficie dell'anodo. L'LTO è ottenuto dalla litiazione dell'ossido di titanio, un materiale molto comune, economico e non tossico.
Per quanto riguarda la sintesi dell'ossido di titanio da utilizzare come anodo in celle al litio ioni, sono state usate delle lastrine di titanio le quali sono state trasformate superficialmente in sistemi nanotubolari di TiO_2 attraverso i seguenti trattamenti:

- Pre-trattamento.
- Pre-anodizzazione.
- Anodizzazione elettrochimica.
- Pre-trattamento termico.
- Trattamento termico.

I materiali anodici prodotti sono stati sottoposti ad una completa caratterizzazione da un punto di vista morfologico e strutturale mediante diffrazione a raggi X (XRD), microscopia a scansione elettronica (SEM) ed analisi termo-gravimetrica (TGA). La Figura 9 mostra un diffrattogramma dei campioni di grafite commerciali.

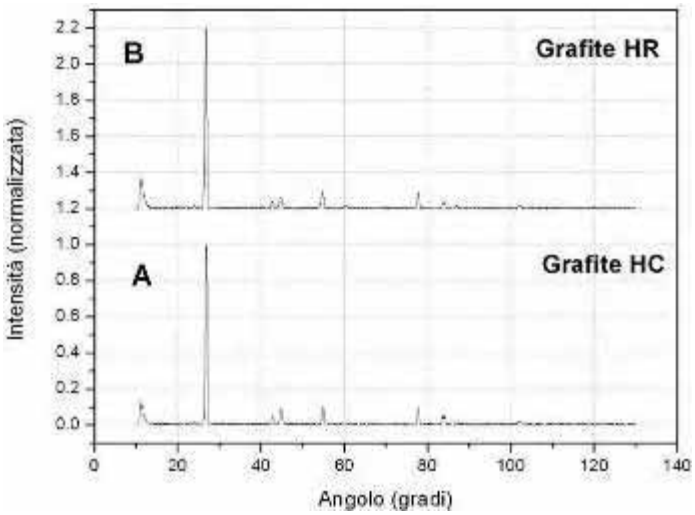


Figura 9. Diffrattogrammi XRD relativi ai materiali grafite "HC" (A) e grafite "HR" (B)

Ottimizzazione del processo di preparazione dei nastri catodici

I nastri anodici sono stati preparati mediante mescolamento iniziale del materiale attivo e del carbone al fine di realizzare un'adeguata ricopertura (coating) di carbone sulle particelle di grafite. Questo è stato realizzato mediante trattamento di entrambi i materiali in un gira-giare a rulli (ball-miller). La miscela grafite/carbone è stata addizionata al legante polimerico e, successivamente, mescolata in un mortaio di agata al fine di omogeneizzare la miscela anodica. Infine, la miscela anodica (sotto forma di pasta) viene calandrata (mediante calandra a rulli) al fine di ottenere nastri aventi spessore attorno 100 micrometri.

Sono stati preparati nastri anodici "precursori" (dimensioni 3-5 cm × 10 cm), cioè senza un substrato conduttore elettronico, aventi analogo contenuto di legante polimerico (fissato al 10% in peso) e contenuto crescente di conduttore elettronico da 0% a 10% in peso. Questa soluzione intermedia ha avuto l'obiettivo di determinare il rapporto ottimale grafite/carbone, indipendentemente dalla natura e tipo di legante e dalla procedura di preparazione degli anodi. Per questo motivo è stato deciso di preparare gli anodi secondo una procedura meno complessa del "solvent casting". Figura 10 illustra un esempio di nastro anodico "precursore".

Figura 10. Foto di un nastro anodico "precursore" preparato dall'ENEA

I nastri anodici che sono stati poi caratterizzati in termini di conducibilità elettronica con il sistema a "4-punte" per definire i rapporti ottimali materiale attivo/conduttore elettronico. La Figura 11 mostra l'andamento della conducibilità elettronica dei nastri anodici in funzione del contenuto di carbone (quantità e tipo).

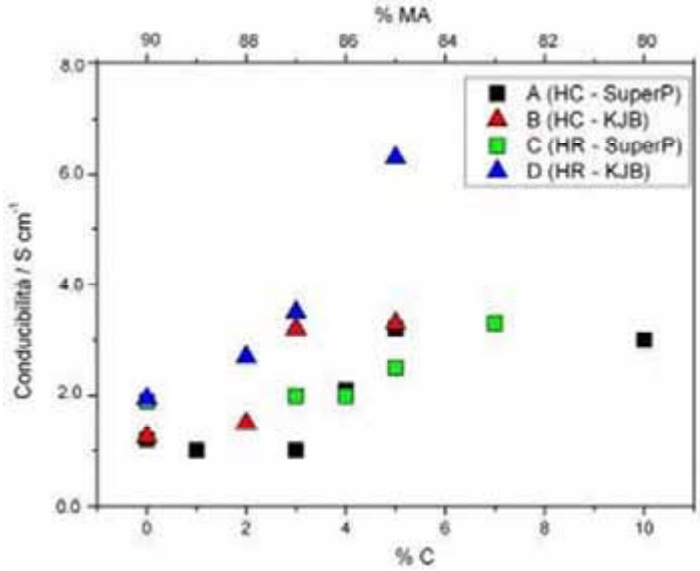


Figura 11. Dipendenza della conducibilità elettronica specifica dei nastri anodici a base di grafite, in funzione del contenuto di carbone e tipo di carbone

Uno dei principali problemi associati al processo di fabbricazione degli elettrodi è rappresentato dalla necessità di raggiungere dei "loading" elevati di materiale attivo sull'elettrodo al fine di ottenere più elevati valori di capacità per unità di area. Per risolvere questo problema si è sviluppata una procedura di realizzazione di anodi di grafite che facesse uso di una miscela di due grafiti, Timcal KS-4 e Timcal SLP-30, con granulometria di 4 e 30 µm rispettivamente. Gli anodi ottenuti senza l'utilizzo di alcun agente conduttivo hanno visto l'aumento della percentuale di materiale attivo al 92%. Inoltre UniCa ha preparato layers anodici a base di LTO mediante una sospensione di $Li_4Ti_5O_{12}$ (Aldrich; <100 nm) con PVdF (78:12:10 in peso) in N-Metil-2-Pirrolidone, come agente conduttivo.

Preparazione e caratterizzazione completa dei nastri anodici

Generalmente, la preparazione dei manufatti compositi costituiti da materiale inorganico (in questo caso grafite + carbone) ed un legante polimerico (PVdF-HFP) viene eseguita secondo tre differenti metodologie:

1. dispersione del materiale inorganico nel solvente e successiva addizione del legante (alla dispersione). La miscela materiale inorganico + legante + solvente è denominata "slurry";
2. dissoluzione del legante nel solvente al fine di formare una soluzione viscosa (binder solution) alla quale è successivamente aggiunto il materiale inorganico;
3. preparazioni separate della binder solution (legante + solvente) e della dispersione materiale inorganico/solvente. Successivamente, la binder solution è addizionata e miscelata alla dispersione materiale inorganico/solvente.

E' stata scelta la metodologia 3 che era già stata ottimizzata in precedenti esperienze.

La Tabella 7 riporta le caratteristiche principali dei campioni di nastri anodici preparati dalla'ENEA. I nastri anodici preparati sono stati analizzati mediante microscopia a scansione elettronica (SEM) a differenti ingrandimenti e, di questi, è stata poi determinata la densità e porosità. Sulla base dei risultati sperimentali sono state infine selezionate le composizioni ottimali dei nastri anodici da sottoporre a caratterizzazione elettrochimica. Tali risultati hanno evidenziato la migliore manifattura nei campioni che utilizzano il carbone Super-P come conduttore elettronico (indipendentemente dalla natura della grafite). I nastri anodici preparati con questo conduttore elettronico presentano una buona aderenza al substrato ed una superficie (attiva) levigata, uniforme e priva di difetti anche a bassi (3%) contenuti di legante PVdF-HFP. Inoltre, l'impiego del Super-P consente di utilizzare una moderata quantità di solvente fino ad un contenuto di legante pari al 7%.

Tabella 7. Specifiche relative ai nastri anodici preparati per l'ottimizzazione del contenuto di legante

Nastri anodici	Grafite	Carbone	Rapporto in peso grafite/carbone	% legante PVdF-HFP	Rapporto (grafite+carbone)/ solvente	Consistenza slurry	Aderenza al substrato in rame	Porosità anodo
A-17-3	HC	Super-P	17 : 1	3	1 : 1,3	+	+	44
A-17-5	HC	Super-P	17 : 1	5	1 : 1,3	+	+	43
A-17-7	HC	Super-P	17 : 1	7	1 : 1,4	+	+	44
A-17-10	HC	Super-P	17 : 1	10	1 : 2,1 (1)	-	+	44
B-29-3	HC	KJB	29 : 1	3	1 : 1,7	++	-+ (2)	48
B-29-5	HC	KJB	29 : 1	5	1 : 1,7	++	±	47
B-29-7	HC	KJB	29 : 1	7	1 : 2,3	+	±	46
C-17-3	HR	Super-P	17 : 1	3	1 : 1,6	+	+	42
C-29-3	HR	Super-P	29 : 1	3	1 : 1,2	+	+	-
D-17-3	HR	KJB	17 : 1	3	1 : 2,3	++	- (2)	-
D-17-5	HR	KJB	17 : 1	5	1: 2,3	++	- (2)	-
D-17-7	HR	KJB	17 : 1	7	1 : 2,5	+	±	48
D-29-3	HR	KJB	29 : 1	3	1 : 1,6	++	-	47
D-29-5	HR	KJB	29 : 1	5	1 : 1,9	+	±	44
D-29-7	HR	KJB	29 : 1	7	1 : 2,4	+	+	49

Legenda commenti

Consistenza dello slurry (ispezione visiva):
++ elevata densità
+ densità/viscosità ottimale
- elevata viscosità

(1) minima quantità di solvente necessaria per preparare la binder solution

Aderenza al supporto:
+ buona
± distacco saltuario anodo dal substrato sottoposto a taglio
- distacco dal substrato dopo essiccamento

(2) il nastro anodico presenta numerosi difetti (agglomerati sulla superficie, separazione dei componenti, distacco dal substrato)

Gli anodi più promettenti sono stati caratterizzati in celle ad elettrolita liquido $LiPF_6$(1 M)-Etilene Carbonato (EC) – DiEtilene Carbonato (DEC) (rapporto in peso EC:DEC = 1:1) supportato su un disco di fibra di vetro (diametro pari a 10 mm) avente la funzione di separatore. L'elettrodo di lavoro è un campione circolare (tagliato dal nastro anodico, avente diametro = 10 mm e supportato su un analogo disco in rame) mentre il controelettrodo è un disco (diametro = 10 mm, spessore 50 µm) di litio metallico (fornito dalla Cyprous Foote).

I campioni anodici esibiscono una quantità di materiale attivo compreso tra 7-8 mg cm^{-2}, corrispondenti ad una capacità pari a 2,3-2,7 mA h cm^2. Le celle siffatte (denominate semicelle anodiche) hanno mostrato, appena assemblate, una tensione a circuito aperto (OCV) attorno 3 V (valore molto riproducibile). Le semicelle anodiche sono state investigate mediante cicli galvanostatici/potenziostatici di scarica/carica condotti tra 2-0 V (limite in carica) e 0,01 V (limite in scarica), rispettivamente, a differenti densità (0,095 – 7 mA cm^{-2}) e regimi (C/10 - 3C) di corrente ed a temperature comprese tra -10 °C e 50 °C. La Figura 12 mostra l'andamento della capacità specifica di semicelle anodiche prodotte.

Sono state condotte le misure elettrochimiche sui vari campioni di materiale anodico, utilizzando celle a T da laboratorio (Figura 13) in configurazione a 3 elettrodi. Il corpo della cella è costituito da un raccordo in polipropilene con diametro interno di 9 mm. I collettori sono di acciaio inox da 9 mm. Tutti gli elettrodi utilizzati hanno diametro di 9mm; come controelettrodo ed elettrodo di riferimento sono stati usati dischetti da 9 mm di Litio separati mediante Cellgard 2400 (isopropilene isotattico). L'elettrolita utilizzato è stato 1 M di $LiPF_6$ in EC:DMC:DEC 1:1:1 (Merck, Battery Grade). Tutti i test elettrochimici sono stati effettuati mediante ciclazioni galvanostatiche tra i potenziali di 10 mV e 1500 mV.

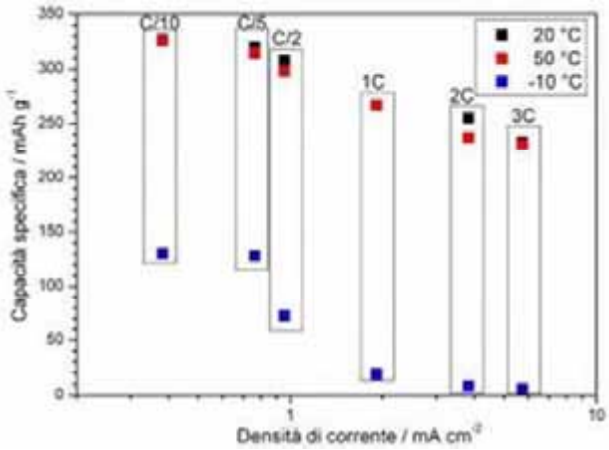


Figura 12. Dipendenza della capacità specifica, relativa alla fase di carica, in funzione della densità di corrente

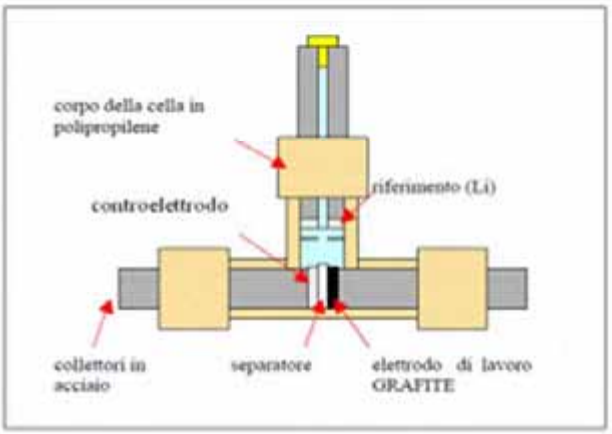


Figura 13. Cella a T a tre elettrodi per la caratterizzazione elettrochimica di materiali anodici

Altri "layers" anodici sono stati ottenuti da UniCa, partendo da una miscela di due grafiti a diversa granulometria, Timcal SLP-30 e Timcal KS-4, entrambe attive nel processo di intercalazione del litio.

Figura 14 mostra l'andamento della capacità di composti anodici a base di 2 diverse grafiti ossidate. Inoltre, è stato anche analizzato l'effetto della pressione su capacità e stabilità di anodi di grafite.

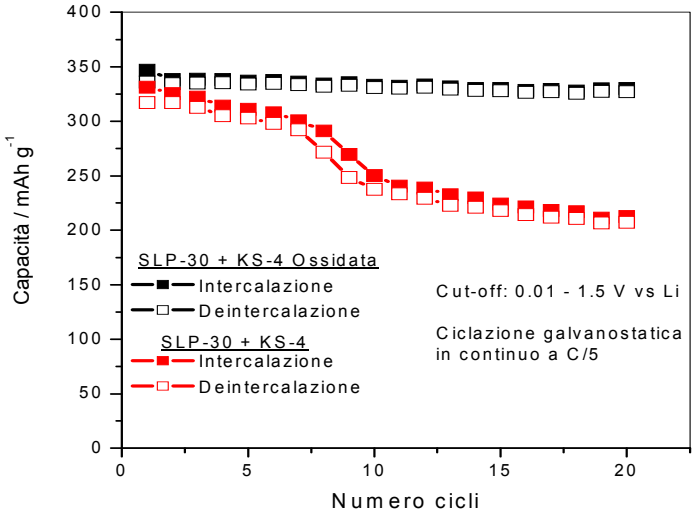


Figura 14. Capacità in funzione dei cicli e della grafite utilizzata

È evidente come l'utilizzo della grafite Timcal KS-4 ossidata in associazione con grafite Timcal SLP-30 abbia determinato un aumento della capacità e della stabilità degli elettrodi e di conseguenza questa tipologia di elettrodi è stata selezionata per gli esperimenti successivi.

Infine, si è dimostrato che nanoparticelle metalliche, nella fattispecie particelle di Cu, sono ugualmente efficaci nell'incrementare le performances di elettrodi di $Li_4Ti_5O_{12}$ quando gli elettrodi sono sottoposti a ciclazioni galvanostatiche ad alti valori di C-rate, come chiaramente deducibile dalla Figura 15.

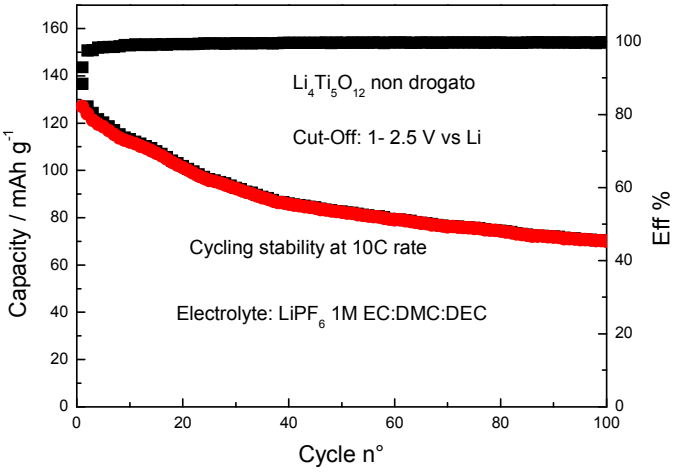


Figura 15. Stabilità valutata su 100 cicli galvanostatici eseguiti a 10C

Si sono infine svolte alcune caratterizzazioni elettrochimiche sui diversi campioni di anodi a base di LTO mediante voltammetria ciclica. La Figura 16 dà un esempio dell'andamento della capacità in funzione dei cicli e delle correnti di scarica.

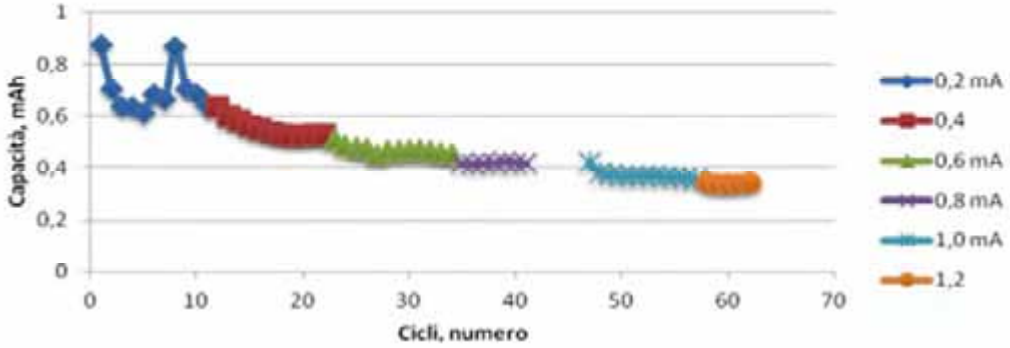


Figura 16. Andamento della capacità di anodi a base di LTO

La perdita di capacità nei primi cicli è sicuramente dovuta ad un assetto strutturale dell'ossido di titanio. Le prove dimostrano che, anche se con diversi valori assoluti di capacità, passando da 0,4 a 0,8 o a 1,0 mA la capacità varia poco. I risultati sono quindi interessanti e meritano di essere approfonditi.

Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio

I materiali anodici e catodici selezionati e sviluppati sono stati poi integrati in una cella completa di elettrolita (liquido e/o polimerico), opportunamente progettata in scala da laboratorio per la verifica delle prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale. Una procedura di prova è stata sviluppata, anche di concerto con il Gruppo di Coordinamento con CNR ed RSE, ed utilizzata durante le prove nei diversi laboratori e rendere compatibili e meglio confrontabili i risultati.

In particolare, ENEA in collaborazione con UniBo, UniCa e UniRoma1 ha sviluppato un opportuno design di cella (in scala di laboratorio) al fine di verificarne le prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale.

ENEA, in collaborazione con CNR (Università di Roma) ed RSE, ha sviluppato e concordato con UniBo, UniCa e UniRoma1 una procedura di test elettrochimici per celle complete litio-ione al fine di riprodurre le condizioni operative tipiche delle reti elettriche.

Infine, I nastri catodici e anodici, sviluppati negli Obiettivi A e B, sono stati integrati in celle complete litio-ione ad elettrolita liquido. Le celle, realizzate all'interno di ambienti ad umidità controllata secondo il design sviluppato, sono state caratterizzate secondo le procedure di prova concordate.

Definizione design di cella

La definizione del design di cella ottimale (per scala di laboratorio) è stata realizzata tenendo conto dei seguenti parametri:

- possibilità di realizzare celle in scala di laboratorio aventi dimensioni molto contenute (area attiva pari a 1-2 cm^2) al fine di utilizzare quantità molto modeste di materiale (catodo, anodo, elettrolita);
- contenitore di cella realizzato in materiale inerte (PoliPropilene, Teflon);
- possibilità di introdurre collettori di corrente;
- possibilità di alloggiare un elettrodo di riferimento;
- facilità assemblaggio dei componenti;
- elevata tenuta (evitare fuoriuscita liquido e/o ingresso atmosfera esterna);
- ingombro non elevato;
- riproducibilità misure.

Sulla base dei suddetti parametri è stata prescelta, per il contenitore di cella, una tipologia denominata «T» generalmente impiegata per elettroliti liquidi. Tale tipologia utilizza un raccordo di tipo idraulico (in polipropilene o Teflon) di tipo "T" a tenuta (dotato di pistoni in acciaio in qualità di portacorrente) in grado di ospitare la cella elettrochimica vera e propria, costituita dalla sequenza anodo/separatore/catodo e successivamente riempita con elettrolita liquido. La Figura 17 mostra una tipica cella a "T" realizzata in polipropilene (PP), un materiale inerte rispetto ai componenti elettrodici ed elettrolitici. La cella vera e propria è costituita da un cilindro avente diametro e spessore pari, rispettivamente, a 10 mm e poche centinaia di micrometri. Il contenitore a "T" presenta un ingombro ridotto e facilità di assemblaggio mentre la tenuta è assicurata da apposite guarnizioni e ghiere. Vi è inoltre la possibilità di alloggiare un terzo elettrodo (generalmente utilizzato come riferimento).

Figura 17. Tipologia di cella a "T" realizzata in Teflon

Questa tipologia di cella, disponibile in commercio in qualità di raccordo idraulico a costi piuttosto contenuti, è stata adattata alle esigenze previste dalle attività di ricerca. Pertanto, il diametro della sezione dei condotti è stato incrementato sino a 10 mm mediante opportuno alesaggio dei contenitori a "T". I collettori di corrente, cilindri in acciaio inox (aventi diametro ed altezza pari, rispettivamente, a 10 mm e 6 cm) dotati di superficie laterale speculare, sono stati realizzati in ENEA. Il design di cella sviluppato è stato adottato per la realizzazione di semicelle catodiche e anodiche (al fine di valutare le prestazioni dei nastri catodici ed anodici selezionati, rispettivamente, nel corso delle attività previste negli Obiettivi A e B) e di celle complete litio-ione che possono essere descritte secondo le caratteristiche riportate nella Tabella 8.

Tabella 8. Schema delle semicelle (catodiche e anodiche) e delle celle complete assemblate

Componente	Semicella catodica	Semicella anodica	Cella completa
Elettrodo 1	Litio metallico	Litio metallico	Campione nastro catodico
Elettrolita	$LiPF_6$-EC-DEC	$LiPF_6$-EC-DEC	$LiPF_6$-EC-DEC
Elettrodo 2	Campione nastro catodico	Campione nastro anodico	Campione nastro anodico

Le semicelle e le celle complete sono state assemblate presso i laboratori di ENEA secondo la seguente procedura:

- introduzione di un portacorrente cilindrico nel contenitore e relativo fissaggio (a tenuta) mediante guarnizione e ghiera;
- alloggiamento (sul collettore) della sequenza elettrodo 1 / separatore / elettrodo 2 entro il contenitore;
- introduzione del secondo portacorrente nel contenitore e relativo fissaggio;
- riempimento della cella con l'elettrolita liquido (un leggero vuoto per alcuni secondi può promuovere il riempimento degli elettrodi e del separatore);
- sigillatura della cella.

Le fasi (a), (b) e (c) sono state eseguite all'interno di un ambiente ad umidità controllata (< 20 ppm) denominato camera secca, mentre le fasi (d) e (e) sono state condotte (in assenza di ossigeno) all'interno di una scatola a guanti ad atmosfera controllata di argon (< 1 ppm sia H_2O sia O_2) per evitare contaminazione dell'elettrolita con O_2 (che reagisce con l'anione PF^{6-} portando alla formazione di PF_5 e HF).

Caratterizzazione elettrochimica di celle litio-ione in scala di laboratorio

L'obiettivo della caratterizzazione elettrochimica è l'analisi e il confronto delle prestazioni delle celle complete litio-ione in termini di capacità, energia, potenza, cicli di vita ed efficienza coulombica. I test elettrochimici sono stati eseguiti a differenti regimi di corrente, compresi tra C/10 e 3C, ed in un intervallo di temperatura compreso tra 0°C e +50°C, generalmente 0 (± 2) °C, 30 (± 2) °C e 50 (± 2) °C.

In Figura 18 è illustrato un tipico profilo tensione/tempo e corrente/tempo, relativo ad un ciclo di carica-scarica, eseguito su una cella litio-ione in scala di laboratorio ad una profondità di scarica prossima al 100%. Il profilo può essere cosi schematizzato:

- *step 1*: carica galvanostatica a corrente costante (I) da tensione circuito aperto (OCV) sino a $V_{top\text{-}off}$;
- *step 2:* carica potenziostatica a tensione costante ($V_{top\text{-}off}$) sino ad un valore corrente pari a I/10;
- *step 3:* scarica galvanostatica a corrente costante (I) da $V_{top\text{-}off}$ sino a $V_{cut\text{-}down}$.

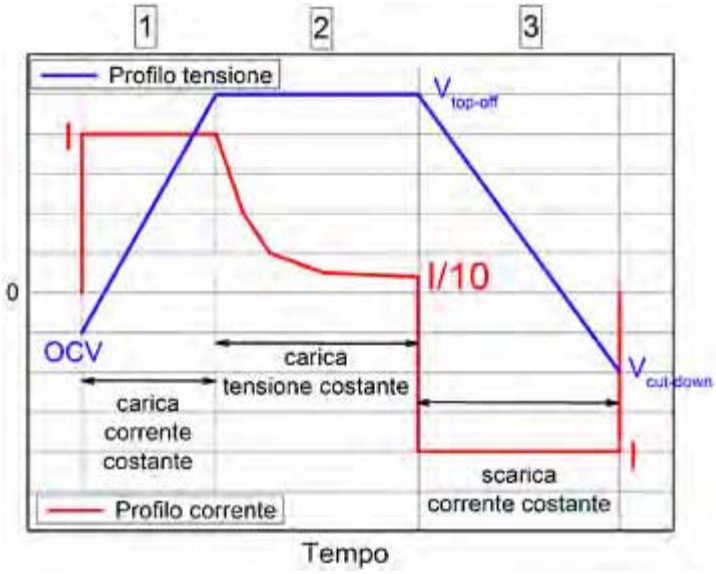


Figura 18. Profili tensione/tempo e corrente/tempo relativi ad un ciclo di carica/scarica

I valori di tensione $V_{top\text{-}off}$ e $V_{cut\text{-}down}$ dipendono, ovviamente, dalla natura e dal tipo di materiale attivo (catodico e anodico) contenuto negli elettrodi della cella.

Osservazione: nel caso di utilizzo di anodi a base di grafite o materiali carboniosi ed al fine di garantire un bilanciamento ottimale con il catodo, si rende necessario conoscere a priori la capacità irreversibile dei suddetti anodi. Se quest'ultima risulta superiore al 10% sarà necessario eseguire ciclazioni preliminari di tali anodi verso elettrodi di litio metallico (al fine di ridurne notevolmente la capacità irreversibile).

Sono stati sviluppati tre differenti protocolli, parte integrante della provedura per le prove elettrochimiche concordate dal Gruppo di Coordinamento con CNR e RSE, per la caratterizzazione elettrochimica delle celle litio-ione in scala di laboratorio:

- Protocollo A: ciclazioni a regime di corrente costante (1C)
- Protocollo B: ciclazioni a regime di corrente crescente in carica e costante in scarica
- Protocollo C: ciclazioni a regime di corrente costante in carica e crescente in scarica

Nella Figura 19 è illustrato il profilo corrente/tempo relativo al primo ciclo di carica-scarica (C/10) ed un ciclo successivo, eseguito a 1C, del protocollo A. La sequenza delle misure di impedenza è indicata in figura.

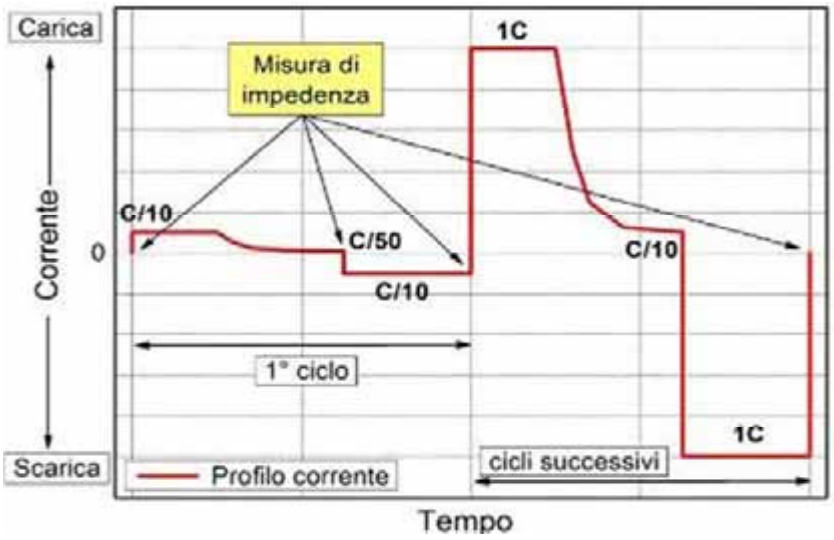


Figura 19. Profilo corrente/tempo relativo al protocollo A

Per ciascuno dei protocolli proposti, sono state poi indicate le modalità di presentazione dei risultati ottenuti in termini di profili carica/scarica, capacità, cicli di vita, efficienza coulombica, energia e potenza alle temperature operative pari a 0 °C, 30 °C e 50 °C.

Prove di celle complete litio-ione in scala di laboratorio

Le attività di prova in ENEA hanno riguardato la caratterizzazione elettrochimica di semicelle litio-ione realizzate, utilizzando i nastri catodici ed anodici sviluppati negli obiettivi A e B. I test elettrochimici (sulle semicelle) sono stati condotti mediante un ciclatore multiplo per batterie Maccor 4000. La Figura 20 mostra una buona ritenzione di capacità, specie a valori di corrente ≤ 1C (circa il 95% della capacità iniziale viene erogato dopo 80 cicli), con un'efficienza coulombica superiore al 98%.

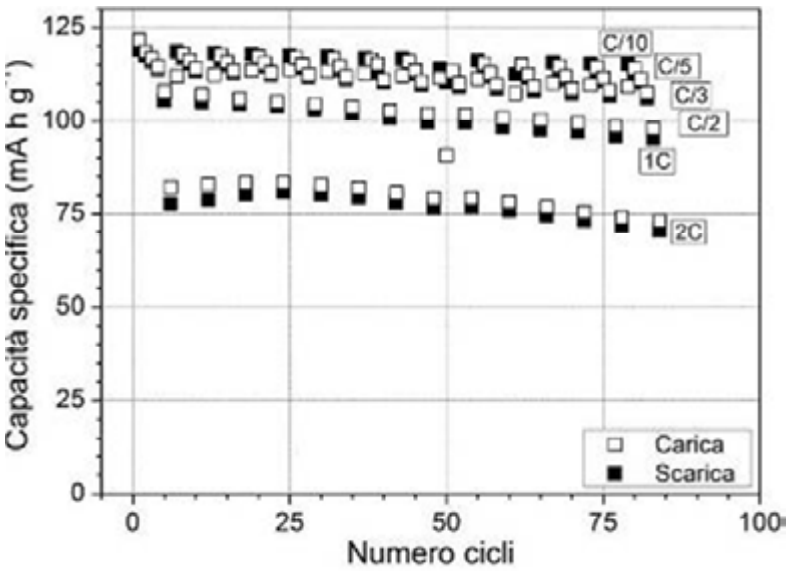


Figura 20. Evoluzione della capacità con il numero di cicli, a differenti valori di corrente, relativo ai nastri catodici $LiMn_2O_4$. T = 20 °C

Sono stati assemblate diverse batterie litio-ione bilanciando in capacità i catodi a base di $LiFePO_4$ commerciale con gli anodi a base di grafite . Le batterie sono state caratterizzate seguendo i tre protocolli a due diverse temperature di lavoro (30 e 50 °C). Tutte le batterie assemblate (vedi Tabella 9) avevano una capacità iniziale superiore a 1 mAh/cm^2 e hanno mostrato elevate energie e potenze iniziali ad elevate C-rate: 300 Wh/kg attivo batteria e 400 W/kg attivo batteria a C/1 a 30 °C.

Tabella 9. Celle complete assemblate da UniBo

Codice Batteria	Protocollo	Elettrodo	Materiale Composito		Materiale Attivo		Temperatura
			mg	mg cm^{-2}	mg	mg cm^{-2}	C
ENEA_SLPLFP_2	A	ANODO	2,86	4,47	2,72	4,25	30
		CATODO	6,12	9,56	5,34	8,34	
ENEA_SLPLFP_7	B	ANODO	3,14	4,91	2,98	4,66	
		CATODO	5,63	8,80	4,91	7,67	
ENEA_SLPLFP_13	C	ANODO	2,95	4,61	2,80	4,38	
		CATODO	6,60	10,31	5,76	9,00	
ENEA_SLPLFP_9	A	ANODO	2,48	3,88	2,36	3,69	50
		CATODO	5,27	8,23	4,60	7,19	
ENEA_SLPLFP_10	C	ANODO	3,33	5,20	3,16	4,94	
		CATODO	7,02	10,97	6,13	9,58	
ENEA_SLPLFP_11	B	ANODO	3,03	4,73	2,88	4,50	
		CATODO	6,05	9,45	5,24	8,19	

Sono di seguito riportati alcuni risultati relativi alla batteria ENEA_SLPLFP_2 testata a 30 °C secondo il Protocollo A, effettuando una ciclazione standard a 1C, per 100 cicli. La Tabella 10 e la Tabella 11 riassumono i valori di impedenza e di energia e potenza specifica più interessanti.

Tabella 10. Impedenza a 1 Hz della batteria ENEA_SLPLFP_2 ciclata a 30 °C

	C-rate	Energia Specifica	Potenza Specifica
		Wh kg^{-1}	W kg^{-1}
Ciclo 1	C/10	268	41
Ciclo 10	C/1	223	397
Ciclo 50		197	397
Ciclo 100		172	408

Tabella 11. Energia e potenza specifica della batteria ENEA_SLPLFP_2 valutata a diverso numeo di ciclo a 30 °C

	C-rate	Energia Specifica	Potenza Specifica
		Wh kg^{-1}	W kg^{-1}
Ciclo 1	C/10	268	41
Ciclo 10	C/1	223	397
Ciclo 50		197	397
Ciclo 100		172	408

Nel seguito si riportano inoltre alcuni risultati relativi alla batteria ENEA_SLPLFP_7 testata secondo il Protocollo B e della batteria ENEA_SLPLFP_13 testata secondo il protocollo C, a 30 °C. In Figura 21 sono mostrati i profili di potenziale delle due batterie durante la carica (Protocollo B) e durante la scarica (Protocollo C), mentre in Figura 22 sono riportati i valori delle energia specifiche vs le potenze specifiche delle batterie valutati dalla prima famiglia di cicli secondo il Protocollo B (batteria ENEA_SLPLFP_7) e secondo il Protocollo C (ENEA_SLPLFP_13).

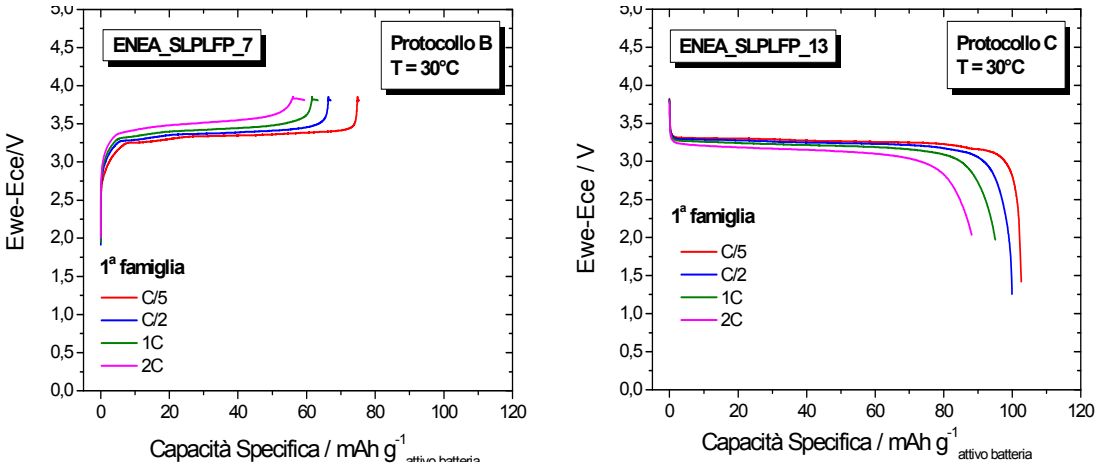


Figura 21. Profili di potenziale delle due batterie testate a 30°C secondo il Protocollo B e il Protocollo C

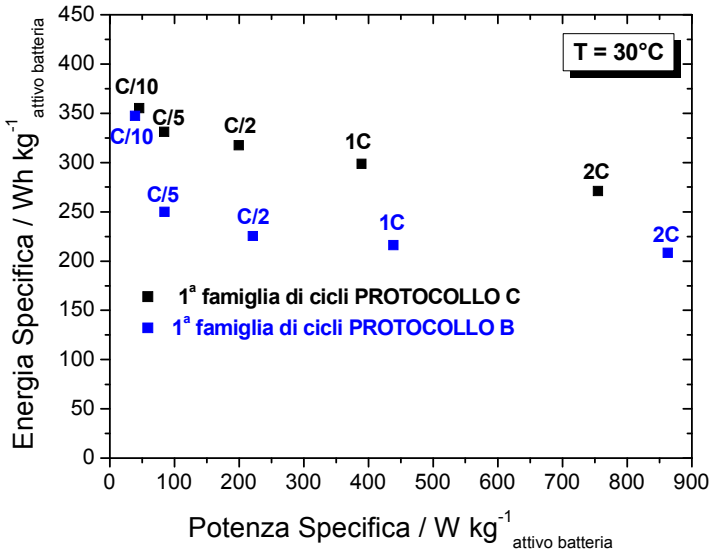


Figura 22. Energie specifiche vs potenze specifiche delle due batterie a 30 °C, valori valutati dalla 1ª famiglia di cicli condotti secondo i Protocolli B e C

Tutte le batterie assemblate avevano una capacità iniziale superiore a 1 mAh/cm^2 e hanno mostrato buone prestazioni iniziali ad elevate C-rate (valori elevati di Energia e Potenza iniziali). La batteria testata secondo il protocollo A a 30 °C ha avuto un calo di prestazioni del 20%; le altre batterie sottoposte al protocollo A a 50°C ed ai protocolli B e C, a 30 °C e a 50 °C, hanno mostrato cali più elevati.

Sono inoltre state effettuate ciclazioni galvanostatiche preliminari verso litio metallico come controelettrodo. Questa procedura ha l'obiettivo di ridurre la perdita di capacità al primo ciclo. Le ciclazioni preliminari sono state quindi eseguite in dry-box utilizzando celle di polipropilene a 3 elettrodi nelle quali litio metallico è stato impiegato come controelettrodo ed elettrodo di riferimento e utilizzando l'elettrodo di grafite come elettrodo di lavoro. La cella è stata montata utilizzando n. 2 separatori Glass Fiber GFD A e $LiPF_6$ 1M in EC:DMC 1:1 come elettrolita. Si sono quindi portati a termine 3 cicli a C/3 grafite vs. litio; la procedura è stata effettuata interamente in dry-box. La cella è stata poi aperta, il separatore a contatto con il litio rimosso e sostituito il controelettrodo di litio metallico con il catodo di $LiFePO_4$*V_2O_3. La Figura 23 mostra l' evoluzione della capacità con il numero di cicli.

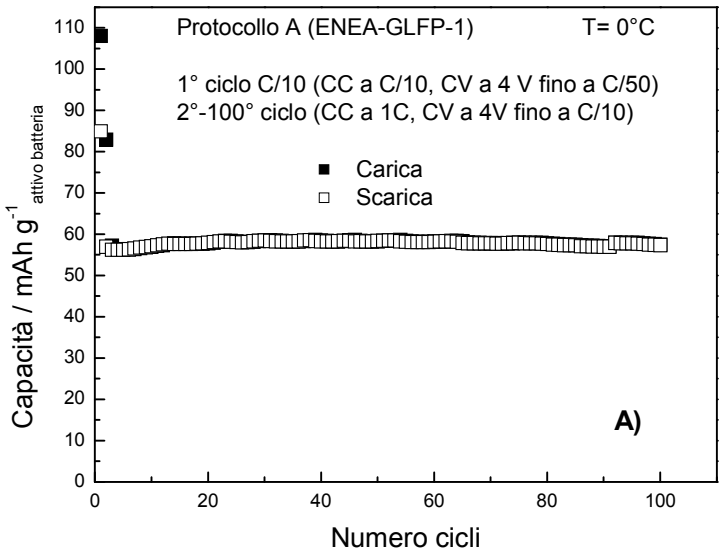


Figura 23. Evoluzione capacità specifica (carica e scarica) vs numero di cicli

Infine, è stato utilizzato un raccordo di tipo idraulico (in polipropilene) a "T" a tenuta, dotato di pistoni di acciaio che servono da portacorrente, e mantengono il pacchetto, costituito dalla sequenza anodo/separatore/catodo, ben compatto. Come elettrolita è stato usato una soluzione 1 M di $LiPF_6$ in etilene carbonato (EC) e dimetilcarbonato (DMC) con un rapporto 1:1 in peso. Il separatore usato è un foglio di lana di vetro (GFD A) di spessore 0,4 mm a secco. La Figura 24 presenta l'andamento della capacità in funzione del numero di cicli.

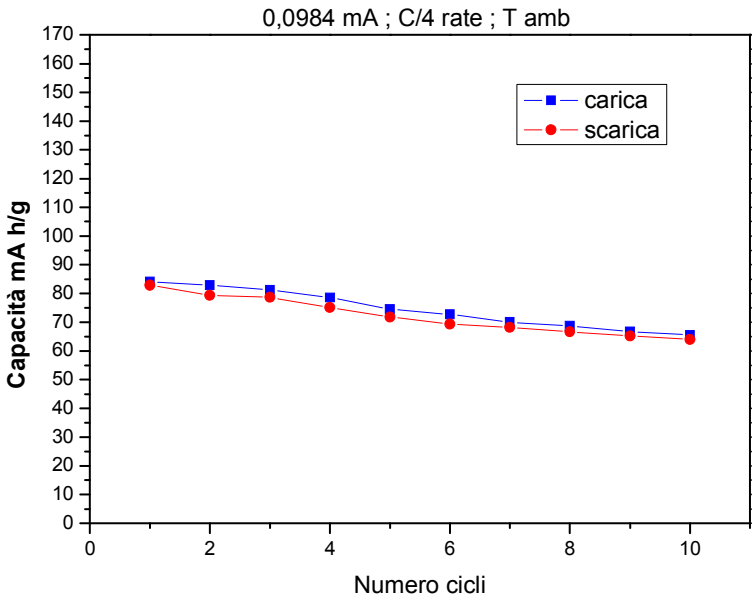


Figura 24. Capacità in funzione del numero di cicli

In conclusione, l'attività sperimentale ha portato alla selezione ed individuazione di materiali catodici ed anodici commerciali e di nuova sintesi con caratteristiche ottimizzate ed, in alcuno casi (come quello delle olivine), migliorate rispetto allo stato dell'arte che permetteranno lo scale up ed ulteriori sviluppi con nuovi materiali di celle al litio-ione con prestazioni e costi in grado di svolgere funzioni di alta energia specifica o, alternativamente, di alta potenza specifica.

Ricerca fondamentale sulle tecnologie di controllo e di interfaccia del sistema di accumulo in batterie al litio con la rete

Indagini preliminari su tecnologie di controllo ed interfaccia con la rete

L'attività prevede un'analisi delle caratteristiche di alcune potenziali utenze con una valutazione delle necessità della rete e dell'utenza, partendo da un aggiornamento sui sistemi di accumulo. È stata anche svolta l'analisi in ambiente simulato delle possibili configurazioni ottimali di rete elettrica in presenza di sistemi di poligenerazione distribuita e di accumulo elettrico. È stata anche effettuata un'indagine completa dell'interfaccia e delle logiche di gestione e controllo dei diversi componenti/sottosistemi di rete, nell'ottica di transizione verso una struttura di rete efficiente, flessibile, dinamica ed interattiva. Sono state anche svolte alcune considerazioni di carattere economico, inizialmente non programmate, per indirizzare le scelte dei sistemi di accumulo e delle relative interfacce.

Nel corso della prima fase delle attività, a partire da un inquadramento generale dei diversi tipi di accumulo di energia elettrica (elettrochimico, meccanico ed elettrico), è stata condotta un'analisi preliminare su metodologie, sistemi d'interfaccia e tecniche di controllo dei sistemi di accumulo, in una visione il più possibile integrata con le esigenze "di sistema", ovvero in relazione ai principali aspetti che nei prossimi anni caratterizzeranno il funzionamento delle reti di distribuzione e dei loro diversi componenti/sottosistemi, nell'ottica di transizione verso infrastrutture elettriche efficienti, flessibili, dinamiche ed interattive. Tra tali aspetti, in relazione al contesto generale della ricerca, è stato analizzato in particolare il possibile ruolo dei sistemi di accumulo per:

- favorire l'integrazione di generazione di energia da fonti rinnovabili contribuendo a risolvere alcune criticità nei servizi di regolazione della tensione e della frequenza della rete;
- contribuire ad elevare i livelli di qualità del servizio elettrico;
- partecipare ad una gestione ottimale, in termini tecnico-economici, di tutte le risorse di rete: fonti energetiche, unità di accumulo e carichi (implementando idonei programmi di demand-response).

Generalità sui sistemi di accumulo dell'energia elettrica

I sistemi di accumulo elettrico sono definibili come sistemi che immagazzinano l'energia elettrica convertendola in un'altra forma di energia (chimica, meccanica, elettrostatica, elettromagnetica). La prima e, per certi versi, più generale classificazione tra le tecnologie di accumulo elettrico è basata quindi sulle modalità di conversione

dell'energia. Gli accumulatori elettrochimici (batterie al piombo, litio, ecc) convertono l'energia elettrica in energia chimica. L'accumulo di tipo meccanico comprende i sistemi di accumulo ad aria compressa (CAES), i volani meccanici ad alta e bassa velocità, il pompaggio di acqua. L'accumulo elettrico è costituito dai condensatori, supercapacitori, SMES.

Una seconda classificazione è basata sulle modalità di lavoro e sulle prestazioni che caratterizzano le tecnologie. Si hanno quindi sistemi che lavorano "in energia", in grado di erogare potenze con autonomie di qualche ora, tipiche delle applicazioni di peak-shaving o in accoppiamento con generatori a fonti rinnovabili, e sistemi che lavorano "in potenza", in grado di erogare forti potenze per tempi brevi (da frazioni di secondo a qualche decina di secondi) con tempi di risposta molto rapidi, adatti ad applicazioni di Power Quality.

I sistemi di accumulo sono caratterizzati da una serie di grandezze che ne descrivono il comportamento in termini quantitativi e che sono necessarie per confrontare tecnologie di tipo diverso. La capacità, espressa in Ah, è la quantità di carica elettrica che può essere estratta dal sistema durante la scarica. Nella maggior parte degli accumulatori elettrochimici questo parametro non è univoco ma dipende dal valore della corrente di scarica e dalla temperatura. La capacità nominale, dunque, è la capacità corrispondente ad un particolare regime di scarica sufficientemente rappresentativo del regime di lavoro cui la batteria è destinata e ad una temperatura di riferimento (tipicamente 25 °C).

In Figura 25, per le stesse tipologie di sistemi di accumulo, sono riportati gli andamenti delle capacità al variare della temperatura ambiente, per un valore di corrente di scarica costante, uguale alla capacità nominale della batteria.

L'accumulo permette di disaccoppiare temporalmente la produzione e il consumo di energia elettrica, favorendo una maggiore penetrazione dei sistemi di generazione a fonte rinnovabile che, per la loro natura aleatoria, hanno curve di produzione non facilmente prevedibili e spesso non coincidenti con quelle del carico. In questa situazione, come conseguenza dell'incostanza della fonte energetica, è necessario che il sistema elettrico aumenti la riserva per far fronte a variazioni impreviste della potenza generata. I sistemi di accumulo possono quindi essere impiegati come riserva rapida e contribuire alla regolazione della frequenza di rete in presenza di generatori caratterizzati da una rapida fluttuazione della potenza, in particolare generatori eolici. In sistemi isolati o in isola virtuale l'accumulo è indispensabile per garantire la continuità della fornitura nei periodi di mancanza di produzione da parte dei generatori (ad esempio di notte nel caso dei generatori fotovoltaici).

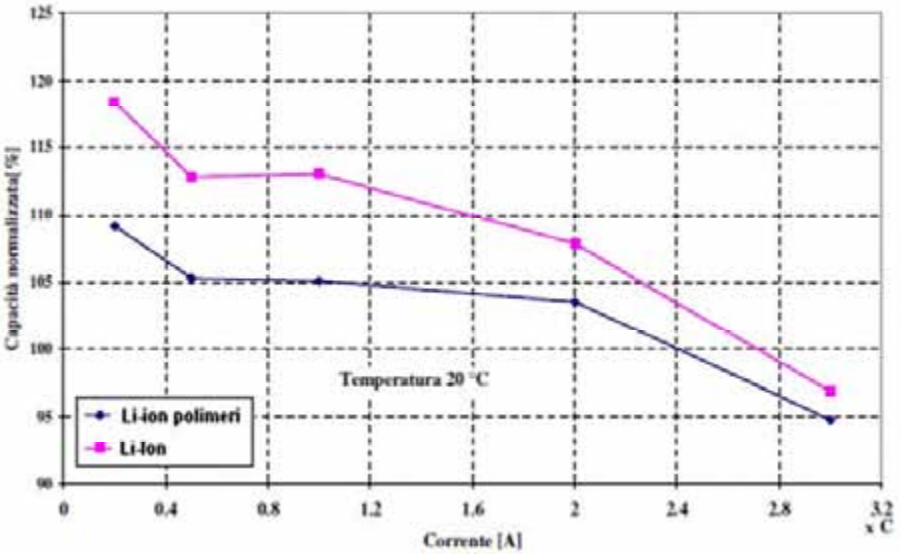


Figura 25. Capacità (normalizzata in funzione della capacità nominale) al variare del regime di scarica

I sistemi di accumulo opportunamente programmati possono permettere di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse energetiche, con funzioni quali **il load-levelling o il peak-shaving**. Il termine **load-levelling** si riferisce alla disomogenea distribuzione del carico su una rete elettrica nelle varie ore del giorno e, da altri punti di vista, anche nei vari giorni della settimana e nelle varie stagioni ed è un problema di pertinenza dell'utility che fornisce l'energia elettrica o che gestisce la rete elettrica, che deve necessariamente dimensionare la rete e i generatori sul picco di potenza. L'utilizzo di sistemi di accumulo di energia con funzioni di load-levelling consente di migliorare lo sfruttamento della generazione di potenza esistente e può permettere in certi casi anche il differimento degli investimenti per il potenziamento della rete elettrica fornendo localmente al carico la quota di potenza e di energia che la rete elettrica non potrebbe fornire.

Con la dizione **peak-shaving** si intende invece la questione, vista questa volta con gli occhi dell'utente, della disuniformità della richiesta di potenza dalla rete elettrica. L'utilizzo di un sistema di accumulo per effettuare il peak-shaving permette all'utente di non dimensionare il suo impianto sul picco di potenza e di stipulare con l'ente fornitore dell'energia un contratto con una potenza massima inferiore, per lui economicamente vantaggioso. Il sistema di accumulo ha il compito di fornire l'integrazione alla potenza richiesta dai carichi al di sopra del livello massimo stabilito dagli accordi con l'ente fornitore dell'energia elettrica. Inoltre l'utente può sfruttare il sistema di peak-shaving per comprare e immagazzinare energia nelle ore in cui costa di meno e rivenderla nelle ore a tariffazione più alta.

Sistemi di accumulo con specifiche caratteristiche integrati con opportuni convertitori elettronici (i cosiddetti filtri attivi o APQC – Active Power Quality Conditioner) possono essere impiegati con funzione di Power Quality, per proteggere il carico da perturbazioni che possono interessare la rete di alimentazione (buchi di tensione, microinterruzioni, disturbi armonici) e di proteggere al tempo stesso la rete da disturbi dovuti a rapide variazioni della potenza richiesta dal carico o alla presenza di carichi squilibrati. Le richieste di un'alimentazione elettrica di alta qualità sono aumentate sensibilmente negli ultimi anni con il diffondersi dell'automazione nei settori industriali e del terziario, dove le microinterruzioni possono comportare rilevanti perdite di produzione o una diminuzione della qualità dei prodotti o dei servizi offerti In tali applicazioni il sistema di accumulo è in stand-by per gran parte del tempo e lavora a piena potenza per un tempo che va da qualche frazione di secondo a qualche secondo, con tempi d'intervento che possono essere anche dell'ordine della frazione di secondo. È inoltre importante che il sistema abbia un'elevata potenza specifica, cui corrispondono ingombri ridotti e una vita attesa (in cicli) molto elevata. I supercapacitori e i volani meccanici ad alta velocità, con potenze specifiche dell'ordine delle migliaia di W/kg e una vita attesa di oltre 500000 cicli, sono i sistemi di accumulo che meglio corrispondono a queste specifiche.

La Tabella 12, sviluppata dal DOE (US *Department of Energy*), elenca le applicazioni più interessanti dei sistemi di accumulo al sistema elettrico, suddivise nei tre settori di riferimento. Per ciascuna applicazione sono riportate la potenza e l'autonomia richiesta al sistema di accumulo, le modalità di lavoro in cui si trova ad operare e il livello di tensione AC in cui sarebbe installato. La classificazione non è rigida e non esclude che uno stesso sistema di accumulo non possa essere utilizzato contemporaneamente in diverse applicazioni.

Tabella 12. Applicazioni più interessanti dei sistemi di accumulo nel sistema elettrico (Fonte DOE)

	Applicazione	*Potenza richiesta [MW]*	*Autonomia del sistema [min]*	*Modalità operative*	*Livello di tensione AC*
Generazione	riserva rapida	10 - 100	10-100	pochi interventi l'anno	MT - AT
	riserva rapida per regolazione di frequenza	10 - 100	< 10	continui cicli di carica/scarica non profondi	MT - AT
	load levelling	1 - 100	100-1000	cicli di carica e scarica giornalieri	MT - AT
T & D	regolazione di tensione	1 - 10	10-100	cicli di carica e scarica giornalieri	MT - AT
	T & D facility deferral	0.1 - 10	100	cicli di carica e scarica giornalieri	MT - AT
servizi ancillari	peak shaving	0.01 - 10	10-100	cicli di carica e scarica giornalieri	BT - MT
	accoppiamento alle fonti rinnovabili	0.01 - 100	0.001-1000	variabile a seconda dell'applicazione	variabile
	power quality	0.01 - 10	0.001-1	il sistema eroga forti potenze per tempi brevi	BT - MT

Tra i vari sistemi di accumulo, ci sono diverse coppie elettrochimiche in grado di svolgere diverse funzioni nelle reti elettriche, come evidenziato in Tabella 13.

Tabella 13. Confronto tra le principali coppie elettrochimiche in relazione alle loro più importanti caratteristiche

Categoria	Coppia elettrochimica	Costruttori Sviluppatori	Stadio di sviluppo	Energia specifica		Efficienza conversione	Apparato di gestione	Rischi sicurezza	Costo materie prime
				Wh/kg	Wh/l				
Temperatura Ambiente Elettrolita acquoso	Piombo acido Pb	a livello mondiale	industriale consolidato	30	80	75%	normalmente non usato	accettati	medio basso
	Nichel-Cadmio Ni-Cd	a livello mondiale	industriale consolidato	50	60	60%	normalmente non usato	accettati	medio
	Nichel-Idr.Met Ni-MH	a livello mondiale	industriale consolidato	60	65	70%	controllo della carica	accettati	alto
	Nichel-Zinco Ni-Zn	a livello pre-indust.	limitato	70	70	60%	controllo della carica	accettati	medio
Litio	Li-Ioni	a livello mondiale	industriale su taglie piccole	150	200	90%	complesso	(instabilità termica)	molto alto
	Li-Ion Polimeri	a livello mondiale	industriale su taglie piccole	130	180	90%	complesso	limitati	molto alto
	Li-Metal	a livello preindustr.	sviluppo	180	150	90%	molto complesso	presenti	molto alto
	Li-Metal	Canada	avviata ma interrotta	120	120	88%	molto complesso	presenti	molto alto
Celle alta temperatura	Sodio-Zolfo Na-S	Giappone	industriale limitato	120	140	85%	complesso	presenti	medio
	Sodio-Clor.Met $Na-NiCl_2$	Svizzera	industriale limitato	120	120	85%	complesso	limitati	medio

L'interfaccia sistemi di accumulo-rete

I dispositivi di conversione della potenza (PCS) hanno un'importanza fondamentale nei sistemi di accumulo dell'energia, sia nelle applicazioni *grid-connected* che *stand-alone*; essi hanno la funzione di connettere i dispositivi di accumulo alla rete elettrica ed al carico. Se il sistema presenta anche sorgenti di energia rinnovabile, i PCS hanno anche la funzione di connettere tali sorgenti alla rete elettrica.

Idealmente, un dispositivo di conversione della potenza dovrebbe essere in grado di interfacciare diverse tipologie di accumulo (batterie, SMES, volani, supercapacitori, ecc), sia nel funzionamento *grid-connected* che *stand-alone*. Attualmente, le proposte di molti costruttori si stanno orientando in tal senso.

Dispositivi di conversione della potenza utilizzati per i sistemi di accumulo

In un sistema di accumulo dell'energia è possibile individuare quattro componenti principali: la sorgente di accumulo, il PCS, la rete elettrica ed il carico da alimentare. Il PCS può a sua volta essere scomposto in quattro componenti fondamentali, che sono il circuito di potenza, l'interfaccia lato continua e lato alternata ed il sistema di controllo. L'interfaccia lato continua ed alternata ed i componenti magnetici (trasformatori, filtri, induttori nel DC-*link*, ecc) prendono il nome di "Sistema di bilanciamento" (BOS). Il PCS è stato inoltre scomposto nelle sue componenti fondamentali.

Lo stadio di potenza

Lo stadio di potenza è il cuore del PCS ed è costituito dai dispositivi di conversione statici (SCR, IGBT, GTO) la cui funzione è quella di convertire la potenza da continua ad alternata (funzionamento da inverter) o da alternata a continua (funzionamento da raddrizzatore). Nel primo caso il sistema di accumulo cede energia alla rete, nel secondo caso avviene il processo di ricarica della batteria. Per questo motivo i PCS utilizzati per l'interfacciamento dei sistemi di accumulo sono sempre bidirezionali.

La complessità dello stadio di potenza dipende dai requisiti di progetto del sistema (i quali a loro volta dipendono dall'applicazione per la quale il PCS è stato progettato). Per le potenze più elevate si devono necessariamente utilizzare dispositivi di commutazione più lenti quali SCR e GTO. Per basse potenze è possibile utilizzare dispositivi più veloci, quali IGBT. Ad esempio, in molte applicazioni industriali gli IGBT si utilizzano fino a potenze di 750 kW, mentre, per livelli di potenze più elevati si utilizzano i GTO.

Il sistema di controllo

Il sistema di controllo ha la funzione di confrontare le grandezze in uscita da un PCS con una grandezza di riferimento e minimizzare il segnale errore. Il sistema di controllo può essere analogico, digitale o una combinazione dei due. In genere è costituito da tre anelli di controllo: un anello interno, uno esterno ed un anello di controllo funzionale (*functional control loop*). Tipicamente l'anello interno controlla il valore della corrente

ceduta alla rete o al dispositivo di accumulo (a seconda del verso del flusso di potenza) confrontando il valore della corrente di riferimento con il segnale campionato della corrente sul carico. L'anello esterno ha la funzione di controllare le altre grandezze sul carico (tensione, potenza attiva, reattiva, frequenza, ecc.), confrontando i valori di riferimento con i segnali campionati sul carico. Dal confronto tra i valori in ingresso viene derivato il valore della corrente di riferimento. Infine, l'anello di controllo funzionale regola le relazioni tra il PCS e gli altri componenti del sistema, ad esempio determinando gli intervalli di carica e scarica della batteria. Le principali funzioni del sistema di controllo sono le seguenti:

- inviare i segnali di controllo ai dispositivi di commutazione a semiconduttori;
- generare la forma d'onda desiderata;
- controllare la corrente fornita al carico attraverso l'anello di controllo interno;
- gestire le altre grandezze del carico attraverso l'anello di controllo esterno;
- controllare il funzionamento del PCS nel suo complesso (intervalli di carica e scarica) attraverso l'anello di controllo funzionale.

Le interfacce

L'interfaccia lato alternata è costituita da sensori di corrente e di tensione, induttori, dispositivi di interruzione e fusibili, scaricatori, un sezionatore per isolare il sistema ed un trasformatore.

I sensori di corrente e di tensione servono per misurare i rispettivi valori della grandezze sul lato c.a. del PCS, gli induttori per smorzare le variazioni rapide di corrente, i dispositivi di interruzione ed i fusibili sono usati per la protezione dalle sovracorrenti e nel caso in cui il PCS necessita di essere disconnesso immediatamente dal sistema elettrico, gli scaricatori hanno la funzione di ridurre le sovratensioni (ad esempio dovute a fulminazioni); infine il sezionatore ha la funzione di isolare il PCS dalla rete elettrica.

Il trasformatore è spesso necessario per innalzare il livello di tensione in uscita al PCS ai valori richiesti dal sistema elettrico. Infine il banco di condensatori ha la funzione di filtro.

Esso comprende sensori di corrente e di tensione, fusibili, un sezionatore, uno scaricatore, un filtro elettromagnetico (EMI) ed un filtro addizionale.

Il fusibile ha la funzione di disconnettere il circuito lato continua in presenza di sovracorrenti. I sensori di corrente e di tensione servono, anche in questo caso, per misurare i rispettivi valori della grandezze sul lato c.c. del PCS, il sezionatore ha la funzione di disconnettere, sul lato DC, il PCS dalla rete elettrica, infine lo scaricatore ha la funzione di proteggere i dispositivi statici di commutazione da sovratensioni che potrebbero nascere lato continua.

Configurazioni dei sistemi di conversione utilizzati per i sistemi di accumulo

Nel seguito è riportata una classificazione dei dispositivi di conversione utilizzati per l'interconnessione di sistemi di accumulo.

In relazione alle modalità di connessione alla rete, i sistemi di conversione possono essere distinti in:

- Grid-connected parallel configuration;
- Grid-connected series configuration;
- Grid-independent parallel hybrid configuration;
- Grid-independent series hybrid configuration.

I primi due si riferiscono a sistemi grid-connected, gli altri due a sistemi stand-alone.

Sistemi grid-connected – Configurazione parallelo

In questo caso, il sistema di accumulo viene collegato in parallelo al carico interponendo il dispositivo di conversione, come si nota dallo schema riportato in Figura 26. Il sistema d'interfacciamento è costituito da un inverter DC/AC, un convertitore opzionale (tratteggiato in figura) DC/DC o AC/DC, un sistema di controllo ed un trasformatore. Il convertitore opzionale DC/DC o AC/DC viene spesso utilizzato sia per controllare i processi di carica/scarica sia per ottimizzare le condizioni di funzionamento dell'inverter. Il convertitore opzionale DC/DC è tipico dei sistemi di accumulo a batteria e degli SMES (in alcuni casi le batterie possono essere connesse direttamente al bus in c.c. senza l'interposizione del convertitore DC/DC).

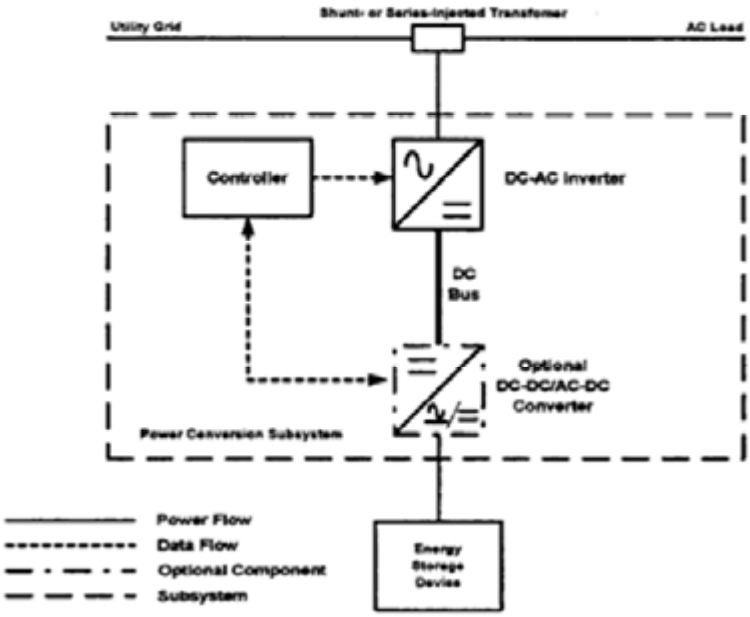


Figura 26. Schema di connessione in parallelo per un sistema di tipo grid-connected

Il convertitore AC/DC si utilizza per l'interfacciamento alla rete di volani. Il convertitore DC/AC (inverter bidirezionale) ha due distinte modalità di funzionamento, da raddrizzatore o da inverter. Nel funzionamento da raddrizzatore il convertitore controlla la tensione e la corrente di carica, accendendo e spegnendo gli interruttori statici. I valori della tensione e della corrente sono regolati in modo da garantire la ricarica del sistema di accumulo nei tempi prefissati. Nella modalità inverter, il convertitore ricostruisce la forma d'onda della tensione alternata di rete. Il sistema di accumulo ed il PCS sono connessi alla rete attraverso un trasformatore, che può essere del tipo *shunt* o in serie. Le due diverse modalità di connessione del trasformatore alla rete sono rappresentate in Figura 27.

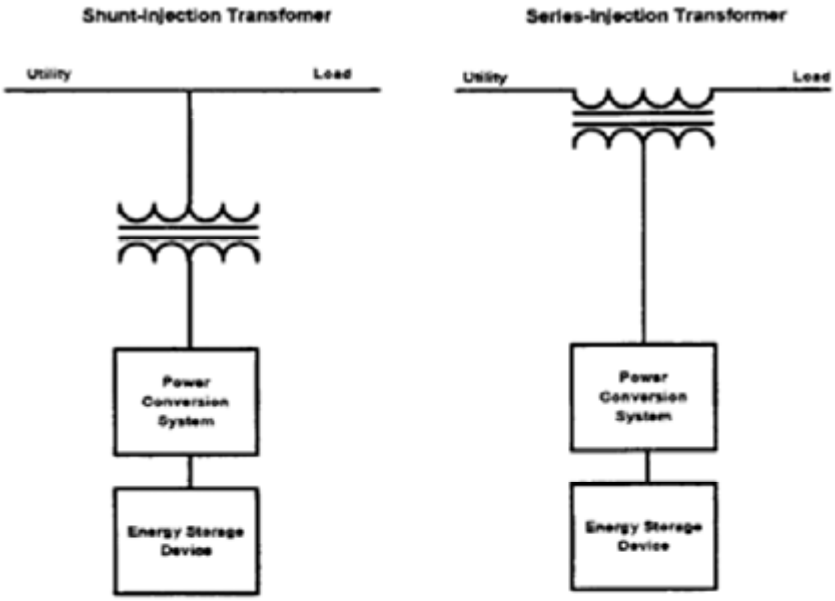


Figura 27. Esempi di connessione shunt/serie del trasformatore di interfacciamento tra dispositivi di accumulo e sistema elettrico

Nel caso di connessione *shunt* il sistema è in grado di scambiare con la rete sia potenza attiva che reattiva variando l'ampiezza e la fase della tensione in uscita dall'inverter rispetto alla tensione di rete. Il risultato è un'iniezione di corrente sul sistema elettrico che può essere utilizzata, ad esempio, in applicazioni di regolazione della tensione. In presenza di un guasto sul sistema elettrico, il PCS ed il carico possono essere disconnessi dalla rete per l'intervento di un dispositivo d'interruzione. Nel frattempo il sistema di accumulo continua ad alimentare il carico attraverso il PCS. Nel momento in cui il valore della tensione di rete si ristabilisce, il dispositivo di interruzione riattiva la connessione tra la rete elettrica ed il carico ed il PCS attiva la funzione di ricarica della batteria.

Nel caso di un sistema *grid-connected* con connessione serie del trasformatore, il trasferimento di potenza attiva e reattiva dal sistema di accumulo al carico o viceversa avviene in modo del tutto indipendente: il flusso di potenza attiva è cioè del tutto svincolato dal flusso di potenza reattiva. Infatti, in questo caso il PCS inietta delle tensioni in serie e sincronizzate con la tensione di rete. L'ampiezza e la fase della tensione prodotta dal PCS possono essere variate, permettendo così uno scambio di potenza attiva e reattiva con il sistema elettrico. La potenza reattiva scambiata viene generata internamente al PCS senza la necessità di utilizzare componenti induttivi o capacitivi. Lo scambio di potenza attiva può essere realizzato se è presente una sorgente di accumulo. Ad esempio, se il sistema è progettato per proteggere dai buchi di tensione, in presenza di un tale evento il PCS inietta sulla rete un valore di tensione tale da compensare il buco di tensione. Non appena la tensione viene ristabilita, il dispositivo di conversione commuta il sistema di accumulo nella modalità di ricarica.

Sistemi grid-connected – Configurazione serie

I sistemi *grid-connected* in configurazione serie vengono anche indicati con il termine "sistemi di conversione on-line" o "sistemi a doppia conversione" (*double-conversion systems*). La prima terminologia indica che tali sistemi sono tenuti costantemente on line sul carico da alimentare, la seconda sta ad indicare la caratteristica di tali sistemi di convertire la potenza due volte: una volta da alternata a continua (AC/DC), una seconda volta da continua ad alternata (DC/AC). La Figura 28 mostra uno schema di *configurazione serie*. Come si può notare esso è costituito da un raddrizzatore, un inverter, un convertitore opzionale DC/DC o AC/DC, un sistema di controllo ed un interruttore di bypass. Inoltre può essere presente un filtro ed uno scaricatore lato rete.

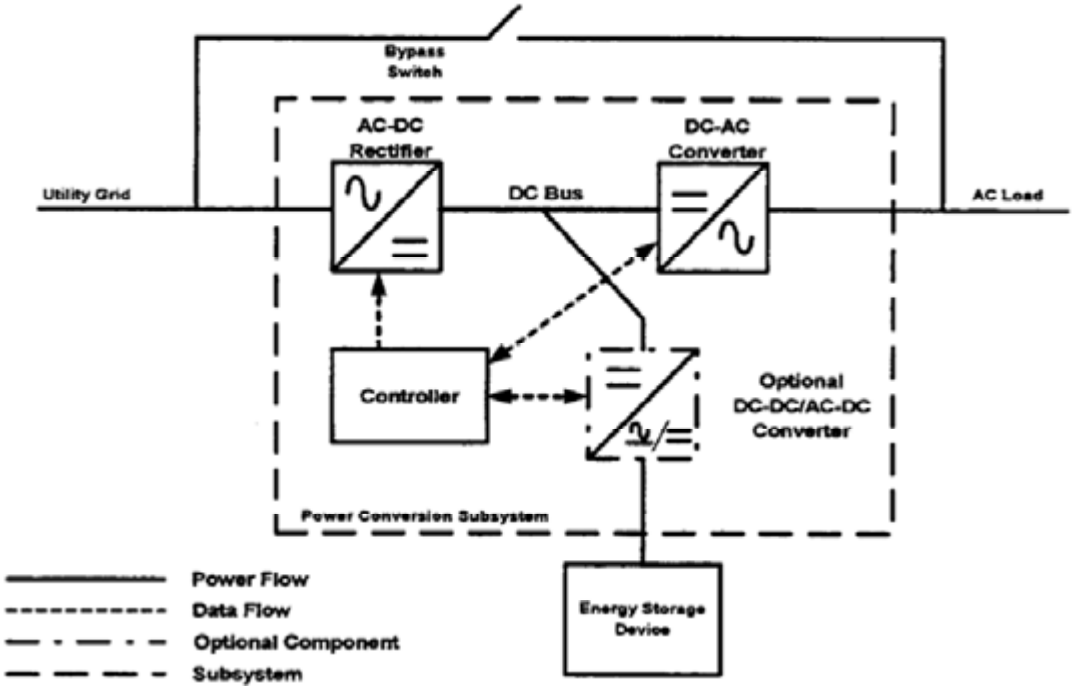


Figura 28. Schema di connessione serie per un sistema di tipo grid-connected

Il raddrizzatore AC/DC converte la corrente alternata della rete elettrica in continua (DC bus), l'inverter DC/AC trasforma la corrente continua del DC bus nella corrente alternata che confluisce sul carico. Il convertitore opzionale DC/DC o AC/DC viene spesso utilizzato sia per controllare i processi di carica scarica sia per ottimizzare le condizioni di funzionamento dell'inverter. Il convertitore opzionale AC/DC è tipico dei sistemi di accumulo quali volani. Il sistema di controllo ha la funzione di regolare il flusso di energia dalla rete al carico, dalla rete al sistema di accumulo e dal sistema di accumulo al carico. L'interruttore di *bypass* serve per garantire il trasferimento della potenza al carico in caso di guasto del PCS o per isolare il PCS per operazioni di manutenzione. Il filtro opzionale lato rete ha la funzione di bloccare le correnti armoniche prodotte dal PCS che potrebbero riversarsi in rete.

Sistemi stand-alone – Configurazione ibrido parallelo/serie

Un sistema ibrido in genere è costituito da diverse sorgenti di energia, in modo tale che il carico possa essere alimentato, indifferentemente, da una qualsiasi o da tutte le sorgenti di generazione presenti. Nel ragionamento che segue considereremo un sistema costituito da una sorgente di accumulo, un generatore elettrico (*engine generator*), una sorgente di energia rinnovabile (fotovoltaica o eolica) ed il carico. La distinzione tra configurazione parallelo/serie in un sistema ibrido dipende essenzialmente dalle modalità di connessione del generatore elettrico al sistema. Infatti, nella configurazione parallelo, il generatore è connesso direttamente al carico in corrente

alternata. Nella configurazione serie , invece, il generatore viene collegato al bus in corrente continua attraverso un raddrizzatore (AC/DC *converter*).

In termini di prestazioni, la configurazione parallelo per sistemi *stand-alone* necessita di un inverter dimensionato per l'effettiva potenza trasmessa dal sistema di accumulo. Al contrario, nella configurazione serie il raddrizzatore e l'invertitore sono attraversati anche dalla potenza prodotta dal generatore, per cui dovranno essere sovradimensionati rispetto alla configurazione parallelo.

Schema di connessione parallelo per un sistema isolato dalla rete

Come si nota dallo schema riportato in Figura 47, il sistema è costituito da un inverter DC/AC, un convertitore opzionale DC/DC o AC/DC, un sistema di controllo, una sorgente di generazione, un carico in c.a., un dispositivo di accumulo dell'energia ed una sorgente di energia rinnovabile. Una siffatta configurazione ha tre diverse modalità di funzionamento:

- stand-alone,
- ricarica della batteria,
- funzionamento parallelo.

Nella modalità di funzionamento stand-alone il generatore elettrico non eroga energia al carico in c.a. e quest'ultimo viene alimentato direttamente dalla sorgente di energia rinnovabile e dal sistema di accumulo attraverso il PCS. La sorgente variabile di energia eroga sul carico tutta la potenza variabile prodotta, istante per istante, mentre il sistema di accumulo fornisce la parte di energia residua, richiesta dal carico. In questa modalità di funzionamento il convertitore DC/AC funziona da inverter, convertendo la potenza da continua ad alternata.
Nella modalità di funzionamento "ricarica della batteria" il generatore elettrico alimenta il carico in c.a. mentre l'eccesso di potenza prodotto dallo stesso viene utilizzato per la ricarica del sistema di accumulo, attraverso il PCS. Pertanto, in questa modalità di funzionamento il convertitore DC/AC funziona da raddrizzatore, convertendo la potenza da alternata a continua per ricaricare la batteria. Una parte dell'energia richiesta per la ricarica del sistema di accumulo può essere fornita direttamente dalla sorgente di energia rinnovabile.

Nella modalità di funzionamento parallelo la richiesta di energia del carico viene soddisfatta contemporaneamente da tutte le sorgenti di energia presenti (generatore elettrico, sorgente di energia rinnovabile e sistema di accumulo). In particolare il generatore elettrico viene fatto funzionare alla sua potenza nominale mentre il sistema di accumulo e la sorgente variabile erogano la potenza supplementare al carico. In questa modalità di funzionamento il convertitore DC/AC funziona da inverter, convertendo la potenza da continua ad alternata.

E' importante notare che per la ricarica della batteria è possibile utilizzare sia lo stesso inverter bidirezionale (DC/AC inverter) come precedentemente ipotizzato, sia un dispositivo di controllo della carica opzionale (tipicamente un convertitore DC/DC che ha la funzione di controllare la velocità di ricarica del pacco batterie).

Schema di connessione serie per un sistema isolato dalla rete

Come si nota dallo schema riportato in Figura 29, il sistema è costituito da un inverter DC/AC, un convertitore opzionale DC/DC o AC/DC, un sistema di controllo, una sorgente di generazione, un convertitore AC/DC per l'interfacciamento del generatore elettrico al bus in c.c., un carico in c.a., un dispositivo di accumulo dell'energia ed una sorgente di energia rinnovabile.

In questo schema il carico in c.a. viene alimentato prioritariamente dalla batteria e dalla sorgente di energia rinnovabile. Il generatore normalmente è disconnesso dalla rete. In questa fase, se la sorgente di energia rinnovabile eroga una quantità di energia sufficiente, essa provvede sia ad erogare potenza al carico, sia alla ricarica della batteria, attraverso il convertitore DC/DC o AC/DC opzionale. Nel momento in cui lo stato di carica della batteria scende al di sotto di un livello prefissato, il generatore elettrico viene avviato fornendo rapidamente l'energia richiesta per la ricarica della batteria, attraverso un raddrizzatore (convertitore AC/DC). In termini di prestazioni, la configurazione parallelo per sistemi ibridi stand-alone presenta le seguenti caratteristiche, rispetto alla configurazione serie:

- è caratterizzata da un'elettronica di potenza più complessa rispetto alla configurazione serie;
- l'attivazione del generatore può facilmente provocare disturbi sul carico (nella configurazione serie i disturbi trasmessi sul carico sono nulli, dato che il generatore viene connesso sul bus DC);
- necessita di un inverter bidirezionale, al contrario della configurazione serie in cui è possibile utilizzare inverter unidirezionali, dal momento che il sistema di accumulo viene caricato direttamente dal generatore collegato sul bus DC a monte dell'inverter;
- la configurazione parallelo presenta una maggiore affidabilità rispetto alla configurazione serie, dato che un guasto dell'inverter non determina, necessariamente, un'interruzione del trasferimento di energia sul carico (dato che il generatore può continuare ad alimentare il carico in corrente alternata);

- la configurazione parallelo necessita di un sistema di supervisione e controllo più complesso rispetto alla configurazione serie.

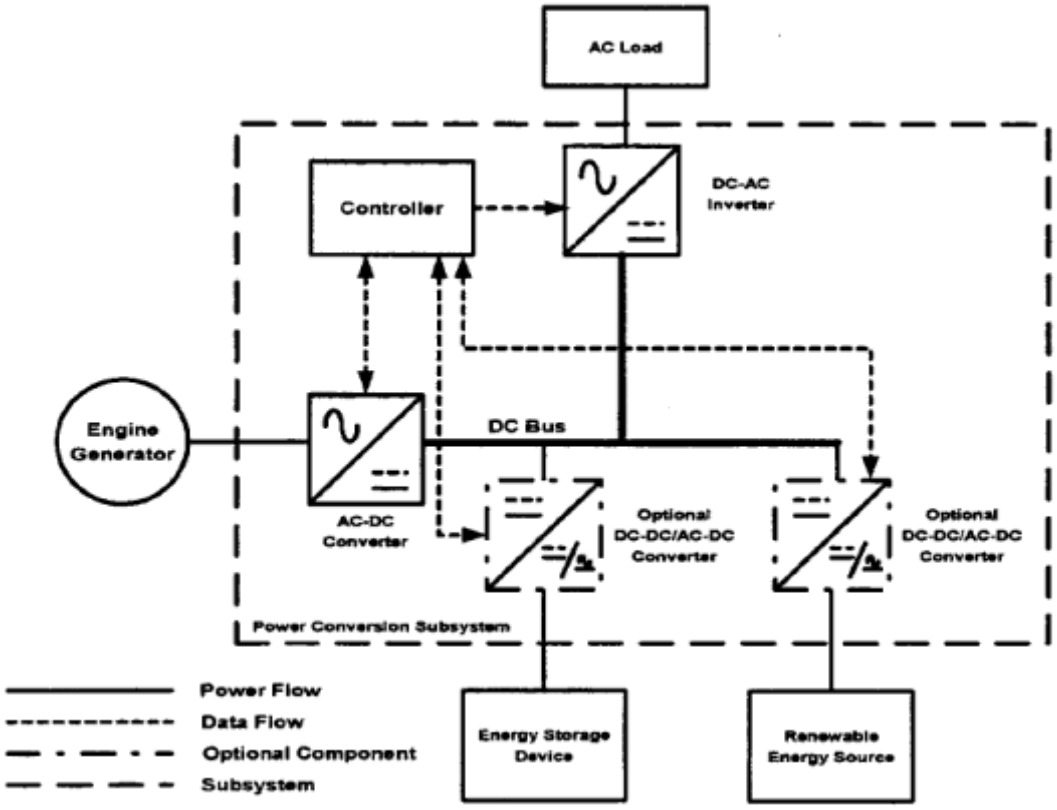


Figura 29. Schema di connessione serie per un sistema isolato dalla rete

Stato dell'arte dei sistemi di controllo

Gli attuali sistemi di controllo degli inverter sono suddivisibili fondamentalmente in due tipologie, quelli idonei al funzionamento in isola su una rete passiva e quelli idonei al funzionamento su una rete attiva. Difficilmente si incontrano soluzioni che consentano, non tanto la compresenza dei due sistemi di controllo, quanto il passaggio automatico da una configurazione all'altra.

Dal punto di vista della implementazione delle logiche di controllo gli inverter possono essere suddivisi in inverter a controllo di corrente o a controllo di tensione.

Inverter a controllo di corrente

I sistemi con controllo in corrente definiscono le sequenze di accensione delle valvole che costituiscono il ponte, con l'obiettivo di imporre una determinata corrente, in modulo e fase, rispetto alla tensione della rete. Questo tipo di sistema di controllo rende i convertitori particolarmente robusti in relazione ai disturbi della rete, guasti o richiusure erronee; infatti essi riescono ad erogare la corrente desiderata, entro certi limiti, a prescindere dal valore della tensione di rete.

Tuttavia, per loro concezione, tali sistemi funzionano correttamente solo in presenza di una sorgente di tensione esterna, cioè la rete, e si arrestano, non appena tale riferimento viene perduto. Nell'eventualità di una separazione dell'inverter dalla rete, anche nell'ipotesi che il valore del carico che rimane connesso all'inverter fosse molto prossimo a quello imposto dal sistema di controllo, l'inverter andrebbe ad inseguire se stesso raggiungendo in tempi molto rapidi valori di frequenza inaccettabili. Se poi il carico residuo si discostasse anche di poco dal valore imposto, la tensione sulla rete (prodotto della corrente immessa per l'ammettenza equivalente) sarebbe immediatamente inaccettabile. Tale sistema è comunque impiegabile in tutti gli impianti dedicati alla rete che non richiedano l'alimentazione di una rete isolata o di carichi privilegiati.

Oltre al notevole pregio di presentare una robustezza intrinseca a perturbazioni di rete (entro certi limiti) consente anche la realizzazione di sistemi con ridotte esigenze in termini di filtraggio, in quanto il controllo può essere affinato sulla forma d'onda della corrente. Inoltre l'impedenza di connessione tra inverter e rete può essere ridotta al minimo, consentendo la realizzazione di sistemi molto economici.

Quando questi inverter interfacciano impianti di produzione, il valore della corrente (in modulo e fase) viene definito in modo da imporre i valori di potenza attiva e reattiva desiderati. Spesso si ricorre ad un funzionamento con fattore di potenza unitario, ovvero corrente in fase con la tensione.

Inverter a controllo di tensione

Gli inverter con controllo di tensione, realizzabili con diverse strategie di definizione della sequenza di impulso delle valvole, tra cui PWM, possono essere ricondotti ad uno schema equivalente alla frequenza della fondamentale. Tale controllo si presta sia al funzionamento in parallelo ad una rete attiva che su una rete passiva, agendo opportunamente su modulo e fase della tensione fondamentale generata dal ponte di conversione.

Le due metodologie sono dette normalmente controllo PQ e controllo a V costante. Nel primo caso il modulo e la fase della tensione prodotta dall'inverter viene definito in modo da dar luogo ad un flusso di potenza attiva e reattiva che risulta definito dalle equazioni del doppio bipolo costituito dall'impedenza equivalente dei filtri e del trasformatore (se presente). Nel secondo caso la forza elettromotrice E, prodotta dall'inverter, viene mantenuta costante in modulo e con fase fissa rispetto ad un riferimento assoluto alla frequenza nominale, ovvero viene imposta una frequenza costante.

Ne risulta che, per poter passare da una condizione all'altra, è necessario che venga identificato il cambiamento di configurazione e venga conseguentemente modificato il loop di controllo attivo. Infatti imporre i valori di P e Q su una rete isolata porterebbe a valori di tensione inaccettabili. Del resto verrebbe anche a mancare il riferimento di tensione rispetto al quale definire lo sfasamento. La tensione V sarebbe infatti conseguenza della forza elettromotrice E ed il sistema di controllo inseguirebbe se stesso. Dall'altro, lato imporre una tensione costante in modulo e frequenza in presenza di una rete significherebbe avere flussi di potenza incontrollati ed uno scorrimento continuo della E rispetto alla V.

Nel caso poi in cui siano presenti più inverter funzionanti in parallelo su una rete isolata, risulta necessario che uno di essi agisca da riferimento per gli altri operando a tensione e frequenza costante, mentre gli altri operano a potenza imposta, agganciandosi al riferimento definito dal primo inverter. Questo, a sua volta, è chiamato ad accollarsi tutte le variazioni del carico presente sulla rete mentre gli altri continuano a mantenere invariata la potenza di lavoro. È quindi necessario un coordinamento dei vari inverter presenti attraverso un sistema di supervisione a cui deve essere noto lo stato di tutte le macchine, e che deve essere in grado di agire su ciascuna di esse. Ciò risulta particolarmente oneroso quando il sistema risulti dall'evoluzione di una rete a cui sono state progressivamente collegate sorgenti diverse.

Gli inverter a controllo di tensione infine richiedono la presenza di una impedenza equivalente di connessione tra il ponte e la rete sufficientemente elevata in modo da poter avere uno sfasamento adeguato tra le due tensioni. Tale impedenza costituisce anche il ramo induttivo del sistema di filtraggio che invece, con opportuna scelta del controllo, può essere praticamente omesso negli inverter a controllo di corrente.

Comportamento a fronte di guasto

I componenti di elettronica di potenza hanno una ridotta capacità di sovraccarico a causa della minima inerzia termica dei componenti a semiconduttore che costituiscono il ponte stesso. Pertanto, il sistema di controllo dell'inverter deve anche provvedere ad effettuare la protezione dalle sovracorrenti. Nell'evento di un guasto od ogni altro fenomeno che porti ad un aumento della corrente oltre ai limiti propri del sistema, il sistema di controllo provvede a limitare la corrente scambiata dall'inverter.

Gli inverter controllati in corrente non necessitano variazioni del controllo in presenza di guasto; l'effetto del corto è solo una riduzione della tensione. In particolare, se il controllo di corrente è realizzato tramite un sistema a isteresi, esso è di per sé già del tutto idoneo; se invece il controllo di corrente si basa su altre logiche può essere necessario l'intervento di loop di controllo più rapidi.

Gli inverter a controllo di tensione devono invece ridurre la tensione per mantenere la corrente entro i limiti sostenibili dall'inverter; questa azione avviene però con tempi di risposta del tutto inadeguati a salvaguardare i componenti di elettronica di potenza e sono necessarie altre azioni se non l'arresto dell'inverter stesso.

Sistema con statismo

Molte delle sorgenti distribuite ed in particolare i sistemi con accumulo elettrochimico offrono una significativa opportunità di migliorare la qualità dell'alimentazione di porzioni di reti di distribuzione. Tuttavia gli aspetti di gestione delle reti di distribuzione attive richiedono un notevole impegno per il coordinamento dei sistemi di generazione e dei sistemi di protezione; ciò può costituire una barriera allo sfruttamento di questa risorsa, in particolar modo quando i sistemi di generazione non sono nemmeno progettati per svolgere questo tipo di funzione.

Le caratteristiche fondamentali di un sistema di conversione idoneo ad interfacciare sistemi di accumulo, consentendo quindi una più semplice integrazione in rete e, contemporaneamente, rendere effettivamente utilizzabili le opportunità descritte sono quindi:

- essere in grado di operare solo sulla base di misure disponibili localmente senza richiedere segnali esterni,
- poter funzionare in parallelo alla rete, od in isola, eventualmente in parallelo ad altri sistemi simili,
- non richiedere il riconoscimento della configurazione di rete.

Al momento attuale, sistemi di controllo idonei al funzionamento in parallelo di inverter, in assenza di sistemi di controllo centralizzati, sono sviluppati per impianti di UPS di grossa taglia, in particolare quando si preveda che gli inverter installati possano avere taglie diverse ed esser installati in tempi successivi e magari prodotti da costruttori differenti. Per il resto tutti i sistemi di inverter commerciali sono riconducibili ad una delle modalità di controllo descritte in precedenza. Il sistema di controllo qui ipotizzato si basa sul principio di funzionamento che consente la regolazione della potenza nei sistemi elettrici. Si tratta di un sistema dotato di statismo sia di frequenza che di tensione del tipo di quello ipotizzato per il controllo degli UPS.

Sistema di controllo

Sistema di controllo con statismo

La struttura di controllo dell'inverter deve permetterne l'utilizzo sia su rete passiva che attiva secondo varie modalità di funzionamento. Il controllo che dovrà essere implementato nel convertitore dovrà prevedere un grado di statismo.

Funzionamento normale

Il controllo agisce definendo il modulo e fase della fondamentale della tensione che l'inverter deve produrre sulla base di quattro controllori: di frequenza, di tensione, in limitazione di potenza e in limitazione di corrente. Le uscite sono inviate al generatore degli impulsi di accensione delle valvole che può essere un PWM ma anche essere realizzato con una qualsivoglia altra metodologia.

La velocità di risposta di un tale sistema di controllo può non essere sufficiente ad evitare che la corrente nell'inverter superi livelli pericolosi danneggiandone così i componenti. È necessario quindi un sistema più rapido indicato come "Controllo di massima corrente" che by-passa i segnali inviati dal PWM qualora la corrente superi un valore istantaneo predefinito.

Comportamento a fronte di guasto

I componenti di elettronica di potenza hanno una ridotta capacità di sovraccarico a causa della minima inerzia termica dei componenti a semiconduttore che costituiscono il ponte stesso.

Pertanto, il sistema di controllo dell'inverter deve anche provvedere ad effettuare la protezione dalle sovracorrenti. Nell'evento di un guasto od ogni altro fenomeno che porti ad un aumento della corrente oltre ai limiti propri del sistema, il sistema di controllo provvede a limitare la corrente scambiata dall'inverter.

Gli inverter controllati in corrente non necessitano variazioni del controllo in presenza di guasto. L'effetto del corto è solo una riduzione della tensione. In particolare, se il controllo di corrente è realizzato tramite un sistema a isteresi, esso è di per sé già del tutto idoneo. Se invece il controllo di corrente si basa su altre logiche può essere necessario l'intervento di loop di controllo più rapidi.

Gli inverter a controllo di tensione devono invece ridurre la tensione per mantenere la corrente entro i limiti sostenibili dall'inverter. Questa azione avviene però con tempi di risposta del tutto inadeguati a salvaguardare i componenti di elettronica di potenza e sono necessarie altre azioni se non l'arresto dell'inverter stesso.

Sistema di compensazione delle armoniche

Un sistema di compensazione delle armoniche dovrà poter compensare armoniche dell'ampiezza indicata nella Tabella 14, e, espresso in valori relativi alla potenza nominale del dispositivo compensatore, comprende armoniche di ordine dispari non multiplo di tre di ampiezza inversamente proporzionale all'ordine di armonica h: Ih=1/h.

Tabella 14. Ampiezza delle armoniche da compensare

Ordine, h	5	7	11	13	17	19
Ampiezza	20%	14%	9%	8%	6%	5%

Interfacciamento con il sistema di controllo remoto

Il sistema di controllo del dispositivo dovrà interfacciarsi con il sistema di controllo della rete di distribuzione scambiando le informazioni riguardo allo stato operativo del dispositivo stesso e ricevendo i comandi necessari all'avviamento e all'arresto del dispositivo, oltre che i settaggi dei parametri degli anelli di controllo, quali il posizionamento delle caratteristiche di statismo.

Simulazione del funzionamento del controllore con statismo

È stata anche effettuata una simulazione del compensatore con statismo, ipotizzando una potenza di 1 MW (erogabile per un'ora) ed un collegamento alla rete MT tramite un trasformatore BT-MT. La rete MT è a 15 kV ed è collegata alla rete prevalente, a frequenza fissa di 50 Hz e potenza di corto circuito di 200 MVA. Il carico simulato ha una potenza attiva di 1 MW e una potenza reattiva di 300 kVAR. Il diagramma a blocchi del modello della rete è riportato in Figura 30.

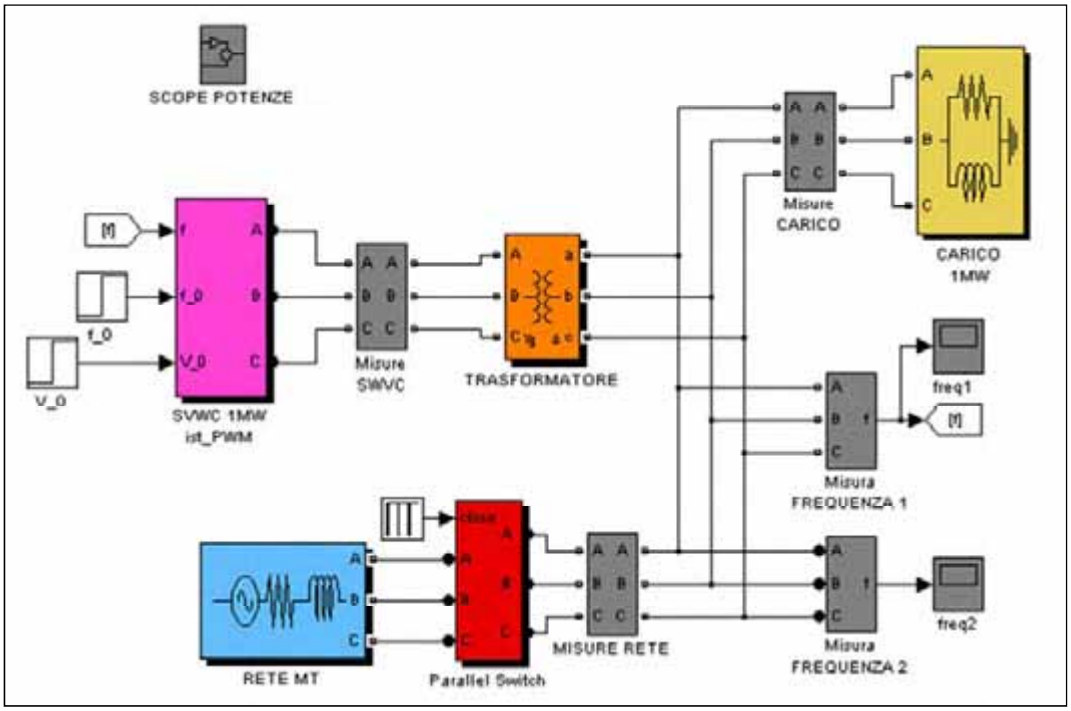


Figura 30 Schema di principio della rete elettrica simulata

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

L'attività ha previsto la progettazione preliminare e di dettaglio con relativa acquisizione di tecnologie di controllo e gestione dell'interfacce verso la rete con l'esecuzione di prove di laboratorio con la validazione, mediante software specifici, delle logiche e strategie di controllo che comprendano protezione e automazione per reti di distribuzione in presenza di GD ed accumulo elettrico. Lo sviluppo di tali tecnologie è finalizzata alla minimizzazione dell'impatto sulla rete e all'analisi di sicurezza, affidabilità e qualità dell'energia elettrica (power quality) in condizioni di incertezza e variabilità del regime di produzione. Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Pisa (UniPi) e con l'Università di Palermo" (UniPa).

In particolare, inizialmente si propone e si applica un approccio "di sistema", basato sull'applicazione di algoritmi di ottimizzazione di tipo multi-obiettivo, come criterio metodologico attraverso cui guidare le scelte progettuali di un sistema di accumulo distribuito in un sistema isolato. Più in particolare, nel corso di tale fase di attività, sono state identificate, implementate e comparate diverse strategie di installazione e gestione di sistemi di accumulo distribuito su alcuni nodi di una rete reale in media tensione (isola di Pantelleria), al fine di valutare la valenza multi-obiettivo di tale provvedimento al variare della posizione, della taglia e delle caratteristiche della rete. Per tale applicazione sono stati valutati e confrontati i seguenti obiettivi: perdite nella rete, costo complessivo di produzione, emissioni di CO_2, scostamento della potenza generata dai gruppi tradizionali dai valori di *set-point*; è stata inoltre indagata la variabilità del profilo delle tensioni per le diverse strategie di gestione ipotizzate e in confronto con uno scenario di riferimento caratterizzato dall'assenza di accumulo.

Mentre l'applicazione iniziale parte è riferita ad un sistema isolato e ha un maggiore carattere metodologico, la seconda parte si riferisce ad un'ipotesi applicativa condotta su una rete di distribuzione interconnessa (attualmente a servizio del campus universitario di Palermo) e presenta un carattere progettuale più marcato, con scelte e valutazioni tecnico-economiche di dettaglio. Nello specifico è stata ipotizzata l'installazione di batterie di accumulo posizionate in prossimità del punto di allaccio alla rete ENEL del Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIEET), dell'Università di Palermo. I sistemi di accumulo sono stati dimensionati ed eserciti, prevalentemente, per applicazioni di *peak-shaving*, di *load-shifting* e di *load-levelling*, producendo contemporaneamente benefici, per l'ente distributore (in termini di riduzione delle perdite, livellamento dei valori della tensione, differimento delle opere di potenziamento della linea di alimentazione, aumento della vita utile dei cavi) e per il DIEET (essenzialmente in termini di riduzione del costo dei consumi di energia elettrica).

Strategie multi-obiettivo per progettare sistemi di accumulo elettrico distribuito nei sistemi isolati: applicazioni alla rete di Pantelleria

In relazione agli obiettivi dello studio, l'applicazione condotta sulla tale rete di Pantelleria assume e individua in un approccio "di sistema", basato sull'applicazione di algoritmi di ottimizzazione di tipo multi-obiettivo, il criterio metodologico attraverso cui guidare le scelte progettuali di un sistema di accumulo distribuito.

Formulazione del problema multi-obiettivo

Il problema dell'*Environmental/Economic power Dispatching* (EED) in reti isolate consiste nell'identificazione della gestione ottimale delle risorse energetiche distribuite (DER) inserite nella rete come compromesso tra condizioni di funzionamento a minimo costo e a basso impatto ambientale, caratterizzati da livelli elevati di qualità del servizio. Molti micro-sistemi isolati, come quello in esame, nascono per trasformazione di sistemi di distribuzione passivi, di tipo tradizionale, in sistemi attivi. In questi casi, poiché il sistema di alimentazione principale è costituito da uno o più generatori diesel, oltre alla minimizzazione degli obiettivi operativi (perdite, costi di produzione, ecc.), può essere opportuno (o necessario) ottimizzare anche l'operatività dell'unità di generazione principale. Quest'ultimo obiettivo può essere raggiunto riducendo le fluttuazioni di potenza erogata dai generatori. Per la rete di Pantelleria, si è ritenuto di indagare il possibile ruolo dell'accumulo elettrico:

- in accoppiamento con gli impianti di produzione da fonte rinnovabile e, più in particolare, in relazione alla presenza di numerosi impianti fotovoltaici);
- in relazione all'esigenza di migliorare il profilo delle tensioni nodali (e quindi la qualità della tensione), soprattutto nelle ore di massimo carico e nei nodi più terminali;
- nella risoluzione di alcune criticità (soprattutto nelle ore di minimo carico) dovute all'elevato grado di penetrazione di impianti alimentati da fonti rinnovabili, al fine di conseguire uno sfruttamento pieno dell'energia prodotta da tali impianti e migliorare l'efficienza complessiva dell'intero sistema elettrico.

A tal fine, sono state definite, implementate e confrontate tre diverse ipotesi di installazione e gestione di sistemi di accumulo elettrico, ritenendo invariati il numero di batterie (pari a 4) e la loro taglia complessiva:

1. **caso ST fotov**, con batterie nei nodi 4, 32, 135 e 144, ovvero in posizione prossima agli impianti fotovoltaici di maggiore taglia;
2. **caso ST tens**, con batterie nei nodi 3, 24, 131 e 199, ovvero nei nodi di maggiore importanza ai fini della regolazione del profilo delle tensioni;
3. **caso ST load**, con batterie nei nodi 2, 9, 95 e 144, ovvero nei nodi di carico di maggiore potenza.

Per valutare l'incidenza dei sistemi di accumulo sugli indici di prestazione della rete, la stessa procedura di ottimizzazione multi-obiettivo è stata applicata anche al dispacciamento ottimale delle unità di produzione in assenza di accumulo (**caso No storage**), i cui risultati delineano lo scenario di riferimento.

Fra tutte le condizioni implementate, al variare dei diagrammi di carico e dei profili di produzione giornalieri degli impianti fotovoltaici, i risultati relativi alle condizioni operative ritenute più significative in relazione alle criticità sopra evidenziate e al ruolo dell'accumulo mostrano evidenti benefici (Figura 31). L'impatto dei sistemi di accumulo sul profilo delle tensioni è evidente in tutti i casi, seppure con effetti diversi. Più in particolare:

- il massimo beneficio si ha (come d'altronde ci si attendeva) nel caso **ST tens**, per il quale tutte le tensioni nodali si innalzano rispetto al caso *No storage*, con un beneficio che è maggiore nei nodi in cui la tensione è più depressa e, di conseguenza, con il profilo più regolare;
- per il caso **ST fotov**, solo la linea in cui si verificano le maggiori cadute di tensione trae beneficio dalla presenza dei sistemi di accumulo, mentre per le altre il profilo delle tensioni assume l'andamento più basso;
- infine, nel caso **ST load**, non si rilevano effetti significativi sui profili di tensione delle quattro linee, che rimangono pressoché invariati rispetto al caso *No storage*.

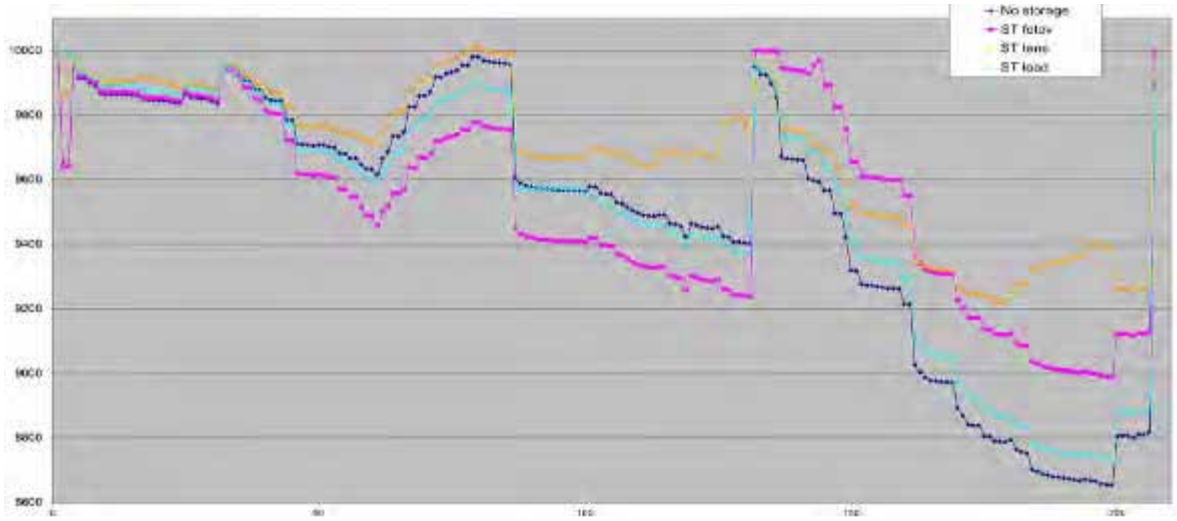


Figura 31. Profilo delle tensioni nodali nella condizione di massimo carico

Valutazioni tecnico-economiche per il progetto di un sistema di accumulo elettrico da integrare nella rete del campus universitario di Palermo

La cittadella universitaria è collocata all'interno del Parco d'Orleans ed è alimentata da due linee ENEL indipendenti. La rete test (che alimenta il DIEET) è costituita dalla linea in cavo a 20 kV che alimenta alcuni edifici della cittadella universitaria.

Dopo aver determinato il valore massimo del carico sulla linea di alimentazione del DIEET, a partire dalle potenze di targa dei trasformatori che alimentano i singoli dipartimenti, sono state valutate le potenzialità tecniche ed economiche dei sistemi di accumulo: l'attenzione è stata posta su tre distinte tipologie: batteria al litio, sodio zolfo (NaS) e ai sali di vanadio. È stata ipotizzata una connessione delle batterie sulla linea che alimenta il DIEET ed i sistemi sono stati progettati per applicazioni di *load-levelling*, *peak-shaving* e *load-shifting*, in modo da offrire benefici sia per l'ente distributore che per l'utente finale. Le applicazioni considerate, ai fini della valutazione tecnico/economica, sono le seguenti:

- Applicazioni il cui beneficio è usufruito dall'Ente Distributore:
  - differimento delle opere di potenziamento della linea che alimenta il DIEET;
  - riduzione delle perdite di energia per effetto Joule nei cavi e nei trasformatori;
  - livellamento dei valori di tensione sulla linea che alimenta il DIEET;
  - aumento della durata di vita dei cavi.
- Applicazioni il cui beneficio è usufruito dall'utente finale (DIEET):
  - sfasamento temporale degli assorbimenti di energia elettrica, traendo vantaggio dal differenziale dei prezzi dell'energia applicati nelle diverse fasce orarie.

Per la stima dei costi dei sistemi di accumulo è stata ipotizzata una configurazione tipo del sistema evidenziata in Figura 32.

Il sistema di accumulo viene connesso in parallelo alla rete T&D attraverso un convertitore di potenza (PCS – *Power Conversion System*). Così facendo la batteria è in grado di erogare energia in rete solamente quando richiesto, ad esempio attraverso un interruttore in grado di connettere il convertitore e l'accumulo alla rete nel giro di pochi millisecondi. Ciò consente di ridurre le perdite rispetto ad una configurazione senza interruttore, nella quale il PCS è costantemente energizzato e la batteria può andare incontro a problemi di sovraccarico. Per contro tale configurazione necessita di maggiori interventi di manutenzione (per la presenza dell'interruttore). La stima dei costi è basata su una valutazione separata dei costi legati all'accumulo (espressi in €/kWh) ed al sistema di conversione (espressi in €/kW).

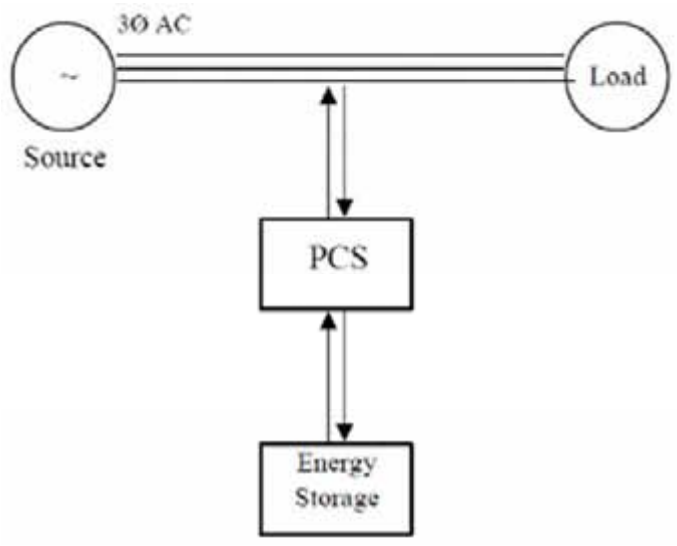


Figura 32. Schema di connessione del sistema di accumulo alla rete

A titolo riassuntivo, la Tabella 15 riporta i valori del tempo di ritorno semplice (PBP_S), valore attuale netto (VAN) e tasso interno di rendimento (TIR) per le diverse topologie di accumulo prese in esame nelle diverse condizioni operative, nell'ipotesi di fare riferimento agli effettivi valori del PUN nella settimana di riferimento o alle effettive tariffe elettriche applicate.

Tabella 15. Analisi economica di diversi sistemi di accumulo per il campus dell'Università di Palermo

Tariffe elettriche applicate	Indicatori economici	Load shifting 2 h	Load shifting - 4 h			Load shifting 8 h	Peak shaving
		Li-ion battery	Li-ion battery	Vanadium battery	NaS battery	NaS battery	NaS battery
PUN	PBP_S	23	26	24	16	23	33
	VAN	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo
	TIR	-	-	-	-	-	-
Tariffe ENEL	PBP_S	43	43	56	32	29	41
	VAN	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo
	TIR	-	-	-	-	-	-

Dimostrazioni e attività di supporto

Validazioni sperimentali e dimostrazioni

L'attività è stata incentrata sul completamento della dimostrazione di batterie al litio installate sulla funicolare di Bergamo, con l'analisi completa dei risultati sperimentali. È stata inoltre, con l'utilizzo dell'impianto sperimentale realizzato presso l'ENEA, completata l'attività di ottimizzazione e validazione delle strategie ottimizzate di gestione e controllo di supercondensatori utilizzati nei carriponte. È stato infine preparato il progetto dimostrativo della casa attiva con un'analisi di possibili utenze attive, anche di generazione con fonti rinnovabili, e delle caratteristiche della microrete.

In aggiunta a quanto previsto, l'ENEA ha svolto uno studio preparatorio relativo alle problematiche di sicurezza associate all'uso delle batterie al litio nelle reti elettriche ed in particolare durante l'installazione presso la funicolare di Bergamo. Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Napoli (UniNa) e con l'Università di Pisa (UniPi).

Sperimentazione sulla funicolare di Bergamo

Obiettivo dell'attività è la fornitura di un sistema batterie al litio da destinare al servizio dell'impianto funicolare "Colle Aperto – San Vigilio", esercito da ATB (Azienda Trasporti Bergamo), per dimostrare i vantaggi derivanti

dall'impiego di batterie al litio in applicazioni stazionarie. L'impianto connette la città di Bergamo Alta con il colle panoramico San Vigilio, attraverso un percorso di 620 m ed un dislivello di 90 m. La funicolare è costituita da una sola vettura che si muove su una rotaia attraverso un cavo di trazione.

I vantaggi che si intendono conseguire mediante l'adozione del suddetto sistema d'accumulo, funzionante secondo la logica del "load leveling" mostrata il Figura 33 (il sistema batterie lavora in abbinamento con un convertitore alimentato dalla rete, fornendo tutta la potenza e l'energia eccedenti la linea tratteggiata) sono la riduzione di potenza estratta dalla rete mediante il convertitore, un miglioramento della qualità dell'energia (secondo il concetto di smart grid) ed un risparmio energetico a cui si associa un risparmio economico ed una riduzione dell'impatto ambientale in termini di riduzione delle emissioni di CO_2.

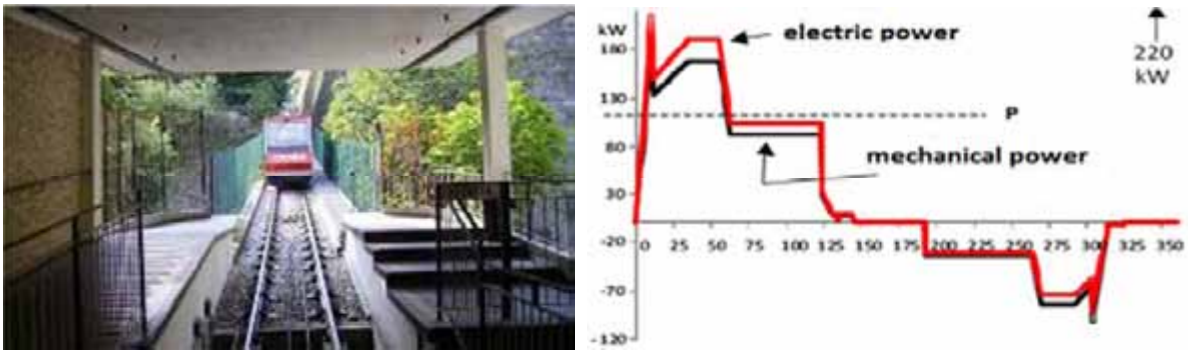


Figura 33. La funicolare "Colle Aperto – San Vigilio" ed il diagramma di potenza

Misure della potenza assorbita

Gli andamenti della potenza attiva e reattiva assorbita (Figura 34), rilevati da UniPi, evidenziano il comportamento del convertitore a commutazione naturale che assorbe un reattivo all'incirca proporzionale alla potenza attiva, ma sempre positivo, con un fattore di potenza intorno a 0,7. Sono anche evidenti gli elevati picchi di assorbimento nella fase in trazione che, nelle condizioni di misura, arrivano a 160 kW, ma, a pieno carico, possono arrivare anche ai 200 kW, a fronte di un valor medio della potenza assorbita di poche decine di kW.

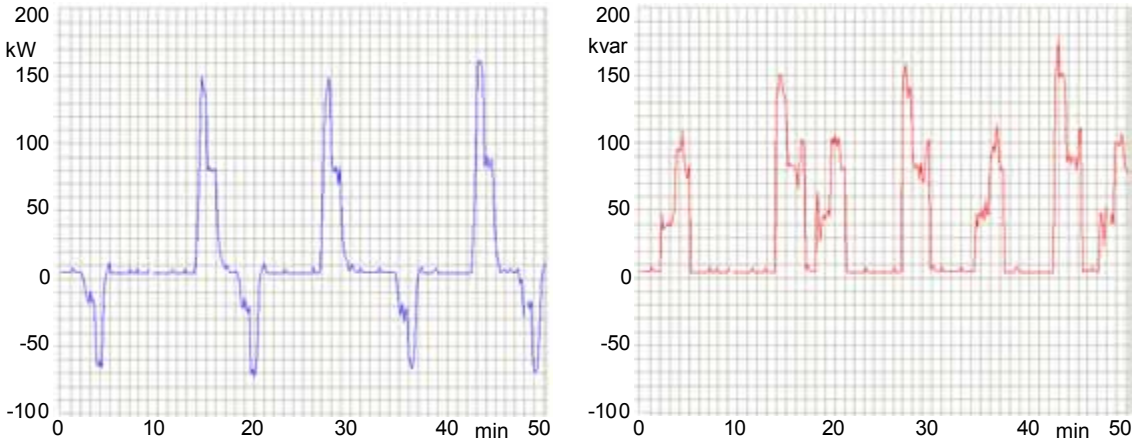


Figura 34. Potenza attiva e reattiva scambiate con la rete durante un periodo di 50 minuti (Potenza attiva positiva: fase di salita; Potenza attiva negative: fase di discesa)

Misure di tensione e corrente sul vecchio impianto

La prima serie di misure delle forme d'onda delle grandezze elettriche si riferisce al funzionamento dell'impianto originario prima degli interventi di sostituzione dell'azionamento. La Figura 35 si riferisce alla fase di salita e la Figura 36 alla fase di discesa. In entrambi i casi si osservano gruppi di armoniche a frequenze tipiche dei sistemi a commutazione naturale. Le misure sono effettuate lato rete e comprendono quindi anche l'effetto dei sistemi di filtraggio passivo. Nonostante ciò, si rileva una forte distorsione della corrente e, conseguentemente, della tensione, con un THD di tensione intorno al 10%.

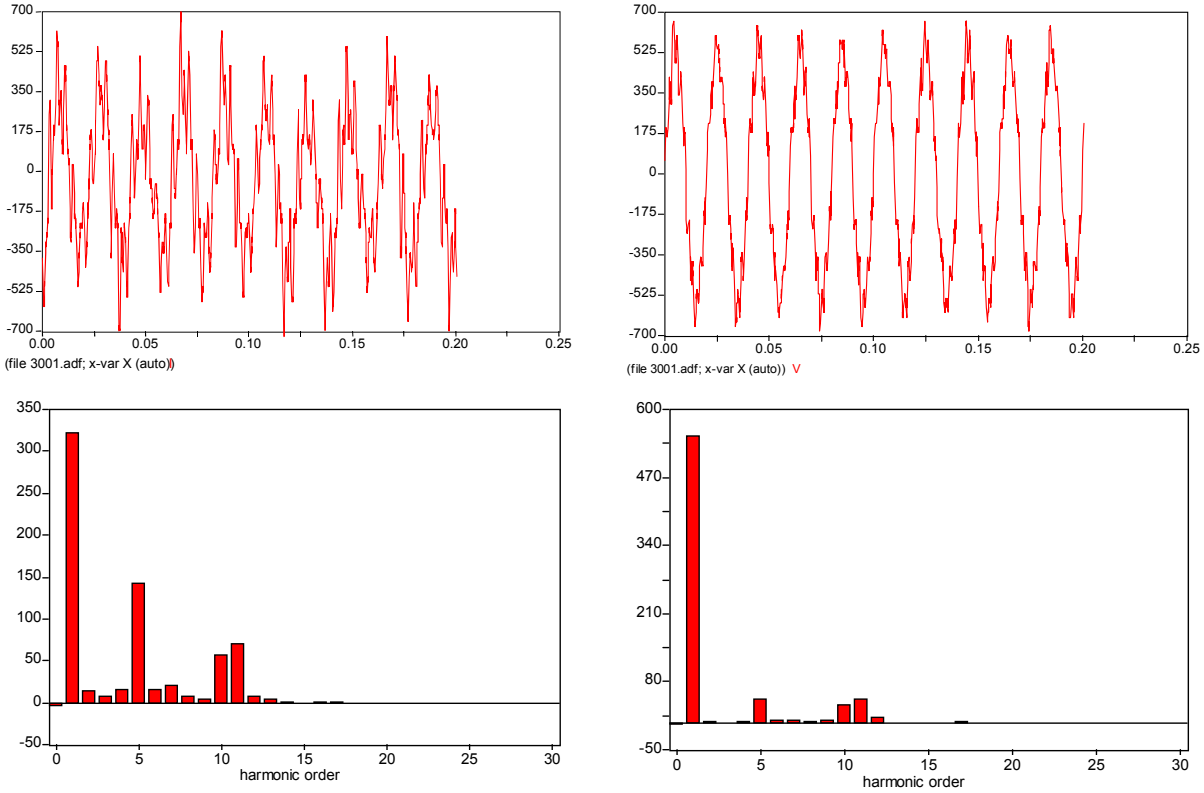


Figura 35. Misure di corrente assorbita (sinistra) e tensione di rete (destra) e relativi spettri armonici per il vecchio sistema di trazione durante la fase di salita con potenza di circa 140 kW

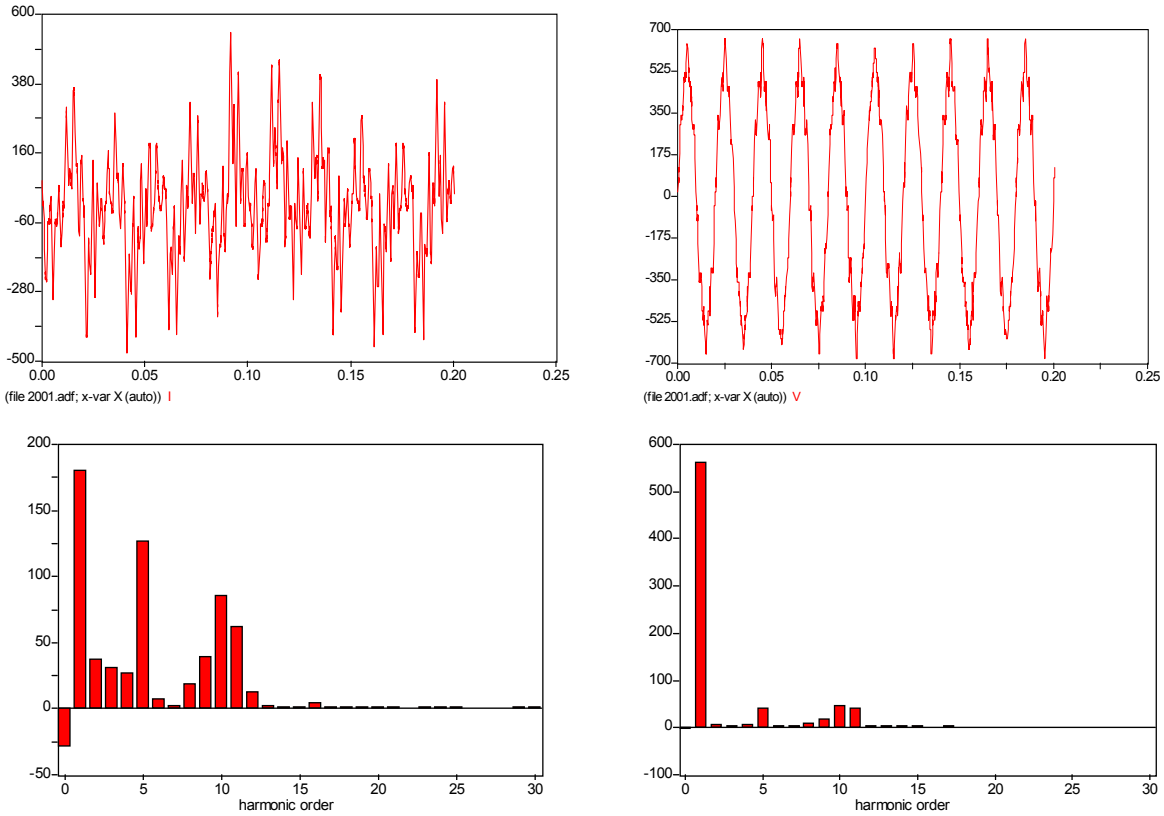


Figura 36. Misure di corrente assorbita (sinistra) e tensione di rete (destra) e relativi spettri armonici per il vecchio sistema di trazione durante la fase di discesa con potenza di circa 70 kW

Misure di tensione e corrente sul nuovo azionamento

Il rinnovo del sistema di alimentazione ha comportato la sostituzione dell'azionamento e l'inserimento di un opportuno sistema di compensazione contenente un accumulo di energia, costituito da batterie al litio, per un totale di circa 18 kWh. Il nuovo sistema di alimentazione consente di:

- contenere a 100 kW il massimo assorbimento di potenza attiva;
- effettuare una frenatura a recupero;
- svolgere la funzione di filtro attivo;
- rifasare completamente il carico, che originariamente operava con un fattore di potenza medio particolarmente basso, data l'impossibilità di regolare il prelievo di potenza reattiva in maniera indipendente da quello della potenza attiva;
- fornire servizi dinamici alla rete.

Allo stato attuale l'azionamento è stato sostituito e i risultati presentati si riferiscono al nuovo sistema. Il dispositivo di compensazione è installato e sono in corso i collaudi prima della consegna all'esercizio. Non sono al momento disponibili i risultati relativi al suo funzionamento.

I grafici di Figura 37 mostrano l'effetto del convertitore in termini di distorsione della tensione per effetto della corrente assorbita. Il confronto è effettuato tra la tensione presente con cabina ferma ad una delle due stazioni (a sinistra) in cui la tensione risulta quasi sinusoidale e durante la marcia (a destra) in cui l'effetto delle commutazioni si ripercuote pesantemente sulla tensione ai morsetti del convertitore.

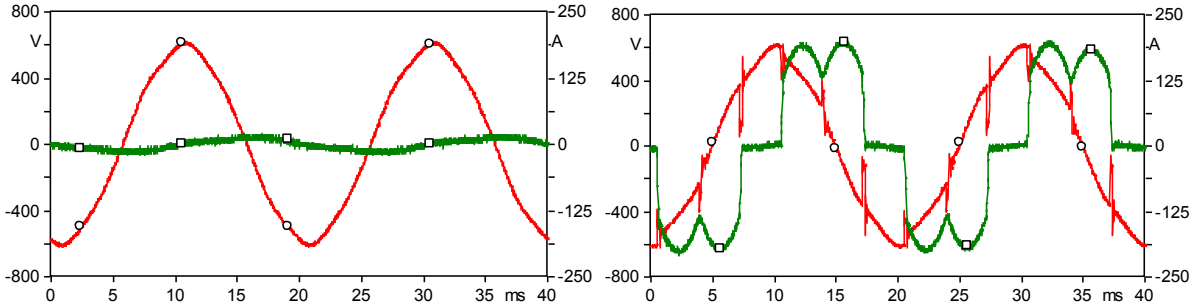


Figura 37. Tensione (rossa) e corrente (verde) ai morsetti AC del convertitore, con cabina ferma a sinistra e in una fase di salita a destra

Le attività sulla batteria

L'attività dell'anno precedente si era conclusa con la consegna del sistema batterie e l'esecuzione di alcuni test preliminari a bassa corrente e temperatura ambiente per verificare le prestazioni delle celle, soprattutto in termini di capacità e resistenza interna, e del BMS. Il sistema era costituito da 5 moduli batterie litio-ioni 86,4 V – 40 Ah, ciascuno ottenuto dalla connessione in serie di 24 unità da 40 Ah, essendo ciascuna unità realizzata da 2 celle da 20 Ah in parallelo. Le valutazioni effettuate, con i cicli di Figura 38, hanno confermato i dati riportati nella specifica tecnica fornita dal costruttore.

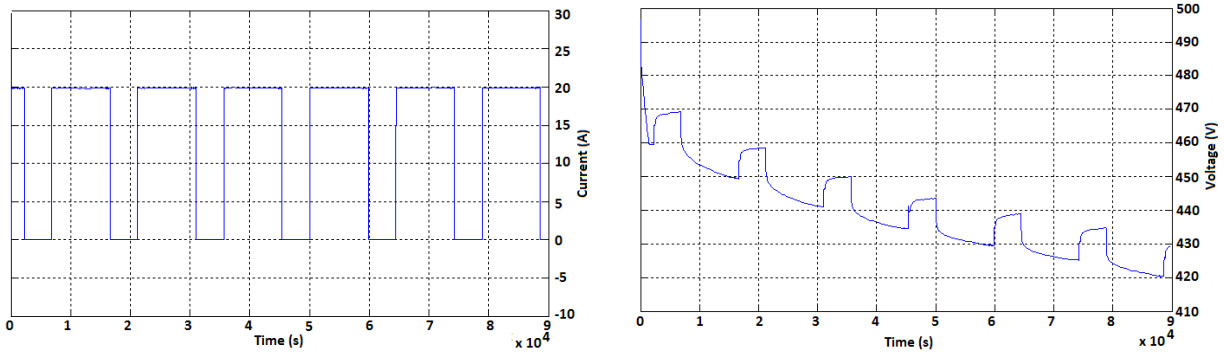


Figura 38. Diagramma di corrente (sinistra) e tensione (destra) per la misura della resistenza interna

Dopo questa prima fase di test presso il Laboratorio di prova batterie del centro ricerche Casaccia dell'ENEA, il sistema batterie è stato trasferito presso l'azienda Equipaggiamenti Elettronici Industriali S.r.l., costruttore del convertitore, per l'esecuzione di una nuova fase di prove, con lo scopo di connettere il sistema batterie al convertitore e verificare la comunicazione tra il BMS (Battery Management System) ed il sistema di controllo del convertitore. Anche in questa fase di test il BMS ha funzionato correttamente.

La progettazione preliminare era stata fatta sulla base della specifica tecnica delle singole celle, mentre non era disponibile alcuna informazione circa il comportamento termico delle stesse in un reale sistema batterie.

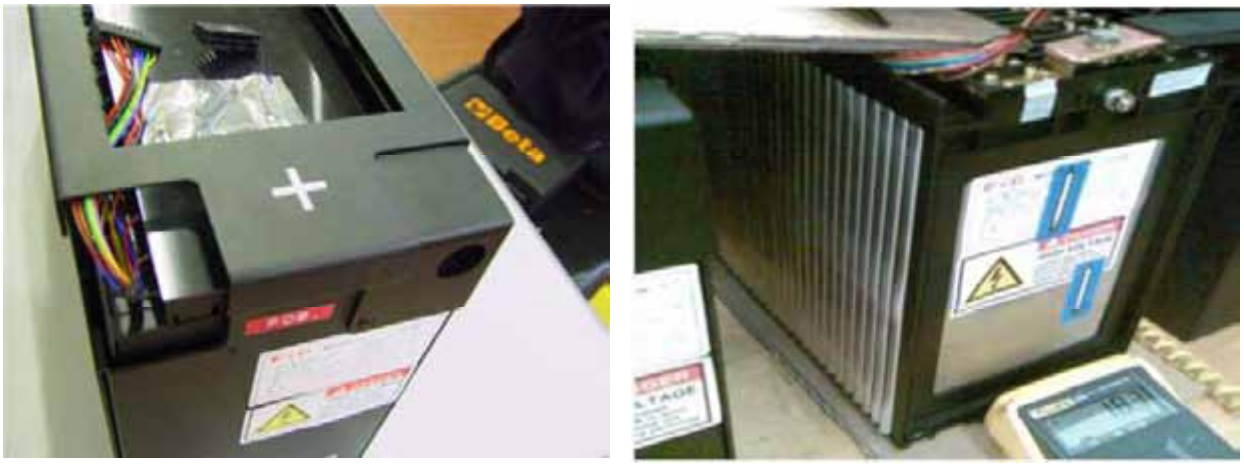


Figura 39. Modulo con il case chiuso (sinistra) ed aperto (destra)

La Figura 39 è relativa alla consegna dei moduli e mostra chiaramente la loro compattezza, sollevando dubbi circa la possibilità di avere un'adeguata ventilazione delle singole celle: il case sembrava non sufficiente a rimuovere e scambiare con l'ambiente esterno il calore prodotto durante le condizioni di esercizio. Al contrario, i moduli sembrano essere stati costruiti per trattenere il calore piuttosto che smaltirlo verso l'esterno. Infatti, il fornitore del sistema batterie aveva avvisato prima dell'acquisto che il sistema batterie era ottimizzato per un'applicazione ben definita e non erano disponibili dati circa lo smaltimento termico in applicazioni differenti. Per questo motivo fu deciso di condurre altre prove in condizioni molto prossime alle reali condizioni di esercizio, in modo da valutare la necessità di un sistema di controllo termico. Il sistema batterie è stato sottoposto ad un ciclo di lavoro in cui la forma del profilo di carica/scarica ed i tempi erano gli stessi delle reali condizioni di esercizio, mentre i valori di potenza erano pari alla metà di quelli reali. Il risultato è stato il raggiungimento di una condizione d'allarme per sovratemperatura, dopo l'esecuzione di pochi cicli (vedi Tabella 16).

Tabella 16. Prove condotte sul ciclo reale, metà potenza

Numero di cicli	Temperatura delle celle centrali del modulo	Note
1	+40,0°C	
2	+41,0°C	
3 ÷ 4	+44,6°C	
5	+46,0°C	
6 ÷ 7	+50,0°C	Allarme di sovratemperatura

L'inconveniente non era dovuto alla scelta del tipo di celle, ma era addebitabile principalmente al case che non riesciva a dissipare il calore. Dopo che il sistema batterie è stato raffreddato, le prove sono state riprese, questa volta con livelli di potenza più bassi, allo scopo di verificare se fosse stato possibile raggiungere un equilibrio termico ad una temperatura inferiore a quella massima raccomandata dal costruttore (50 °C) ed i risultati sono riportati nella Tabella 17.

Tabella 17. Prove condotte sul ciclo reale, potenza variabile.

Limite di potenza	Regime di temperatura delle celle centrali del modulo
1/4	+43,0°C
3/8	+46,5°C

Le prove hanno mostrato che ad un livello di potenza pari a 3/8 di quello reale, si raggiungeva l'equilibrio termico ad una temperatura inferiore a quella limite di esercizio.

A seguito dei risultati delle prove, l'attenzione è stata focalizzata sull'ottimizzazione della dissipazione termica. Come diretta conseguenza delle evidenze sperimentali, tenendo conto del raggiungimento della temperatura

limite di esercizio durante l'esecuzione del ciclo a metà potenza, è stata raddoppiata la capacità del sistema batterie ed introdotta una ventilazione delle celle.

Il raddoppio della capacità è stato ottenuto aggiungendo altri 5 moduli 86,4 V – 40 Ah, uguali ai precedenti: il numero totale dei moduli è quindi passato da 5 a 10. Inoltre, ciascuno di questi moduli è stato trasformato in un modulo da 43,2 V – 80 Ah: il modulo modificato è costituito da 12 unità da 80 Ah, connesse in serie, ciascuna unità essendo realizzata da 4 celle in parallelo. Ciò ha richiesto di realizzare nuovi conduttori elettrici per le connessioni serie/parallelo delle celle e ridisegnare completamente la configurazione del modulo.

L'ottimizzazione della dissipazione termica è stata effettuata con lo scopo di trovare un sistema di raffreddamento efficiente, ad alte prestazioni e basso costo. Sono stati considerati molti fattori importanti: la quantità di calore da rimuovere, la massima temperatura consentita, il mezzo di scambio termico ed il metodo per la distribuzione del refrigerante. Il calore che deve essere rimosso da ciascun modulo è rappresentato nella Figura 40, confrontato con la precedente situazione. Il raddoppio della capacità riduce la corrente della metà, per cui la potenza termica è ridotta di un fattore pari a 4.

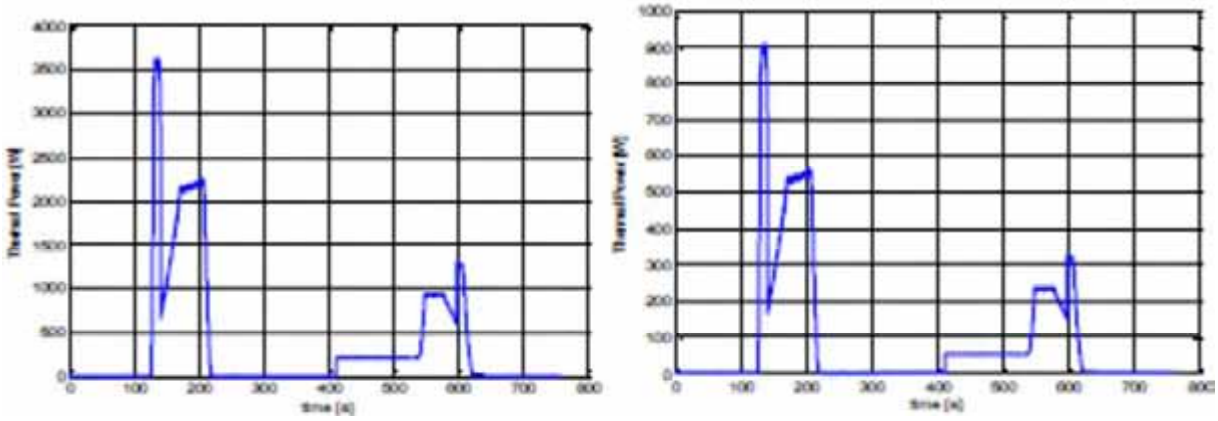


Figura 40. Andamento della potenza termica prima (sinistra) e dopo (destra) del raddoppio di capacità

La temperatura massima di esercizio delle celle è stata fissata a +40°C, mentre la temperatura ambiente è stata fissata a +20°C (tale valore sarà garantito tramite sistema di condizionamento del locale di installazione). D'altro lato, durante il funzionamento invernale, il sistema non necessita di essere scaldato perché la temperatura all'interno del locale di installazione non è mai troppo bassa: nella particolare situazione in cui il locale debba essere scaldato, si può usare allo scopo lo stesso sistema di condizionamento. Come mezzo di scambio termico è stata scelta l'aria, perché, dovendo intervenire a questo punto del progetto, tale scelta costituisce l'approccio più semplice ed economico ma allo stesso tempo efficiente, perché la capacità è stata raddoppiata, come ulteriore misura di protezione, ed in questa nuova condizione il sistema batterie difficilmente ha bisogno di essere raffreddato. La distribuzione del fluido di scambio termico e la ventilazione delle celle sono state realizzate per mezzo di distanziatori introdotti tra le celle così da creare uno spazio vuoto che può essere attraversato dall'aria mossa da 6 ventilatori assiali per ciascun modulo. La Figura 41 mostra questa soluzione.

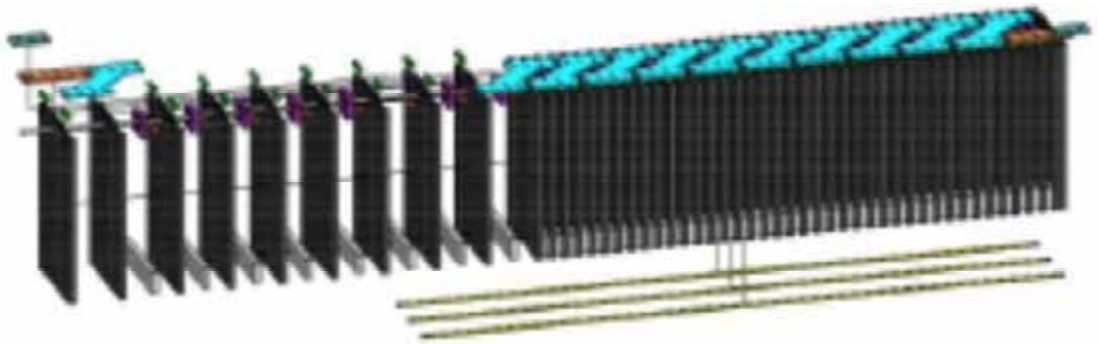


Figura 41. Distanziatori tra le celle

Nella configurazione iniziale le celle erano tutte accostate l'una all'altra, senza spazio libero tra di esse. Inoltre uno strato isolante era interposto tra le celle ed i pannelli laterali del case metallico, limitando fortemente la possibilità di rimuovere il calore. Come conseguenza della nuova configurazione, è stato necessario costruire anche un nuovo contenitore (case) metallico (Figura 42).

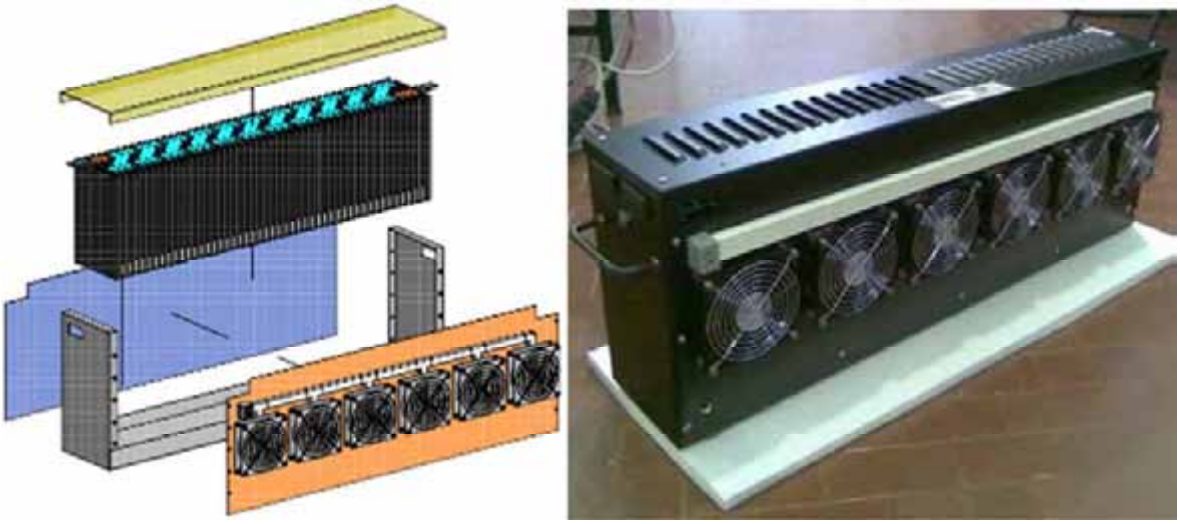
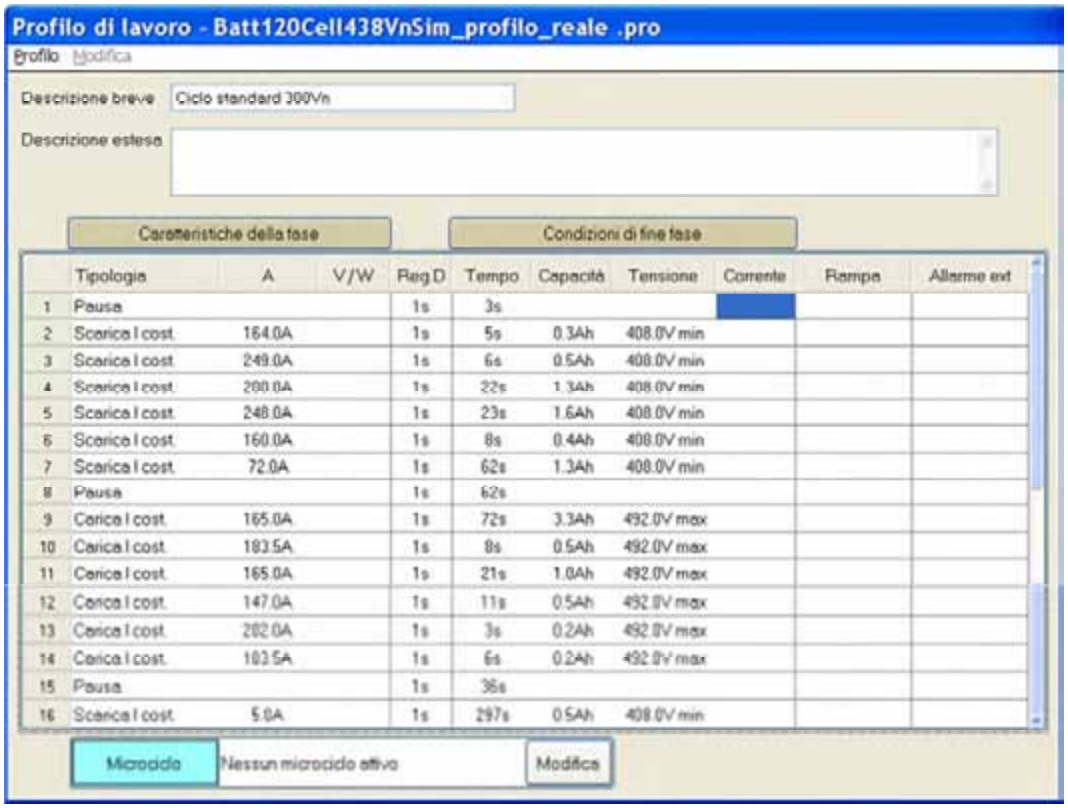


Figura 42. Nuovo case con ventilatori

Il sistema batterie, nella sua nuova configurazione, è stato sottoposto presso il Laboratorio di prova batterie del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA ad una nuova sequenza di prove, in accordo con quanto concordato con RSE nel Gruppo di Coordinamento per le prove elettriche sui sistemi di accumulo.



Profilo di lavoro - Batt120Cell438VnSim_profilo_reale .pro

Profilo Modifica

Descrizione breve: Ciclo standard 300Vn

Descrizione estesa

	Caratteristiche della fase					Condizioni di fine fase				
	Tipologia	A	V/W	Reg.D	Tempo	Capacità	Tensione	Corrente	Rampa	Allarme ext
1	Pausa			1s	3s					
2	Scarica I cost.	164.0A		1s	5s	0.3Ah	408.0V min			
3	Scarica I cost.	249.0A		1s	6s	0.5Ah	408.0V min			
4	Scarica I cost.	200.0A		1s	22s	1.3Ah	408.0V min			
5	Scarica I cost.	248.0A		1s	23s	1.6Ah	408.0V min			
6	Scarica I cost.	160.0A		1s	8s	0.4Ah	408.0V min			
7	Scarica I cost.	72.0A		1s	62s	1.3Ah	408.0V min			
8	Pausa			1s	62s					
9	Carica I cost.	165.0A		1s	72s	3.3Ah	492.0V max			
10	Carica I cost.	183.5A		1s	8s	0.5Ah	492.0V max			
11	Carica I cost.	165.0A		1s	21s	1.0Ah	492.0V max			
12	Carica I cost.	147.0A		1s	11s	0.5Ah	492.0V max			
13	Carica I cost.	202.0A		1s	3s	0.2Ah	492.0V max			
14	Carica I cost.	183.5A		1s	6s	0.2Ah	492.0V max			
15	Pausa			1s	36s					
16	Scarica I cost.	5.0A		1s	297s	0.5Ah	408.0V min			

Microciclo | Nessun microciclo attivo | Modifica

Figura 43. Profilo equivalente all'effettivo profilo di esercizio

Il sistema batterie è stato dapprima sottoposto ad una serie di cariche e scariche intervallate da brevissime pause e successivamente ad un profilo equivalente a quello effettivo di lavoro della funicolare (non potendo applicare il valore reale di corrente massima, si è applicato un valore inferiore mantenuto per un tempo superiore, in modo da produrre lo stesso calore da dissipare: il profilo applicato e quello reale sono cioè equivalenti a parità del prodotto I2t). Quest'ultimo profilo (Figura 43) è equivalente al ciclo più pesante che le batterie possano subire (funicolare a pieno carico); inoltre si sono poste le batterie ad una temperatura ambiente di 30 °C (contro i 20 °C che ci si aspetta nel locale che le ospiteranno) ed è stata interrotta l'aerazione del locale con l'esterno. La durata temporale del ciclo di lavoro è stato ridotta per limitare ulteriormente la possibilità di smaltimento di calore rispetto al caso reale. In queste condizioni la temperatura del pacco si è portata da quella ambiente a +43 °C massimi dopo circa tre ore di funzionamento, l'azionamento delle ventole ha permesso di riportare il tutto alle

condizioni iniziali senza interrompere l'esercizio. Superate le prove, il sistema batterie è stato trasportato presso l'impianto di destinazione finale, dove attende la fornitura del convertitore per essere poi collaudato sull'impianto e quindi messo in esercizio. In vista dell'installazione, allo scopo di individuare le dotazioni di sicurezza di cui deve essere fornito il locale di alloggiamento delle batterie, vista anche l'assenza di normativa specifica a riguardo, l'ENEA sta eseguendo un apposito studio.

Studio preliminare di sicurezza di un sistema di accumulo elettrico realizzato con celle Litio-ione

Il presente studio ha come obiettivo la raccolta delle informazioni necessarie per la gestione in sicurezza di un sistema di accumulo elettrico realizzato con celle a Litio-ione nell'ambito del presente Progetto.

Attività' svolte ed obiettivi conseguiti

Lo studio è stato affrontato seguendo le indicazioni sulla valutazione del rischio previste dalla normativa vigente in materia di tutela della salute e sicurezza sul lavoro, ovvero del Titolo IX del D.Lgs. 81/08, ed ha condotto alla prima stesura di una Safety Review che verrà sperimentata sul sistema batterie realizzato per l'alimentazione dell'impianto funicolare "Colle Aperto – San Vigilio" esercito dalla Azienda Trasporti di Bergamo (ATB), anche al fine di permettere la progettazione in sicurezza del locale batteria e la corretta gestione del sistema di alimentazione.

Le informazioni raccolte hanno messo in evidenza la **mancanza di normativa specifica e di corrette informazioni di sicurezza**, nonché l'opportunità di caratterizzare dal punto di vista termochimico le sostanze chimiche, e le loro miscele, che costituiscono le batterie esaminate.

Lo studio effettuato, pur di carattere preliminare, ha consentito di progettare una campagna di monitoraggio ambientale dei laboratori di prova di ENEA, dimostrando quanto le azioni di tutela della salute e sicurezza sul lavoro volute dal legislatore possano costituire un investimento, piuttosto che un costo, quando affianchino attività di sviluppo tecnologico e di ricerca.

Prosecuzione dell'attività

Le attività poste in essere proseguiranno il prossimo anno contemporaneamente agli studi di *Life Cycle Assessment* e consentiranno, tra l'altro, l'elaborazione di una metodologia di identificazione dei pericoli connessi con la produzione e l'uso di sistemi di accumulo elettrico e l'avvio delle necessarie azioni di implementazione normativa.

Sperimentazione sulla supercondensatori per carroponte

L'attività relativa all'utilizzo di supercondensatori come sistema di accumulo energetico in un carroponte hanno riguardato:

- l'ottimizzazione degli algoritmi di gestione del sistema;
- la realizzazione di campagne di prova che permettessero di valutare le prestazioni degli algoritmi di gestione, i cui risultati hanno permesso un'ulteriore evoluzione degli stessi.

L'attività di sviluppo del software e dei cicli di test era già stata portata ad uno stato avanzato nella seconda annualità: nella terza si è raffinato il lavoro sia seguendo i principi base del lavoro precedente che impostando un approccio totalmente nuovo. La differenza tra i vari software è relativa alla gestione dello stato di carica dei condensatori e delle correnti/potenze di ricarica richieste alla rete: l'energia accumulata nei supercondensatori ed il loro stato di carica sono facilmente identificabili con la tensione a vuoto degli stessi, tensione che può variare per l' applicazione considerata da un valore V_{min} ad uno V_{max}.
In generale il valore massimo della tensione di lavoro può dipendere sia dalle caratteristiche fisiche del sistema di accumulo che da quelle di funzionamento del convertitore ad esso associato, mentre per il valore minimo il limite è dovuto esclusivamente alla necessità di far lavorare il convertitore in zone ad alto rendimento. I parametri che influenzano l'algoritmo di gestione dell'accumulo sono:

- il livello di energia che l'accumulo ha a disposizione per poter contribuire al sollevamento del carico e quello che invece può assorbire da esso e dalla rete;
- i tempi di sollevamento, spostamento e posa del carico;
- la potenza massima che si vuole assorbire/erogare verso rete.

Algoritmo A6

L'algoritmo A6 costituisce la logica evoluzione dell'algoritmo A4 e la premessa alla scrittura dell'algoritmo A8 che verrà illustrato in seguito.

L'osservazione alla base della sua formulazione è quella che in un carroponte in cui il carico è posto alla minima altezza da terra l'unica condizione di funzionamento possibile è quella del sollevamento, per cui è desiderabile che

il sistema di accumulo sia completamente carico, viceversa nel caso in cui il carico è posto alla massima altezza possibile per il carroponte allora l'unica condizione di funzionamento da attendersi è il recupero di energia dovuto alla posa del carico.

L'algoritmo A6 introduce quindi una tensione di riferimento per i condensatori legata alla altezza a cui si trova il carico: questa tensione viene calcolata considerando l'energia potenziale che avrebbe il massimo carico manipolabile dal carroponte a quella altezza.

Algoritmo A8 - Introduzione

Le strategie di controllo di sistemi di accumulo per impianti industriali reali possono essere di tipo "general purpose", oppure orientate alla specifica applicazione. Le prime non richiedono generalmente la conoscenza delle grandezze caratteristiche del sistema che si vuole controllare, ma sfruttano le capacità intrinseche del sistema fisico di realizzare determinati obiettivi. Lo sviluppo di metodologie di controllo "general purpose" è sicuramente molto semplice e presenta validità generale, ma richiede necessariamente di trascurare gli aspetti specifici del comportamento del sistema. Pur raggiungendo gli obiettivi che ci si era posti in fase di progetto, le prestazioni dell'azionamento così controllato non possono, pertanto, ritenersi completamente soddisfacenti. Le prestazioni del sistema possono essere decisamente migliorate se si fa riferimento a strategie di controllo che siano specificatamente orientate all'applicazione che si sta considerando.

Lo sviluppo della strategia di controllo richiede, in tal caso, la conoscenza dei modelli matematici che descrivono il comportamento fisico del sistema. Nel caso in esame di un azionamento elettrico con motore asincrono corredato da un sistema di accumulo a supercondensatori, tali modelli sono già noti nella letteratura tecnica e possono essere utilizzati con successo nella definizione delle strategie di controllo. Non altrettanto noto è, però, il modo in cui impiegare il modello matematico per fare in modo che il sistema fisico funzioni nelle condizioni operative desiderate.

A tal fine si deve tenere presente che, per ottimizzare il recupero energetico del carroponte, è necessario in primo luogo individuare una relazione biunivoca tra la tensione dei moduli di supercondensatori e la posizione occupata dal carico sollevato. Questa relazione sarebbe immediatamente ricavabile nel caso in cui fossero noti a priori i rendimenti dei dispositivi coinvolti impiegando il principio di conservazione dell'energia. In realtà, soltanto una quota parte dell'energia potenziale del carico sospeso può essere effettivamente immagazzinata come energia elettrostatica dei supercondensatori. La relazione deve essere allora stimata facendo riferimento ai rendimenti presunti dell'azionamento o a rendimenti stimati mediante misurazione delle tensioni e delle correnti effettivamente presenti durante il funzionamento.

In secondo luogo è necessario considerare che la corrente erogata dei supercondensatori deve essere in relazione al carico da sollevare, che non è noto a priori. Tuttavia, il problema può essere agevolmente superato stimando la massa del carico, per esempio a partire dalla misura del momento della coppia resistente. In definitiva, si può affermare che la potenza erogata dai supercondensatori deve essere quindi dipendente dalla potenza richiesta dal carico. Tale dipendenza non deve necessariamente essere di proporzionalità diretta (condizione più semplice), ma può essere ricavata da una condizione ausiliaria aggiuntiva che ottimizzi il funzionamento del sistema (per esempio il non superamento di una soglia di corrente per la linea di alimentazione).

Sulla base delle precedenti considerazioni, è stata quindi sviluppata una strategia di controllo ottimizzata che sia in grado di massimizzare il recupero energetico in funzione dell'effettivo carico da sollevare, senza che siano noti a priori né la massa, né il ciclo che deve essere percorso.

Algoritmo A8 – Simulazioni

La tecnica di controllo è stata simulata con un programma al calcolatore realizzato in ambiente Matlab/Simulink. Il banco di supercondensatori è costituito da quattro moduli della Maxwell, i cui dati sono riportati nel report precedente, collegati in parallelo di due stringhe di due moduli a loro volta collegati in serie. La capacità equivalente è, dunque, pari a 63 F. Si è ipotizzato di sollevare prima un carico di 22,5 tonnellate, poi uno da 45 tonnellate. La velocità di sollevamento è di 20 m/min ed il tempo di sollevamento di 5 secondi. Ogni ciclo è stato intervallato con una pausa di 5 secondi.

La tensione dei supercondensatori segue fedelmente il riferimento di tensione. Tale riferimento dipende dalla quota istantanea del carico sospeso e dalla massa. Infatti, mentre durante il sollevamento della massa da 22,5 tonnellate la tensione finale dei supercondensatori si attesta su una valore prossimo ai 225 V, durante il sollevamento della massa da 45 tonnellate essa vale circa 200 V.

I supercondensatori contribuiscono in maniera significativa all'alimentazione del carico, riducendo di molto la corrente erogata dalla rete. Le simulazioni consentono quindi di affermare che la tecnica di controllo proposta è in grado di soddisfare i requisiti di riduzione dei picchi di corrente e di recupero energetico anche con carichi non

noti a priori. La sperimentazione sul carroponte prototipo costruito presso i Laboratori dell'ENEA ha consentito di validare sperimentalmente la tecnica di controllo proposta. L'attività di simulazione e sperimentale hanno fornito risultati molto significativi, perché sono state individuate le condizioni e le strategie ottimali che permettono a tutto il sistema di operare in zone ad alto rendimento e di recuperare il massimo possibile: l'analisi effettuate con lo sviluppo di diverse generazioni di algoritmo ha consentito la valutazione dei vantaggi e degli svantaggi di ognuno di essi.

Studio preliminare per la dimostrazione della casa attiva

È stata definita una metodologia per individuare alcuni parametri caratterizzanti un'utenza, prevalentemente di tipo domestico, per arrivare a stabilire i criteri di dimensionamento, in termini di potenza ed energia, di un sistema di accumulo elettrico che consenta di limitare i picchi di prelievo dalla rete e, di definire, su base economica, il valore ottimale della potenza a cui limitare i picchi e che diventa quindi valore dimensionante per il sistema di accumulo elettrico. Infine sono stati poi analizzati i benefici connessi con l'utilizzo di sistemi di accumulo termico e sono introdotti i criteri per la loro analisi con riferimento all' impiego di tecniche di accumulo in riscaldamento e nel raffrescamento di edifici civili. Un particolare riguardo è stato dedicato all'energia solare.

Caratterizzazione di un carico elettrico

Ai fini del corretto dimensionamento di un dispositivo di accumulo, è fondamentale l'analisi dei diagrammi temporali della potenza scambiata fra la rete e gli utenti ad essa allacciati.

L'andamento nel tempo dei consumi di una data utenza, o aggregato di utenze, può essere analizzato tramite il **diagramma di carico** della stessa, che rappresenta l'andamento temporale della potenza attiva assorbita in un intervallo di tempo T. Gli orizzonti temporali tipicamente analizzati, per ovvi motivi di ciclicità, sono il giorno, la settimana, il mese e l'anno. In alcuni casi si misura il valore istantaneo della potenza, mentre in altri casi si dispone solo del valor medio della potenza registrato a intervalli regolari. Questa soluzione viene spesso utilizzata (con discretizzazioni di decine di minuti o un'ora) quando non si richiede un particolare grado di precisione e permette di utilizzare dispositivi per l'immagazzinamento dei dati aventi memorie di dimensioni inferiori rispetto a quelli associati a sistemi di rilevamento della potenza istantanea o ad intervalli ravvicinati (da qualche secondo ai pochi minuti). Lo stesso regime tariffario, generalmente, considera periodi rilevanti di 15 minuti o di un'ora, anziché grandezze istantanee.

L'attività si è concentrata sull'anali ed il confronto dei vari diagrammi di carico, solitamente giornalieri, afferenti a utenti distinti. L'analisi grafica è stata integrata con indici descrittivi, per poter fornire una caratterizzazione esaustiva del carico. Inoltre, tramite l'utilizzo degli indici risulta spesso più facile e immediato il confronto tra gruppi di utenze. Dall'analisi di un database di profili di carico in possesso del UniPi, risulta che le cumulate giornaliere di utenze domestiche da 3-6 kW hanno tipicamente un andamento esponenziale. A titolo di esempio, si riporta, in Figura 44 il confronto tra una cumulata giornaliera e le linee interpolanti ottenute con diverse formule di interpolazione dei dati (base p.u. pari a 3 kW).

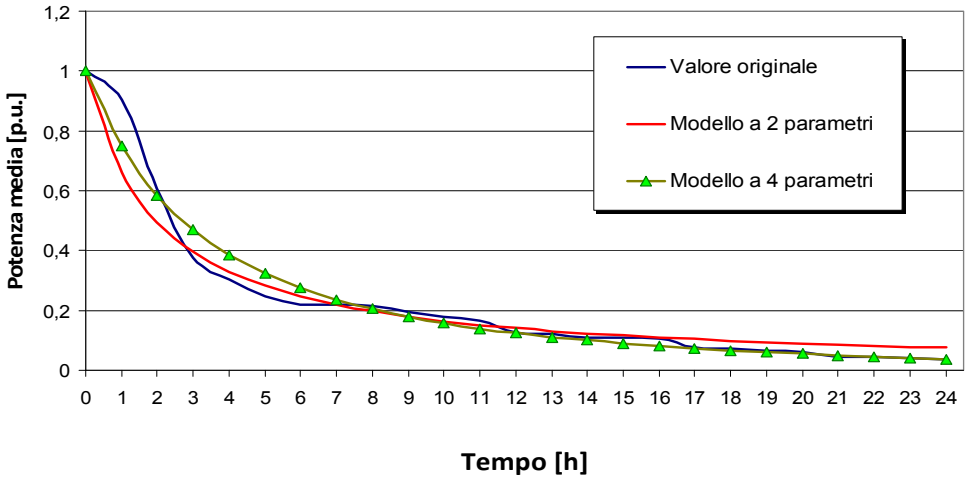


Figura 44. Confronto tra una cumulata giornaliera con andamento esponenziale, il modello a due parametri e quello a quattro parametri

Si può osservare come il modello a quattro parametri riproduca la cumulata giornaliera in modo più fedele; d'altronde, i quattro parametri sono di difficile correlazione con altri fattori temporali, quali il giorno della settimana, il mese, la stagione o altre variabili di tipo sociale.

Criteri di dimensionamento dell'accumulo

Il dimensionamento del sistema di accumulo deve avvenire in base ai servizi, di potenza e/o di energia, richiesti all'accumulo stesso. Definiti i vantaggi derivanti dall'installazione di un accumulo, si sono analizzati i criteri con cui deve essere dimensionato. Per prima cosa, ci si è focalizzati sul dimensionamento in potenza del sistema costituito dal dispositivo di stoccaggio, dall'interfaccia con la rete e dal complesso dei dispositivi necessari alla gestione e al controllo. Sfruttando vari algoritmi, adeguatamente descritti, si sono determinati gli effetti di un'installazione diffusa di piccoli sistemi di accumulo presso le utenze domestiche, in termini di diagrammi di carico della cabina secondaria. In Figura 45 è riportato l'esito di una di queste simulazioni.

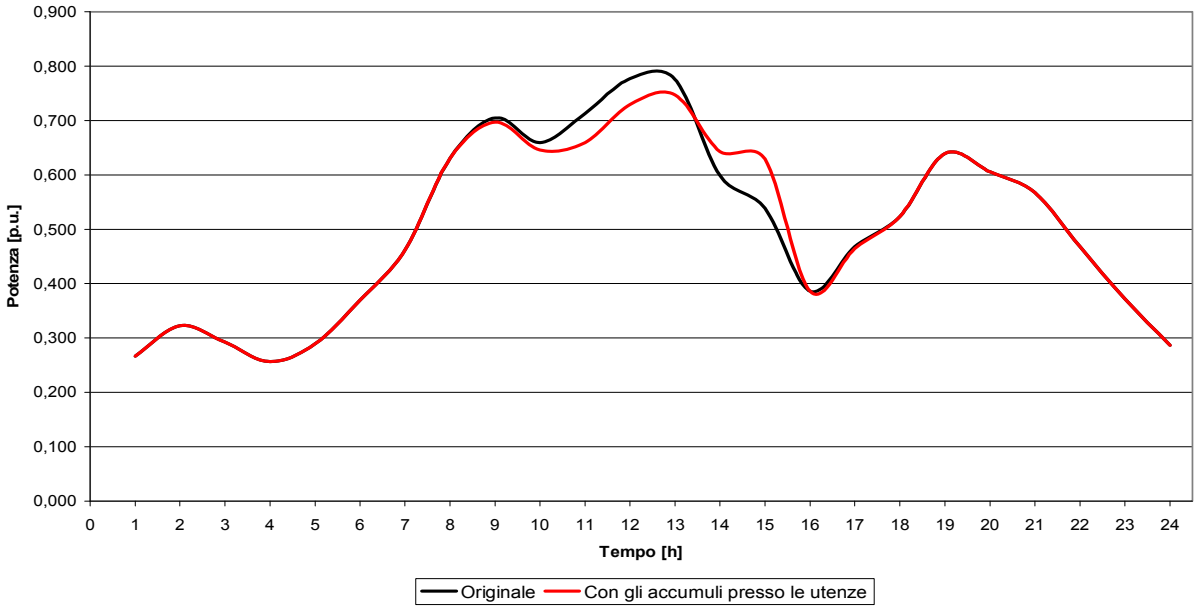


Figura 45. Modifica del diagramma di carico di una cabina secondaria per effetto dell'installazione di piccoli accumuli presso le utenze domestiche

Dall'analisi di questo diagramma si può notare come gli accumuli riducano significativamente il picco di carico della cabina. Dall'analisi svolta nei precedenti capitoli, appare chiaro che il dimensionamento del sistema di accumulo deve essere effettuato in stretta correlazione con le modalità di prelievo dell'utenza. In particolare:

- la potenza P_A dell'accumulo è strettamente legata alla soglia di prelievo di potenza (P_S) che si è scelto di non superare; infatti P_A è pari alla differenza fra l'attuale picco di carico (tipicamente: la potenza contrattuale più la franchigia ammessa dal distributore) e P_S;
- la capacità C_A dell'accumulo va dimensionata in base all'energia che esso deve fornire per evitare un superamento di P_S; tale energia è funzione del diagramma di carico e della potenza di soglia scelta.

Dopo il dimensionamento dell'accumulo in funzione della potenza di soglia oltre la quale si vuole far intervenire l'accumulo, è stato necessario definire un metodo per calcolare la potenza ottimale di ogni singola applicazione, sulla base del vantaggio economico che l'installazione del sistema di accumulo apporta all'utenza. Per effettuare un'analisi economica dell'investimento derivante all'installazione di un sistema di accumulo agli ioni di litio, è stato necessario innanzitutto definire i costi e i possibili ricavi che sono legati a questa soluzione. Per quanto riguarda le voci di costo:

- costo dell'accumulatore, stimabile intorno ai 600 €/kWh;
- costo dell'inverter e dell'interfaccia con la rete di alimentazione dell'utente, stimabile intorno ai 100 €/kW;
- costo dei dispositivi che devono essere installati in ausilio al sistema di accumulo per la sua protezione e gestione, noti come Balance of Plant (BoP), stimabili intorno al 40 % del costo totale del sistema, ma che possono variare molto in base alle funzioni che devono svolgere.

Le voci di ricavo sono legate al tipo di gestione che viene fatta dell'accumulo. Se si predilige, ad esempio, l'aspetto della potenza disponibile, si deve considerare la riduzione del corrispettivo che remunera la potenza nella tariffa di distribuzione, che attualmente vale:

- 5,13 €/kW/anno per utenze domestiche con potenza contrattuale fino a 3 kW (tariffa D2);
- 14,44 €/kW/anno per utenze domestiche con potenza contrattuale oltre 3 kW (tariffa D3);
- 28,58 €/kW/anno per utenze non domestiche alimentate in bassa tensione.

Un'altra conseguenza derivante dall'istallazione dell'accumulo è lo spostamento dei consumi dell'utenza dalle ore piene alle ore vuote. Nell'ipotesi di prediligere gli aspetti di potenza, il trasferimento di energia non è un obiettivo primario della gestione, ma è una conseguenza della gestione improntata alla limitazione delle punte di prelievo.

In Tabella 18 si riassumono i risultati delle simulazioni in termini di costi e di ricavi associati a varie potenze di soglia di potenza. Poiché il risparmio annuo (non attualizzato) è costante per tutta la vita utile, la soluzione progettuale che massimizza il Net Present Value (NPV) è la stessa che minimizza il Pay Back Time (PBT). Si vede chiaramente che l'investimento è conveniente per ogni valore di potenza (P_s) e che il dimensionamento ottimale è quello in rosso, corrispondente ad una potenza di soglia di 3 kW (accumulo da 1 kW e 0,2 kWh, per un investimento di poco più di 300 €).

Tabella 18. Riepilogo costi-ricavi dell'investimento

PS [kW]	Minor corrispettivo di potenza [€/anno]	Minor corrispettivo di energia [€/anno]	Costo annuo evitato [€/anno]	PBT [anni]	NPV 20 anni [€]
2,44	49,6	3,0	80,0	6,0	437
2,48	49,6	2,8	79,8	5,9	447
2,52	49,6	2,7	79,7	5,7	458
2,56	49,6	2,5	79,5	5,6	468
2,6	49,6	2,3	79,3	5,4	478
2,64	49,6	2,2	79,2	5,3	490
2,68	49,6	2,0	79,0	5,1	500
2,72	49,6	1,9	78,9	5,0	511
2,76	49,6	1,7	78,7	4,9	521
2,8	49,6	1,6	78,6	4,7	532
2,84	49,6	1,5	78,5	4,6	543
2,88	49,6	1,4	78,4	4,4	554
2,92	49,6	1,3	78,3	4,2	565
2,96	49,6	1,2	78,2	4,1	577
3,00	49,6	1,1	78,1	3,9	588

E' agevole notare che, essendo il contributo di trasferimento di energia molto esiguo, i diversi investimenti sono caratterizzati pressoché dallo stesso costo evitato, quindi il più conveniente di loro è quello che minimizza il dimensionamento e il costo dell'accumulo, permettendo al contempo il passaggio di tariffa (P_S=3 kW, P_A=1 kW).

Sistemi di accumulo termico

Le tecnologie per l'accumulo di energia rappresentano un elemento strategico per il risparmio energetico, per un ulteriore sviluppo delle fonti rinnovabili sia sul versante della produzione di energia elettrica sia su quello dell'energia termica.

L'offerta di energia non è sempre in fase temporale con la domanda quindi si rendono necessari sistemi di filtraggio, compensazione e di accumulo. I sistemi di accumulo di energia dipendono fortemente dalla tipologia di carico termico ed elettrico. Grandi utenze di energia presentano soluzioni diverse rispetto a quelle di piccola scala, come quelle domestiche o comunque di media taglia. In questa sezione l'argomento dell'analisi dei sistemi di accumulo termico è ristretta alle sole utenze di piccola e media taglia e sono trascurati i sistemi di accumulo che coinvolgono le grandi utenze.

Il sistema di accumulo termico (TES: Thermal Energy Storage) è in realtà un processo di accumulo, in quanto coinvolge necessariamente la variabile tempo e consta di tre operazioni distinte: il carico dell'energia, il vero e proprio accumulo energetico ed infine il processo di scarico dell'energia accumulata. L'accumulo di energia termica vero e proprio si può ottenere evidenziando innalzamenti o decrementi di temperatura (calore sensibile) nel mezzo utilizzato tipicamente acqua, rocce o terreno, oppure sfruttando i cambiamenti di fase (calore latente) utilizzando materiali PCM (Phase Change Material) che sono impacchettati in contenitori tecnici (come scatole, borse plastiche) oppure direttamente inseriti in pacchetti strutturali delle abitazioni come pareti o soffitti.

Le applicazioni più comuni dell'accumulo termico nelle piccole abitazioni sono da sempre legate allo sfruttamento delle fonti rinnovabili poiché nella maggior parte dei casi le fonti rinnovabili che si sono più sviluppate negli ultimi anni (eolico e fotovoltaico per la generazione di energia elettrica) sono legate ad una produzione intermittente

che non è sempre esattamente prevedibile. Quali siano attualmente le effettive potenzialità di mercato del sistema di accumulo termico a servizio dell'utenza domestica sono ancora oggi difficili da stabilire, nonostante la maturità tecnica di molti sistemi sia assodata, così come la loro disponibilità commerciale anche in Italia. Così la principale barriera ad un loro largo impiego è la loro integrazione architettonica e quindi la riduzione degli spazi necessari e la durata di certe soluzioni compatte. Un confronto tra le possibili soluzioni per un sistema di accumulo per applicazioni domestiche è riportato in Tabella 19.

Tabella 19. Sistemi di accumulo possibili per impieghi in ambito domestico

Dati termici e tecnici	Serbatoi di cemento e acciaio	Bacino isolato superior-mente	Bacino non isolato	Rocce o caverne	Acquifero	Terreno	Tubi verticali inffissi in argilla	Pozzi e perfora-zioni
Capacità termica specifica [kWh/m^3 K]	1,16	1,16	1,16	1,16	0,75	0,70	0,8	0,63
ΔT di riferimento [K]	55	55	55	55	55	55	15	55
Tipica efficienza di accumulo [%]	90	85	70	80	75	60	70	70
Fattore di conversione [kWh/m^3]	57	54	45	51	31	23	8	24
Ingombri [10^{-3} m^3]	0-100	0-75	0-50	50-300	50-500-	0-100	50-300	50-400
Investimento [€/m^3]	300-500	250-450	80-160	160-250	50	100-200	10-20	60-80

Una tecnologia emergente per il riscaldamento/condizionamento degli edifici è rappresentata dal sistema SESHPS (Solar Earth Source Heat Pump System). Il principio di funzionamento della tecnologia SESHPS si basa sull'idea di combinare gli effetti dell'energia solare e del terreno e di utilizzarli come sorgente di una pompa di calore. Infatti il terreno rappresenta un'efficace alternativa all'aria come sorgente esterna di calore a causa della sua elevata inerzia termica. Già a moderata profondità (dell'ordine di 1 metro), risente poco delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali, al punto che la sua temperatura si può considerare pressoché costante per tutto l'anno. Ciò porta ad avere differenze di temperatura tra sorgente termica e ambiente da climatizzare inferiori rispetto a quanto si avrebbe utilizzando l'aria esterna come sorgente termica, con conseguente miglioramento dell'efficienza dell'impianto e minori costi operativi.

È stata condotta una simulazione di lungo termine per l'intera stagione invernale (Novembre–Febbraio) considerando una sonda geotermica di 17 m di lunghezza e 25 mm di diametro, con portata di acqua di 0,28 kg/s (temperatura di ingresso 0 °C), e una temperatura iniziale del terreno di 12 °C. Essendo il sistema modulare, lo si può scalare ad ogni potenza desiderata moltiplicando adeguatamente il numero dei moduli. I risultati sono mostrati nella Figura 46 e Figura 47. Si nota che con una scelta appropriata dell'area dei pannelli si può raggiungere il pareggio di bilancio su base stagionale tra l'energia estratta e reimmessa nel terreno, contrastando significativamente la deplezione termica del medesimo.

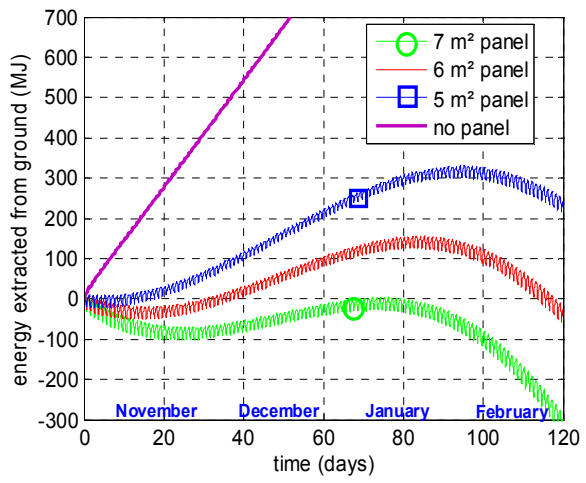


Figura 46. Energia totale estratta dal terreno durante l'intera stagione

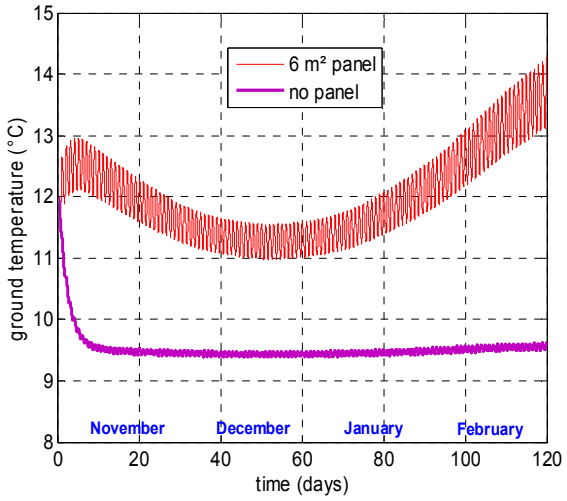


Figura 47. Temperatura del suolo a 200 mm dalla superficie della sonda

In sintesi, i risultati della simulazione mostrano che, sebbene un bilancio giornaliero dell'energia iniettata nel suolo durante il giorno e recuperata durante la notte non sia possibile (almeno in questo modo di operazione), si può raggiungere un bilancio stagionale contrastando efficientemente la deplezione termica del terreno.

Indagini tecnologiche e valutazioni di impatto dei sistemi di accumulo

L'attività si è concentrata una valutazione sulle applicazioni delle batterie al litio nelle reti elettriche, con un'indagine sui sistemi alternativi proposti in competizione. L'analisi riguarderà anche l'accumulo termico. Sarà inoltre analizzata e progettata la campagna sperimentale per la verifica del prolungamento della vita utile delle batterie al litio usate nei veicoli elettrici, per aumentarne la vita ciclica e, conseguentemente, il valore economico.

Reimpiego delle batterie al litio dei veicoli elettrici per applicazioni stazionarie

L'elevato costo delle batterie al litio può rappresentare un freno alla diffusione dei veicoli elettrici, in particolare quando si consideri che il progressivo ridursi della capacità ciclica della batteria necessita che le batterie vengano dismesse quando ancora è disponibile una capacità ciclica dell'80%, per evitare di degradare pesantemente l'autonomia del veicolo. In applicazioni stazionarie questo degrado è molto meno critico, in particolare quando si considerano applicazioni che richiedono servizi in potenza più che in energia. Inoltre, mentre per applicazioni veicolari il peso ed il volume occupato rappresentano un vincolo stringente, nelle applicazioni stazionarie è sempre possibile aumentare la taglia del sistema per compensare il progressivo degrado delle sue prestazioni.

Prestazioni delle batterie ricondizionate e procedure di prova

I laboratori SANDIA hanno condotto un approfondito studio di fattibilità del reimpiego di varie tipologie di batterie dei veicoli elettrici, in particolare per valutare quanto la possibilità di un prolungamento della vita utile possa consentire una riduzione dei costi per la prima applicazione. Lo studio ha consentito inoltre di definire una procedura di caratterizzazione delle celle una volta ritirate dai veicoli, in modo da poter realizzare batterie con una distribuzione ottimale degli elementi da riutilizzare.

Allo stato attuale già esiste un mercato piuttosto affermato di batterie ricondizionate derivanti da applicazioni automobilistiche, carrelli elevatori, illuminazione e laptop computer. In Messico batterie nichel idruri metallici recuperate da prototipi o da sperimentazioni su veicoli elettrici sono impiegate in sistemi ibridi accoppiate a fotovoltaico. Lo studio prodotto dai laboratori Argonne ha mostrato che le prestazioni delle batterie nichel idruri metallici recuperate da veicoli elettrici hanno prestazioni paragonabili a batterie al piombo nuove.

Se quindi, da un lato, non vengono riscontrate difficoltà tecniche ad implementare un programma di reimpiego delle batterie usate, dall'altro sono stati identificati alcuni elementi che potrebbero rendere complessa la gestione del processo:

- la presenza di moduli non standardizzati e le differenti modalità di impiego dei veicoli può rendere complesso realizzare batterie con celle con prestazioni simili, o comunque idonee a lavorare in combinazioni serie-parallelo;
- l'importanza della definizione delle modalità con cui il servizio che le celle svolgeranno nel secondo impiego verrà valorizzato nei confronti dell'acquirente originario del veicolo elettrico, ovvero in quale modo tali servizi comporteranno una riduzione del costo del veicolo e del rimpiazzo delle batterie;
- la quantificazione delle prestazioni residue e la definizione di elementi di garanzia per le nuove applicazioni possono risentire delle incertezze derivanti dalla scarsa esperienza ad oggi maturata;
- la sensibilità dell'utilizzatore nel percepire il corretto valore delle batterie reimpiegate rispetto a quelle nuove.

Valorizzazione dei servizi

I servizi identificati per le principali applicazioni stazionarie sono stati valorizzati per consentire di determinare la validità economica del processo. Sulla base dei dati SANDIA, i principali servizi offerti da sistemi di accumulo possono essere valorizzati come riportato nella Tabella 20, che presenta il valore attuale netto atteso da un servizio di 10 anni espresso in €/kWh.

Tabella 20. Valore attuale netto (€/kW su 10 anni) dei benefici economici attesi per i servizi di rete

POWER SERVICES							ENERGY SERVICES			
Security					PQ	Access	Security	PQ	Access	Energy effic.
Peak shaving (generation capacity)	Congestion resolution	Islanding	Ramp	Black Start-up	V regulation, active filter, dip, flicker, microinterr.	Peak shaving (network capacity)	Load leveling Valley filling	Medium and long interruptions	Network capacity (several hours/day)	Primary conversion and transport losses
400 ÷ 600	50 ÷ 150	1000 ÷ 1200	600 ÷ 800	180 ÷ 200	350 ÷ 800	250 ÷ 300	400 ÷ 600	250 ÷ 400	250 ÷ 400	90 ÷ 120

Stima dei costi del processo di ricondizionamento

In linea di massima le valutazioni condotte nel report SANDIA consentono di arrivare a definire un costo per il pacco batterie ricondizionato pari a circa 150 $/kWh, tenuto conto del prezzo di acquisto delle batterie usate, della riduzione della loro capacità, dei costi associati ai test necessari a caratterizzare le celle e al loro riassemblaggio in pacchi idonei alla seconda applicazione. Sebbene i dati si riferiscano a batterie Nichel idruri metallici, i valori non sono differenti per le altre tipologie di batterie, che siano al piombo o al litio. L'unica differenza, anche se minimale, può essere associata alla componente relativa al BMS che, nelle batterie al litio, assume un peso leggermente superiore.

Va sottolineato che i valori riportati si riferiscono ai risultati di uno studio volto ad individuare possibili impieghi di tali batterie con la finalità di ammortizzare i costi delle batterie per i veicoli elettrici, consentendo o di ridurre il prezzo di vendita dei mezzi, o di aumentare il prezzo di ritiro delle batterie alla fine della loro vita utile per l'applicazione veicolistica. Quando invece ci si ponga nell'ottica dell'operatore che, indipendentemente dalle interrelazioni col mercato dei veicoli elettrici, necessiti di realizzare un sistema di accumulo per qualsivoglia applicazione, la disponibilità di batterie a circa 150 $/kWh, anche se con vita utile residua ridotta, costituisce sicuramente una valida opzione da tenere in conto, rispetto all'acquisto di batterie nuove.

Principali soggetti esterni coinvolti

Università di Bologna

L'Università di Bologna ha collaborato con ENEA sui materiali catodici della famiglia delle olivine. Le attività dell'Università di Bologna hanno riguardato la ricerca di nuovi materiali catodici di struttura olivinica (a base di composti del ferro e/o del manganese) per celle litio-ione. I materiali sono stati scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e basso impatto ambientale. I materiali sono stati selezionati, dopo una breve indagine preliminare, per produrre composizioni catodiche ottimizzate da caratterizzare in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti sono stati costruiti e caratterizzati gli elettrodi in celle di riferimento. In particolare, l'attività è stata indirizzata verso:

- l'ottimizzazione della formulazione di elettrodi a base di $LiFePO_4$ commerciale e loro caratterizzazione come materiali catodici in etilencarbonato (EC) dimetilcarbonato (DMC) – $LiPF_6$; la sintesi di $LiMnPO_4$ e di $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$ e caratterizzazione elettrodi a base di tali materiali in EC:DMC-$LiPF_6$;
- la preparazione di celle complete litio-ione e la loro caratterizzazione secondo Protocolli ENEA, con elettrodi bilanciati (anodi preparati dall'Università di Camerino e catodi preparati dall'Università di Bologna).

Università di Camerino

L'Università di Camerino ha collaborato con ENEA sulle problematiche legate all'uso della grafite, che costituisce il principale materiale anodico utilizzato nelle batterie al litio attuali, che sono legate principalmente alla relativa instabilità dello strato di passivazione (SEI), problemi cinetici (non elevata velocità di carica e scarica specialmente a basse temperature causata dal carattere di semiconduttore della grafite con conseguente aumento della resistenza al diminuire della temperatura). In questo contesto sono stati studiati modi per aumentare le cinetiche di intercalazione/deintecalazione attraverso modificazioni superficiali (parziale ossidazione che potrebbe portare alla formazione di SEI più stabili) ed inclusione di elementi conduttivi (particelle metalliche con dimensioni

nanometriche) che invertano il coefficiente termico della resistenza degli elettrodi. Inoltre sono stati studiati anodi alternativi quali il titanato di litio che, pur a potenziali più positivi della grafite, non presenta problemi cinetici. In questo caso il titanato potrebbe essere supportato su opportune matrici carboniose. L'Università di Camerino ha collaborato inoltre con l'ENEA e gli altri istituti universitari alla progettazione e prova di celle complete da laboratorio.su materiali catodici della famiglia delle olivine.

Università di Napoli

L'Università di Napoli ha collaborato con ENEA al miglioramento delle condizioni di utilizzabilità dei supercondensatori in sistemi di sollevamento industriale, quali il carroponte. L'attività si è concentrata sul miglioramento della formulazione dell'algoritmo, prevedendo l'introduzione di uno stato aggiuntivo che permetta ai supercondensatori di scaricarsi sulla rete se la modalità operativa del carroponte tende a ricaricarli oltre le loro tensioni massime ammissibili. Nel nuovo stato di funzionamento, l'algoritmo di controllo ha portato i supercondensatori ad un valore di tensione tale che essi possono offrire tutte le loro potenzialità in termini di scarica e di ricarica, indipendentemente dall'andamento del carico nel successivo ciclo di lavoro. Le attività sono state un misto di simulazioni e miglioramento dell'algoritmo, confermate da attività sperimentali svolte insieme all'ENEA nella stazione di prova appositamente allestita negli anni di attività precedenti.

Università di Palermo

Ha condotto un'analisi dello stato dell'arte su tutti gli aspetti della ricerca sopra indicati, ha svolto un'analisi e definito gli obiettivi e le metodologie di controllo della rete, con particolare riguardo al ruolo potenziale dei sistemi di accumulo, ha contributo a definire le principali specifiche dei sistemi di controllo e d'interfaccia dei sistemi di accumulo, in relazione al loro possibile ruolo nella gestione dell'intera rete, ha contribuito a sviluppare e validazione in ambiente simulato di metodologie e strategie di controllo.

Università di Pisa

Ha collaborato con l'ENEA nell'analisi preliminare su metodologie e tecniche di controllo e di interfaccia dei sistemi di accumulo con la rete, in collaborazione anche con l'Università di Palermo. In particolare, l'Università di Pisa ha analizzato, anche in una configurazione innovativa, a valutare il possibile ruolo dei sistemi di accumulo ee le necessità di interfaccia verso la rete per:

- partecipare alla regolazione della tensione e della frequenza della rete;
- implementare logiche di demande-response, in relazione ad alcune potenziali utenze dotate anche di sistemi di accumulo;
- partecipare ad una gestione ottimale, in termini tecnico-economici, di tutte le risorse di rete (fonti energetiche e unità di accumulo);
- contribuire ad elevare i livelli di qualità del servizio elettrico, non solo in termini di continuità ma anche di qualità della tensione.

Ha collaborato anche alla definizione e validazione dei modelli e del sistema di controllo di un sistema di accumulo con batterie al litio mediante il dimostratore che da installarsi sulla funicolare di Bergamo; ha inoltre proposto un progetto dimostrativo della casa attiva con un'analisi di possibili utenze attive, anche di generazione con fonti rinnovabili, e delle caratteristiche della microrete di alimentazione. anche con le specifiche per il sistema dell'accumulo termico. Infine, ha collaborato alla valutazione dei vantaggi tecnici ed economici per la definizione della campagna sperimentale per la verifica del prolungamento della vita utile delle batterie al litio usate nei veicoli elettrici, per aumentarne la vita ciclica e, conseguentemente, il valore economico.

Università di Roma "La Sapienza"

L'Università di Roma ha collaborato con l'ENEA sulle attività riguardanti i materiali attivi catodici a base di litio-ferro fosfato nanostrutturato con lo studio e la messa a punto dei processi di sintesi per "via umida". I materiali sono stati selezionati in base alle caratteristiche nominali (in termini di capacità e energia), costo e impatto ambientale, mediante opportune prove elettrochimiche. Inoltre l'Università di Roma ha anche studiato la sintesi e caratterizzazione di nuovi materiali anodici a base di ossido di titanio da utilizzare nelle celle complete. Tutti i materiali sintetizzati e/o acquistati sono stati caratterizzati, presso l'Università di Roma e l'ENEA, in termini di stechiometria, purezza, morfologia, granulometria, area superficiale e stabilità termica. Infine, i materiali e gli elettrodi opportunamente individuati sono stati utilizzati in celle complete da laboratorio, specificatamente progettata, di piccola taglia, ma in grado di consentire una piena valutazione sperimentale delle prestazioni specifiche (in potenza ed/o in energia) delle applicazioni alle reti elettrici.

Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

(Referente P. Meloni)

La 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.

La fonte nucleare ha tutti i requisiti per fornire risposte efficaci alla problematica energetica ed il Governo ha pertanto stabilito un nuovo quadro legislativo (legge 133/2008, legge 99/2009, Decreto Legislativo n. 31 del 15 febbraio 2010) che ha posto le basi per la riapertura dell'opzione nucleare nel nostro Paese.

Il sistema della ricerca, ed in particolare l'ENEA, gioca un ruolo chiave nel rilancio del nucleare, in termini di valutazione e miglioramento delle tecnologie esistenti, messa a disposizione di competenze e infrastrutture per la qualifica di sistemi e componenti, sviluppo di nuove tecnologie più sostenibili, ampliamento e rafforzamento della rete di collaborazioni internazionali nel settore.

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. Infatti, l'interiorizzazione delle performance dei sistemi nucleari delle successive generazioni e dei relativi cicli del combustibile in termini di sostenibilità, sicurezza, economicità e resistenza alla proliferazione, permetterà di supportare adeguatamente da un lato le scelte governative e, dall'altro, la riqualificazione ed il potenziamento del sistema industriale.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, ma tenuto anche conto che la ricerca di sistema in campo nucleare è, per sua natura, di medio-lungo periodo, si ritiene necessario assicurare la continuità e l'ulteriore sviluppo delle attività tecniche già avviate nelle precedenti annualità.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Il prodotto finale dell'attività è costituito da:

- una serie di attrezzature, laboratori e prove sperimentali, modelli, programmi e piattaforme di calcolo validati per la progettazione nucleare;
- analisi di sistema e di sicurezza di sistemi nucleari innovativi e relativi cicli del combustibile;
- progettazioni concettuali e qualifiche di componenti e sistemi per impianti evolutivi/innovativi;
- sviluppo di tecnologie avanzate per il trattamento e lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi;
- sviluppo di materiali innovativi;
- studi sul nuovo nucleare;
- valutazioni di opzioni scientifiche e tecnologiche, ecc..

Come previsto il tema "Nuovo Nucleare da Fissione" riguarda:

- attività di R&S mirate 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;
- attività di R&S relative alle fenomenologie di base di dispersione di contaminanti in un deposito definitivo di rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo di rifiuti di III categoria;
- supporto all'Autorità di sicurezza per gli iter autorizzativi e comparazione delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche;
- mantenimento delle competenze scientifiche, degli strumenti analitici e delle infrastrutture necessarie alla valutazione delle performance dei sistemi nucleari innovativi e dei relativi cicli del combustibile in termini di sostenibilità, sicurezza, economicità e resistenza alla proliferazione ;
- qualifica componenti innovativi per sistemi nucleari di quarta generazione a metallo liquido;
- sviluppo competenze e implementazione laboratori per la caratterizzazione termo-fluidodinamica del refrigerante e dei materiali strutturali per sistemi nucleari refrigerati a metallo liquido pesante;
- funzione Advisor in tema di energia nucleare.

Il programma supporta solamente progetti proposti e portati avanti nell'ambito di grandi iniziative internazionali/europee o di programmi bilaterali svolti in collaborazione con istituzioni di ricerca di Paesi coi quali l'Italia ha siglato accordi nel campo dell'energia nucleare.

Il prodotto finale dell'attività è costituito da una serie di attrezzature e prove sperimentali, programmi e piattaforme di calcolo, analisi di sistema e di sicurezza, progettazioni concettuali di sistemi e componenti per impianti evolutivi/innovativi, sviluppo di tecnologie per il trattamento e lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi, studi, valutazioni di opzioni scientifiche e tecnologiche, ecc.. A tali prodotti si accompagna un'azione di formazione scientifica e di comunicazione sui vari aspetti dell'utilizzo dell'energia nucleare. Tutto ciò al fine di contribuire allo sviluppo delle competenze e delle infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per la valutazione degli impianti nucleari attuali e per partecipare allo sviluppo degli impianti nucleari di nuova generazione.

Le competenze e le infrastrutture impiegate o sviluppate nell'ambito di questo tema costituiscono un insieme di capacità multidisciplinari che, in collaborazione e sinergia con altri soggetti del settore, sono in grado di: partecipare alle attività ed alle maggiori iniziative europee ed internazionali di R&S nel campo del nucleare sostenibile, garantire il necessario supporto tecnico-scientifico all'autorità di sicurezza per gli iter autorizzativi, riqualificare il sistema industriale italiano, in vista di una possibile partecipazione alla realizzazione di prototipi di impianti nucleari innovativi previsti dall' European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) dell'European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan).

Tutte le attività del Nuovo Nucleare da Fissione sono state organizzate nelle seguenti 5 linee progettuali:

- Studi sul nuovo nucleare
- Reattori evolutivi
- Reattori di IV Generazione
- Rifiuti radioattivi
- Qualifica di componenti e sistemi

Studi sul nuovo nucleare

La linea progettuale 1 è caratterizzata da attività di studio, di valutazione e di advising ed è articolata su 6 obiettivi che pervadono l'intera durata del progetto. Tali attività hanno lo scopo 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 individuati in questa annualità sono essenzialmente la naturale prosecuzione di quanto fatto nel corso delle precedenti annualità, e riguardano:

Prosecuzione del supporto al Ministero dello Sviluppo Economico - DGENRE per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali.
Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali (NEA, IAEA, EURATOM, GIF, IFNEC, ecc.).
Partecipazione al Progetto internazionale OECD-NEA "Halden Reactor Project".
Studi per la sicurezza dei reattori nell'ambito dell'Accordo ENEA-IRSN.
Studi di meccanica strutturale e relativa normativa tecnica nell'ambito dell'Accordo ENEA-CEA.
Prosecuzione degli studi di scenario, valutazioni economiche e partecipazione al Gruppo Internazionale IAEA-NEA Uranium Group".

Nel seguito per ogni obiettivo sono descritte le attività svolte ed evidenziati i risultati più significativi ottenuti.

Prosecuzione del supporto al Ministero dello Sviluppo Economico

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 nonché al gruppo di lavoro per la stesura del documento sulle strategia nucleare del Governo. Le attività svolte si articolano secondo i temi riportati di seguito:

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

Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali

Partecipazione ai comitati e gruppi internazionali sul nucleare da fissione

ENEA ha intensificato il ruolo istituzionale di "focal point" e di "Advisor" per le tematiche scientifiche e tecnologiche nel campo dell'energia nucleare ed è stata presente nei principali comitati ed organizzazioni che si occupano di energia nucleare sia a livello nazionale che internazionale (NEA-Nuclear Energy Agency, IAEA-International Atomic Energy Agency, etc.). In particolare ENEA ha assicurato la presenza di rappresentanti ed esperti italiani nella quasi totalità di NEA Standing ommittees (NSC – Nuclear Science Committee, NDC –Nuclear Development Committee, 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 al rappresentante nello Steering Committee, e in un numero elevato di Technical Working Groups (TWG) permanenti dell'IAEA.

Anche riguardo a rapporti bilaterali, la firma di accordi di cooperazione con La Francia, e specificatamente tra ENEA e CEA ed ENEA e IRSN sono stati oggetto di diversi incontri a livello di presidenze e di Steering Committee .

Il Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica (CIRTEN), rappresentato dal prof. G. Forasassi, in qualità di co-beneficiario dell'Accordo di Programma con il Ministero per lo Sviluppo Economico suddetto, anche per la seconda annualità, ha svolto un ruolo istituzionale importante nell'ambito della formazione ed informazione e delle attività scientifiche e tecnologiche di R&D nel campo dell'energia nucleare. Il CIRTEN è stato presente nelle principali organizzazioni che si occupano di energia nucleare, sia a livello nazionale che internazionale, (ENEN-European Nuclear Education Network Association, WNU-World Nuclear University, INSTN-National Institute for Nuclear Science and Technology, etc.) ed ha assicurato la partecipazione dei suoi rappresentanti in gruppi di lavoro internazionali.

Ricercatori ENEA sono anche presenti come rappresentanti italiani e/o esperti per "G8 Nuclear Safety and Security Group", "Comprehensive Test Ban Treaty (CTBT) rionuclide Expert Group".

Particolare attenzione è stata riservata ai Comitati europei rilevanti per le politiche nucleari comunitarie, in particolare SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technical Platform), Executive Committee e Gen II/III Working Group, ESNIII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) ed EERA (European Energy Research Alliance, Joint Programme *on Nuclear Materials JPNM).*

Sviluppo NESA_Italy

Le azioni per lo sviluppo di un NESA (Nuclear Energy System Assessment) Italia sono state avviate nell'ambito della partecipazione ENEA al Progetto INPRO della IAEA, nel cui Steering Committee l'Italia è rappresentata da ENEA.

Il NESA è una delle aree di attività principali del International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) iniziato nel 2000 al fine di assicurare la disponibilità dell'energia nucleare a contribuire al soddisfacimento delle necessità energetiche del 21° secolo in modo sostenibile, nell'ipotesi che le preoccupazioni sulle risorse energetiche, i cambiamenti climatici, e la security energetica suggeriscano un ruolo importante per il nucleare nei confronti delle necessità energetiche del secolo in corso.

Il NESA consiste nell'analisi di un sistema energetico nucleare, concepita secondo un "approccio olistico" (ambiente-sostenibilità, sicurezza, protezione fisica, non proliferazione, gestione rifiuti, infrastrutture, economia) che fa uso della Metodologia INPRO internazionalmente riconosciuta, a supporto di un piano strategico e decisionale sull'utilizzo a lungo termine dell'energia nucleare.

Nel contesto nazionale di rilancio dell'opzione nucleare, nella prospettiva pre-Fukushima e pre-referendum del giugno 2011, di 13 GWe installati al 2030, esso si configura come un'azione di supporto fondamentale alla strategia energetica del Paese. Secondo l'esperienza di altri paesi, il NESA è un'attività di dimensioni rilevanti che necessita tra l'altro di un "team nazionale" di rappresentanti delle varie istituzioni con cui interloquire per i vari aspetti (es. MSE, Min.AMB, Min.Interni, Utilities, Industria, Università, Organismo per il decommissioning e smaltimento waste, Agenzia Sicurezza Nucleare).

Le risorse hanno permesso di conseguire l'obiettivo preliminare di identificare e definire il quadro di base dell'attività relativamente a contesto, metodologie, condizioni e procedure, per il possibile sviluppo successivo della stessa. Il rapporto comprende, inoltre, un'Appendice che fa una review completa dei requisiti e criteri della Metodologia INPRO sulla sicurezza nucleare.

Nel corso del 2011 lo Steering Committee del Progetto INPRO, avvalendosi dei vari contributi dai delegati nazionali, ha lavorato alla definizione del "INPRO Action Plan 2012-2013" e della "Vision for INPRO's Development to 2016", nei quali il NESA continua ad essere un'area di attività fondamentale.

Sviluppo delle principali metodologie per valutare la resistenza alla proliferazione e protezione fisica e loro applicazione a sistemi innovativi

In questo rapporto viene presentato lo stato di sviluppo e applicazione a sistemi innovativi delle principali metodologie internazionali messe a punto per valutazioni di resistenza alla proliferazione e protezione fisica: si tratta di quelle messe a punto in ambito GIF dal PR&PP (*Proliferation Resistance and Physical Protection*) Working Group e IAEA in INPRO. In particolare sono state sottolineate le attività di armonizzazione delle due metodologie per meglio rispondere alle esigenze dei fruitori delle stesse, tra cui decisori politici, progettisti e operatori. Il concetto di salvaguardabilità e il processo *Safeguards-by Design* sono stati utilizzati in alcuni paesi per nuovi impianti nucleari e hanno dimostrato i vantaggi, anche dal punto di economico, derivanti dall'introduzione delle misure di salvaguardia fin dall'inizio della progettazione.

L'ENEA, oltre alle attività del GIF PR&PP WG, di cui fa parte come "alternate del rappresentante EURATOM, continua a seguire l'iniziativa IAEA "*Options to Enhance Proliferation Resistance and Security of NPPs with Innovative SMRs*". Lo scopo è la produzione di un documento Energia Nucleare/IAEA-TECDOC con il titolo (provvisorio) **"***Framework for the Application of Assessment Methodologies for Proliferation Resistance of Innovative Small and Medium Sized Reactors*", ora in fase di finalizzazione, che fornisca indicazioni su come effettuare valutazioni di resistenza alla proliferazione per progetti nazionali di sistemi nucleari innovativi. Il documento combina entrambe le metodologie GIF e INPRO che, nonostante siano state sviluppate per scopi diversi– detentori della tecnologia GenIV da un lato e utilizzatori di reattori innovativi nell'altro, possono essere applicate ad ogni tipo di ciclo e impianto nucleare. Il contributo ENEA è stato un approccio originale, qui descritto, che può trasformarsi in uno strumento efficace per i progettisti nelle prime fasi del progetto per affrontare la tematica e migliorare le caratteristiche di resistenza alla proliferazione di un sistema nucleare.

Review sullo stato di sviluppo dei reattori di piccola-media taglia di tipo modulare

La IAEA-International Atomic Energy Agency definisce reattori di piccola taglia quelli fino a 300 MW e reattori di media taglia quelli fino a 700 MW; tutti assieme essi sono indicati con SMR – Small and Medium Reactors. Dagli anni 1950 in poi la taglia dei reattori nucleari è andata crescendo dai 60 MW a più di 1600 MW, portando ad economie di scala per costruzione e funzionamento. Nello stesso tempo sono stati costruiti centinaia di reattori di piccola potenza per uso navale e come sorgenti di neutroni, ottenendo un vasto know-how nell'ingegneria dei reattori piccoli e medi. Quando si parla di produzione di energia elettrica, "reattore nucleare di piccola-media taglia" non significa necessariamente "impianto nucleare di piccola-media taglia".

L'alto costo capitale dei grandi reattori di potenza che generano elettricità attraverso il ciclo del vapore, assieme alla necessità di fornire elettricità a reti al di sotto dei 4 GW sta dirigendo l'interesse dell'industria verso lo sviluppo di unità più piccole. Queste possono essere costruite indipendentemente come moduli di un impianto di potenza maggiore, che può essere incrementato gradualmente sulla base dell'effettiva richiesta.

Le economie di scala vengono comunque realizzate sulla produzione in grandi numeri. Inoltre le piccole unità sono funzionali all'installazione in siti remoti. Le principali caratteristiche richieste ai reattori di piccola-media taglia specifiche per il requisito della modularità sono:

- semplicità di progetto,
- economicità di produzione in grandi numeri,
- ridotti costi di localizzazione.

Inoltre – comune anche ai reattori di taglia superiore – c'è il requisito di alto livello di sicurezza passiva o intrinseca in caso di malfunzionamento, che tuttavia nei reattori di taglia piccola e media può essere realizzato molto più facilmente e con costi inferiori.
Alcuni reattori di media taglia (300-700 MW) ad acqua leggera/pesante sono già pronti per essere rilasciati a livello internazionale. Quanto ai reattori di piccola taglia, ce ne sono parecchi in avanzato stato di sviluppo; essi rientrano principalmente nelle seguenti tre categorie:

- LWR - Light Water Reactors, reattori ad acqua leggera, sia bollente (BWR-Boiling Water Reactor) sia pressurizzata (PWR-Pressurized Water Reactor);
- FNR - Fast Neutron Reactors, reattori a neutroni veloci;
- HTR – High Temperature Reactors, reattori ad alta temperatura, moderati a grafite.

I reattori ad acqua leggera presentano un rischio tecnologico più basso, mentre i reattori a neutroni veloci possono essere più piccoli, più semplici e con un più lungo tempo di operazione senza ricarica di combustibile. Un consorzio Giappone – USA - Russia sta inoltre sviluppando un reattore di piccola taglia a sali fusi (MSR – Molten Salt Reactor).

Nei documenti specifici viene presentato l'attuale stato di sviluppo dei reattori modulari di piccola e media taglia ed il potenziale di sviluppo per i prossimi 10-15 anni. I dati sono ricavati dalla letteratura più recente. L'investimento in ricerca e progettazione, fino alla produzione di reattori di piccola e media taglia quali quelli qui presentati appare di beneficio per l'industria nazionale per la varietà delle applicazioni, l'ampiezza del mercato internazionale, la possibilità di produrre autonomamente componenti di impianto.

Partecipazione al Progetto internazionale OECD -NEA "Halden Reactor Project"

I due deliverables previsti per quest'obiettivo sono raccolti in un unico documento congiunto ENEA-POLIMI-UNIPI (GRNSPG), che fa la review dello stato attuale del programma Halden Project, insieme alla definizione di alcune linee di R&S di possibile interesse nazionale, riferite essenzialmente ai reattori LWR evolutivi, rispettivamente per il Fuel&Materials ed Instrumentation &Control. Il documento include la proposta ENEA di riapertura della Partecipazione al Programma Halden Project.

Il rilancio della partecipazione italiana al "Halden Reactor Project" dell'OECD-NEA, centro internazionale di eccellenza nel dominio Fuel&Materials e Instrumentation and Control, era nell'intento di ricostituire-sviluppare competenze nei due specifici settori, a supporto del licensing ed esercizio dei reattori LWR di III Generazione che, nella prospettiva pre-Fukushima e referendum del giugno 2011, il programma nucleare nazionale prevedeva essere installati in Italia nel corso dei prossimi 20 anni. Le attività di R&D presso Halden Project si avvalgono di facilities fondamentali quali il reattore di ricerca da 25 MWt HBWR (Halden Boiling Water Reactor), HAMMLAB (Halden Man Machine Laboratory) e HVRC (Halden Virtual Reality Center).

L'attività di studio e sperimentazione sul comportamento del combustibile e materiali strutturali in reattore, si focalizza sulla determinazione dei margini operativi e di sicurezza, input fondamentali ai fini della progettazione e licensing. Gli aspetti di primaria rilevanza allo scopo, sono la risposta in regime transitorio, sia in funzionamento normale sia incidentale, rappresentativi dei reattori LWR commerciali attuali (PWR, BWR, VVER). I combustibili studiati vanno dal UO_2 standard e a base di Gd e Cr, al MOX (ossidi misti di U e Pu) e ai combustibili innovativi Inert Matrix (senza uranio), con un range di materiali di guaina che va dalle moderne leghe Zircaloy-2 e Zircaloy-4, a quelle speciali (es. M5, ZIRLO), più resistenti al danno da irraggiamento e corrosione. In particolare il sub-programme materiali del HRP è mirato al miglioramento delle conoscenze sul "ageing and degradation" finalizzate al plant lifetime extension. Nel dominio del comportamento incidentale viene posta particolare attenzione alla sperimentazione e studio dei fenomeni e processi rilevanti tipici delle condizioni quali LOCA (Loss Of Coolant Accident) e RIA (Reactivity Initiated Accident), in un'ottica che vede i criteri di sicurezza per il combustibile nucleare, l'approccio "best estimate", e la costituzione di un "engineering handbook" per la modellazione del combustibile, tutti elementi di supporto fondamentale per il licensing delle soluzioni avanzate dei reattori di III Generazione. Nell'area Man Technology Organisation (MTO), sinonimo di Instrumentation&Control, è rilevante l'attività relativa al "Plant control and monitoring" ove vengono studiati e implementati i miglioramenti dei sistemi per la verifica e validazione dei segnali, il monitoraggio delle performance, i sistemi di diagnostica d'impianto e di supporto-allarme, nonché un'importante attività sul tema Human Factors (HR). Un'attenzione specifica viene dedicata nel report all'attività di sviluppo pertinente la in-core instrumentation per la misura di parametri comportamentali fondamentali in combustibile e guaina, come, rilascio gas di fissione, temperature, swelling e creep; la definizione di modelli physics-based per il monitoring; la definizione di metodi per la validazione dei sensori d'impianto; la messa a punto dei modelli di ageing per la stima della vita residua dei componenti; la valutazione dell'invecchiamento dei cavi.

Temi di più specifico interesse nazionale sono il comportamento del combustibile e materiali strutturali in condizioni di alto burn-up e lunghi tempi di residenza in reattore, insieme alle tecnologie di Instrumentation&Control, in particolare mirati al supporto dei reattori LWR di III Generazione. Linee possibili di R&D per l'area Fuel and Materials sono identificabili in:

- combustibili UOX ad alto arricchimento e MOX per l'alto burn-up (>60 MWd/kg), combustibili e materiali di guaina, risposta del combustibile in condizioni di alto burnup, in regime di funzionamento normale e incidentale (es. materiali di guaina innovativi che contrastano-annullano la generazione di idrogeno in caso di LOCA o mancanza di DHR (Decay Heat Removal));
- comportamento dei materiali strutturali in corso di vita (ageing effect) e miglioramento della risposta;
- modelli di fuel rod design and performance;
- aspetti di back-end del ciclo combustibile (tecniche innovative di gestione e smaltimento del combustibile irraggiato e dei rifiuti nucleari, caratterizzazione, processi di trattamento e condizionamento, trasporto di

materiali nucleari, progetto concettuale del deposito e sitologia, analisi di sicurezza, addestramento degli operatori con tecniche avanzate di simulazione).

Le linee possibili per l'area MTO si ritiene possano essere:

- Nuovi requisiti per la sensoristica, la strumentazione e controllo derivanti dalle caratteristiche della nuova generazione di reattori nucleari (evolutivi/ innovativi).
- Sistema di automazione, controllo e supervisione avanzati (controllo remotizzato e supervisionato da sale manovra digitali e multi-unità).
- Utilizzo delle tecnologie di Realtà Virtuale per la progettazione, pianificazione delle attività di manutenzione, visualizzazione del processo, simulazione e addestramento degli operatori.
- Supporto allo sviluppo di un Simulatore ingegneristico di reattori evolutivi LWR in ENEA.

Altro aspetto non trascurabile, infine, è che la partecipazione ad HP offre anche l'opportunità di scuola/training per giovani ricercatori, insieme a quella di agire quale riferimento per lo sviluppo del simulatore ingegneristico in ENEA.

E' stato definito l'accordo (APA -Associated Party Agreement) con HP per il rilancio della partecipazione a partire dal 2011. La formula APA è stata ritenuta quella che meglio corrisponde alla disponibilità di risorse attuali, ed è nella prospettiva di costituire il primo gradino per il rilancio della partecipazione al programma triennale 2012-14 dell'HP, ove è prevedibile il coinvolgimento allargato ad altri attori nazionali (Industria, Enel, Sogin, Università).

Studi per la sicurezza dei reattori nell'ambito dell'Accordo ENEA-IRSN

L'accordo ENEA-IRSN è imperniato su tre temi fondamentali per il potenziale ruolo di ENEA come Technical Support Organization (TSO): radioprotezione, sicurezza (safety) e salvaguardie (security). L'obiettivo dell'accordo è di mettere in comune le reciproche esperienze nei settori della radioprotezione e della sicurezza al fine di favorire l'utilizzo sicuro e responsabile del nucleare civile. In tale contesto sono state attivate varie linee di attività di collaborazione che coinvolgono sia ricercatori italiani afferenti alle unità dell'ENEA con competenze nell'ambito della fissione nucleare che ricercatori francesi dell'IRSN.

Le attività di tale obiettivo prevedono lo sviluppo (con il coinvolgimento di due ricercatori dell'Agenzia che sono stati distaccati presso l'IRSN di Fontanay-aux-Roses, Parigi) di alcune funzioni del nuovo simulatore di ingegneria SOFIA destinate all'integrazione di modelli di impianti nucleari di nuova generazione (impianti PWR da 900 MWe, da 1300 MWe e da 1450 MWe) e la messa a punto di una nuova metodologia, basata sulle tecniche perturbative GPT (Generalized Pertubation Methods), per il calcolo dei coefficienti di sensitività delle quantità integrali misurate con i collettroni (SPND, dispositivi di misura neutronica) rispetto ai parametri considerati per valutare il *punto caldo* all'interno del nocciolo di un reattore nucleare di potenza. La metodologia consente anche di valutare l'effetto sulla qualità del sistema di rilevazione dovuto al possibile degradarsi dei dispositivi di misura durante il ciclo di vita del nocciolo. Questa informazione può essere utilizzata per poter predisporre una strategia di protezione adeguata in termini di qualità, numero e distribuzione dei collettroni.

Studi di meccanica strutturale e relativa normativa tecnica nell'ambito dell'Accordo ENEA-CEA

Nell'ambito del rinnovato Accordo ENEA-CEA, è continuata la collaborazione per lo sviluppo, implementazione e utilizzo del sistema di codici ad elementi finiti CAST3M per studi e verifiche di meccanica strutturale su reattori di nuova generazione III+ e IV.

In questo ambito, è continuata l'attività relativa all'adeguamento della procedura HTCTRAN per il trasferimento di massa e di calore nei calcestruzzi basata sul modello termo-igrometrico monofase di BAZANT. La necessità di affrontare studi ed analisi di crescente difficoltà, ha richiesto una riorganizzazione e potenziamento del software. Si è scelta la filosofia di conservare per la procedura HTCTRAN la caratteristica di strumento ingegneristico in grado di trattare gli scenari presenti negli edifici di contenimento di reattori nucleari, nei depositi di stoccaggio di rifiuti radioattivi a forte attività e nei sistemi di accumulo del calore per impianti solari termodinamici, casi in cui si hanno temperature intorno ai 600 °C. Sono state fatte modifiche al funzionamento del codice per trattare domini tridimensionali, in aggiunta al caso piano ed assialsimmetrico e per prendere in conto la dipendenza delle proprietà termo-igrometriche del calcestruzzo con la temperatura.

Riguardo alla seconda attività prevista, dopo l'acquisizione della versione 2010 della nuova normativa Francese RCC-MRx, è stato portato avanti un lavoro di analisi dei metodi per la valutazione della deformazione progressiva (Ratcheting) e della costruzione dell'Efficiency Diagram in particolare nei casi di creep signicativo o trascurabile ed in presenza o meno di irraggiamento.E' stato quindi costruito Il diagramma di "efficacità" su dati ottenuti su acciai austenitici SS316. La normativa Francese RCC-MRx è stata quindi comparata con le norme ASME equivalenti

(ASME Section NH appendix T) e per alcune combinazioni di carico per evidenziare peculiarità e conservativismi. Questa linea di attività è stata portata avanti con la collaborazione dell'università di Roma "La Sapienza".

L'ultima attività prevista ha riguardato l'analisi termomeccanica dell'influenza del fenomeno di Warm Pre-Stress (WPS) sull'integrità strutturale di acciai ferritici rappresentativi del Pressure Vessel di reattori nucleari a fissione. E' stato studiato coi metodi della meccanica della frattura l'incremento apparente della fracture toughness del materiale del vessel quando quest'ultimo è soggetto a raffreddamento per effetto di shock termici severi (PTS-Pressurized Thermal Shock) dovuti ad esempio a situazioni incidentali o a variazioni repentine delle condizioni operative dell'impianto. Sono stati messi a punto ed implementati in CAST3M dei modelli numerici per lo studio del WPS su provini cruciformi sottoposti a carico biassiale, finalizzati a simulare vari percorsi di carico e volti all'interpretazione dei risultati sperimentali ottenuti presso il CEA di Saclay. L'attività ha comportato uno stage di 10 gg presso il CEA di Saclay (sett. 2010), la partecipazione al 6° Progress Meeting NESC-VII (Gennaio 2011) e la partecipazione al 7° Progress Meeting NESC-VII (5-6 Luglio 2011). Il codice CAST3M è stato inoltre istallato sul sistema di calcolo CRESCO ed è adesso disponibile sulla piattaforma.

Prosecuzione degli studi di scenario, valutazioni economiche e partecipazione al Gruppo Internazionale IAEA-NEA Uranium Group"

Sono continuati sia gli studi di modelli economici, anche innovativi, principalmente in collaborazione con il CIRTEN, sia il monitoraggio di risorse e domanda mondiale di uranio, con evidenziata la situazione nazionale .

Riguardo gli studi di scenario, quest'anno si è affrontato in modo interdisciplinare uno scenario nazionale che prevedeva un parco reattori di tipo LWR. La maggiore ampiezza nei temi trattati - anche se basati su una ipotesi non più valida in seguito all'incidente di Fukushima, alle successive decisioni del Governo e ai risultati del Referendum – consente una contestualizzazione degli elementi da tenere in conto in un programma nucleare nazionale. Come tale il lavoro prodotto da ENEA e CIRTEN ha un valore anche nella mutata situazione politica.

Un altro studio, concluso prima di febbraio 2011, sempre in una ipotesi di introduzione dei reattori termici (LWRs) nello scenario italiano si riferisce all'impatto di alcuni parametri (es. burn-up) su certi indicatori di sostenibilità del settore nucleare. La base di riferimento di questi studi è il caso italiano, ma le valutazioni sono di carattere generale e applicabili ad uno scenario regionale e internazionale.

Validazione e applicazione dei modelli economico-finanziari per l'analisi di differenti parchi reattore costituiti da LWR di Generazione III+ (grande e medio/piccola taglia)

Sull'attività sono stati prodotti due deliverables separati, uno sugli studi economici e l'altro sulle risorse e domanda mondiali di uranio con riferimenti sia alla situazione europea che italiana.

Report studi economici

In questo documento vengono illustrate le valutazioni economiche di scenari di investimento in impianti nucleari di diversa dimensione. L'analisi è svolta mediante simulazioni di scenario svolte con il modello INCAS sviluppato dal Politecnico di Milano. In ragione della complessità di analisi, le simulazioni di scenario sono utilizzate come strumento di valutazione economica e di analisi dell'interazione di una molteplicità di fattori di input e di condizioni al contorno che caratterizzano un progetto di investimento nel nucleare.

Lo studio considera reattori ad acqua pressurizzata di diversa dimensione, includendo impianti di piccola-media taglia (SMR-Small-Medium modular Reactors). In considerazione del grande interesse manifestato dalle utilities a livello mondiale per gli SMR e in considerazione dello sforzo di ingegnerizzazione di questa categoria di impianto, condotto dai produttori mondiali, questo lavoro si focalizza sull'analisi comparata delle performances economiche dei reattori di grande dimensione (LR-Large Reactor) e degli SMR. La performance economica di ogni tipologia di investimento può essere valutata sia in termini assoluti, sia su base comparata.

Il modello, chiamato INtegrated model for the Competitiveness Analysis of the Small-Medium sized reactors (INCAS), è un riferimento concettuale per l'analisi economica comparata tra LR e SMR che permette di andare oltre al tradizionale paradigma economico dell'Economia di Scala. Al tempo stesso è un codice computazionale in grado di svolgere simulazioni di scenario complesse per ottenere risultati quantitativi riguardo agli indicatori di performance economico-finanziaria. L'analisi si applica a impianti SMR multipli, comparati ad un unico o più LR con equivalente potenza totale e fornisce un insieme esaustivo di indicatori economici relativi ad un investimento in una serie di impianti nucleari di diverse possibili dimensioni in diverse condizioni di scenario al contorno. Essa inoltre consente di valutare la competitività di SMR multipli, basandosi sulla modularizzazione degli impianti, sul processo di apprendimento nella costruzione e assemblaggio, economie sui costi fissi da parte di unità multiple, semplificazioni di layout di impianto e innovazioni di design rese possibili dalla ridotta dimensione di impianto. La modularizzazione si traduce in risparmi dovuti alla maggiore incidenza della fabbricazione in "mini-serie"; i fattori

specifici al design riguardano la riduzione dei costi conseguente alla riduzione dei componenti e a più efficienti e flessibili soluzioni di fornitura. Essi sono sintetizzati nella definizione di un "Design saving factor".

Inoltre, gli SMR non si presentano solo come impianti "modulari", ma anche come opzioni di investimento "modulare", con la possibilità di scaglionare nel tempo la costruzione di unità successive di impianto e investire i flussi di cassa generati dai primi impianti realizzati e attivi, nella costruzione dei successivi, oltre a consentire tempi di costruzione più brevi e minori tempi di rientro dei capitali investiti che alleggeriscono l'esposizione finanziaria. In sostanza, gli impianti di piccolo-media dimensione presentano vantaggi e caratteristiche tali da compensare parzialmente la perdita di economia di scala e di recuperare competitività economica rispetto alle unità di grande dimensione, a parità di output totale.

L'analisi di scenari di investimento deterministici ha messo in luce la sostanziale superiorità economica dei LR, fondata sull'economia di scala e quindi sui minori costi di costruzione: i valori deterministici attestano una migliore performance economica dei LR. Tuttavia, quando si considerano scenari stocastici che integrino nell'analisi l'incertezza delle condizioni al contorno, i risultati cambiano: unità multiple di SMR realizzano una profittabilità media superiore con una dispersione dei risultati più favorevole verso i valori positivi nelle "code" stocastiche.

Simulazioni di scenario condotte con il metodo Montecarlo mostrano che SMR multipli rappresentano una tipologia di investimento "modulare" capace di assorbire meglio condizioni sfavorevoli di scenario, rispetto ad un LR monolitico. Sulla base della competitività rispetto ai LR in termini di profittabilità e sulla base di una più robusta performance rispetto all'incertezza delle condizioni di input, gli SMR possono rappresentare un'interessante alternativa di investimento rispetto ai LR, non solo nei piccoli mercati in via di sviluppo, ma anche per l'estensione o la sostituzione degli impianti nucleari di potenza installati nei grandi mercati maturi e liberalizzati.

Report risorse-domanda uranio

Il documento riporta il quadro sintetico dello stato delle risorse-domanda di uranio a livello mondiale, che costituisce l'oggetto del Joint NEA-IAEA Uranium Group al quale l'ENEA partecipa.

Le previsioni al 2035, prima degli eventi di Fukushima, stimavano per l'energia nucleare una crescita a livello mondiale tra 500 e 785 GW netti. Di conseguenza anche per la richiesta di uranio relativa alla flotta mondiale di reattori veniva prevista una crescita consistente. Come già osservato in passato, l'incremento degli investimenti nell'esplorazione ha prodotto scoperte importanti di nuovi giacimenti e l'identificazione di nuove risorse. Viene previsto che, se le condizioni del mercato mondiale dell'uranio miglioreranno ulteriormente, nuove esplorazioni potranno essere intraprese con la prospettiva di identificare nuove risorse di interesse economico.

Le risorse totali identificate di uranio "identified resources (RAR + Inferred)" che ammontano a circa 6 Milioni di tU, come riportato nel rapporto NEA-IAEA "The 2009 Redbook", saranno sufficienti per circa 100 anni al tasso di consumo annuo attuale, relativo al parco mondiale reattori di 373 GW funzionanti in ciclo aperto (senza ritrattamento e riciclo del combustibile irraggiato), oppure circa 50 anni se si ipotizza il raddoppio della potenza totale installata rispetto al livello attuale.

Le risorse totali identificate sono complementate dalle total Undiscovered Resources (Prognosticated Resources & Speculative Resources) che al gennaio 2009 ammontano a più di 10 Milioni di tU.

Nella terminologia del Redbook, le RAR + Inferred insieme alle Prognosticated Resources & Speculative Resources, vengono chiamate Conventional Resources, che totalizzano circa 16 Milioni di tU.

Le risorse non-convenzionali "Unconventional Resources" che sono quelle ottenute come sottoprodotto dall'estrazione di alcuni minerali (es. fosfati) , sono stimati ammontare a circa 22 Milioni tU (di cui circa 7,5 Milioni appartengono al solo Marocco) e non sono incluse nelle risorse convenzionali, come pure non sono prese in considerazione nel computo totale delle risorse, quelle potenziali derivanti dall'uranio nell'acqua di mare (circa 4 Miliardi di tU).

Al crescere della domanda di uranio con l'espandersi del parco mondiale reattori, molto prevedibilmente anche gli investimenti per l'esplorazione e coltivazione delle miniere (exploration and mining) tenderà a crescere come verificatosi in maniera consistente nel periodo 2007-08 (raddoppio in due anni), e questo a sua volta comporterà molto verosimilmente un'espansione delle risorse identificate.

La produzione mondiale di uranio ha registrato un trend di crescita tra il 2006 e 2010 passando da circa 40000 a 54000 tU/anno, a fronte di una domanda globale che rimane nel periodo sotto la soglia di 60000 tU/anno.

L'Unione Europea è l'area mondiale con la più grande concentrazione di centrali nucleari (143 reattori) per una potenza di 131 GW. Il settore dell'uranio nel 2010 nella EU, secondo i dati della European Supply Agency, si caratterizza per un totale delle forniture di uranio alle utilities della EU-27, pari a 17,566 tU naturale, circa il 30% della domanda mondiale dell'anno. La provenienza dell'uranio naturale, per lo più sotto contratti di tipo long-

term, appare molto diversificata e sostenuta principalmente da Russia, Kazakhstan, Australia, Niger, Canada e Sud Africa-Namibia. Il prezzo medio long-term è stato di 62 €/kg U3O8 (11% di aumento), con il prezzo medio spot attorno a 79 €/kgU, anch'esso in aumento.

Nel RedBook 2011, in corso di elaborazione da parte dello Uranium Group, la situazione italiana appare essenzialmente "demand-side", in rifermento all'ipotizzato parco nucleare da 13 GWe capace di fornire il 25% della domanda elettrica al 2030 (prospettiva pre-Fukushima), essendo l'attività di exploration&mining nazionale ferma a fine anni '80 del secolo scorso, ove l'ammontare di risorse totali di uranio veniva stimata pari a circa 6100 tU-naturale. In accordo al timing ipotizzato per l'installazione del parco reattori nazionale, viene stimato che il primo approvigionamento di uranio di circa 1100 t si renderebbe necessario per il 2020, per aumentare a circa 25000 t di inventario cumulato al 2035 e con un consumo a regime pari a circa 1530 tU-naturale/anno.

Mentre lo stato del "supply and demand" viene considerato dal punto di vista delle tecnologie attuali, è da tener presente che l'introduzione delle nuove tecnologie sia per i reattori che per il ciclo combustibile (closed fuel cycle fast reactors) si tradurrà in un incremento drastico della disponibilità a lungo termine dell'uranio, con possibilità di estendere la stessa a livello di migliaia di anni.

Analisi di uno scenario nazionale parco reattori di tipo LWR di generazione III+

In questo rapporto vengono studiati alcuni aspetti del ciclo del combustibile, di impatto economico e ambientale , nell'ipotesi di uno scenario nucleare italiano. Vengono qui supposti, come caso studio, 8 reattori di tipo EPR, il primo dei quali in funzione a partire dal 2025.

I capitoli su cui il rapporto si struttura riguardano: le motivazioni per considerare l'opzione nucleare, evidenziando anche le questioni che rimangono controverse; i dati e i diversi scenari di crescita di energia elettrica per l'Italia; gli studi recenti effettuati per differenti scenari nucleari in Italia; l'analisi ed il confronto del flusso di attinidi nel ciclo del combustibile attraverso i codici di scenario COSI (CEA-EdF-AREVA), DESAE (Istituto russo Kurchatov) e con un semplice metodo analitico, quantificando masse in input ed output, evoluzione delle composizioni isotopiche e radiotossicità; alcune considerazioni sulla resistenza alla non proliferazione e sulla sicurezza nucleare; il *back-end* del ciclo nel caso di ciclo *once-through* (ovvero senza riprocessamento del combustibile); l'ipotesi di chiudere il ciclo del combustibile in un reattore veloce come quello a piombo (con riduzione di 2 ordini di grandezza sia delle risorse consumate che dei transuranici da stoccare); l'impatto sui costi dell'energia elettrica e sulle emissioni di CO_2 a seconda di diverse ipotesi di crescita e di mix energetico; considerazioni preliminari per una valutazione ambientale (approccio LCA e indicatori energetici).

L'obiettivo primario del rapporto rimane quello di mantenere e ulteriormente sviluppare le competenze in merito al ciclo del combustile nucleare. L'interesse è inoltre quello di creare una base di dati, di consolidare metodologie e di acquisire strumenti di calcolo (come i codici COSI e DESAE) che consentano, anche in ambito internazionale, analisi di scenari più complessi. In questo modo si riusciranno a valutare, in una visione di insieme (considerando i costi, la sicurezza, le risorse, l'impatto ambientale, ecc.), le implicazioni di diverse scelte sul ciclo e sui diversi impianti nucleari adottati.

Scenario italiano, introduzione di reattori termici

Il punto di partenza dello studio è il concetto di sviluppo sostenibile in accordo con le posizioni assunte dalla Comunità Europea in materia di sviluppo energetico (si veda *Strategic Energy Technology Plan* e *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*).

Il rapporto fa riferimento ai risultati ottenuti relativamente all'introduzione dei reattori termici (LWRs) nello scenario italiano. L'impatto di parametri quali il burnup allo scarico e la domanda energetica è stato quantificato relativamente agli indicatori scelti a priori relativi alla sostenibilità del settore nucleare. Tali indicatori sono: le risorse coinvolte, la radiotossicità del materiale mandato a deposito, il calore di decadimento del materiale mandato a deposito, e l'inventario dei rifiuti. È stata anche effettuata una valutazione preliminare sulla transizione da una flotta termica ad una flotta veloce con un reattore tipo ELSY, refrigerato a piombo.

I risultati riportati, sono stati presentati all' 11th IEMPT meeting della NEA/OECD (*Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation*, Novembre, 2010). Seppur la base di riferimento presa fosse il caso italiano, il lavoro è generalizzabile su scala Europea.

Reattori evolutivi

Le attività che sono state svolte in questa linea sono la naturale continuazione di quelle sviluppate nei precedenti anni e sono state suddivise nei seguenti macro-obiettivi:

- Realizzazione della facility integrale SPES-3 rappresentativa di sistema primario, sistema secondario e

contenimento di un reattore SMR modulare e di tipo integrato al fine di studiare la risposta dell'accoppiamento primario-contenimento durante incidenti di perdita di refrigerante e di validare gli strumenti di simulazione attualmente usati per le analisi incidentali (codici termo-idraulici di sistema). L'obiettivo è stato perseguito attraverso verifiche analitiche e sperimentali, approvvigionamento di componenti e sviluppo di strumentazione speciale;

- Sviluppo componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia che ha contemplato sia la verifica analitica e sperimentale su mock-up di componenti sia la qualifica di metodi di calcolo da utilizzare per la loro progettazione;
- Sviluppo di un simulatore ingegneristico di reattori evolutivi LWR per studi di sicurezza che in fase preliminare ha riguardato l'individuazione dei requisiti e l'analisi di quanto già disponibile;
- Analisi di sistema che sono state relative alla valutazione dei margini di sicurezza in caso di eventi sismici e altri eventi esterni come l'impatto aereo attraverso analisi deterministiche;
- Sviluppo e validazione metodi di calcolo in cui le attività sono state indirizzate sia allo sviluppo di modellistica avanzata sia all'esigenza di avere a disposizione dati sperimentali adeguati per la validazione di questi metodi.

Tutte le attività previste nelle task in cui erano suddivisi i diversi macro-obiettivi sono state completate e sono descritte nel seguito mettendo in evidenza i risultati raggiunti.

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

Questo obiettivo era suddiviso in task relative a verifiche analitiche a supporto del progetto, verifiche sperimentali a supporto della progettazione/realizzazione di componenti, sviluppo strumentazione speciale e approvvigionamento componenti di alcuni sistemi dell'impianto SPES-3.

Le verifiche numeriche effettuate da SIET con il codice RELAP5 hanno confermato che l'impianto SPES-3 progettato nelle annualità precedenti è idoneo alla simulazione di transitori incidentali di progetto (DBE) ed eventi di severità superiore (BDBE) del reattore modulare di tipo integrato. In particolare le analisi hanno dimostrato che lo scaling ridotto della potenza (1:150) rispetto ai volumi (1:100) non provoca distorsione dei risultati.

Inoltre SIET, partendo da un'analisi dei vari progetti internazionali per SMR e delle relative facility integrali, ha valutato la possibilità di utilizzare SPES-3 per la simulazione di altri reattori. Come risultato sono state individuate la necessità di opportune modifiche alla facility per simulare il comportamento integrale di alcuni SMR, mentre sono state messe in evidenza le sue potenzialità nello studio di specifici aspetti attraverso test ad effetti separati, come l'accoppiamento tra primario e contenimento durante un incidente di perdita di refrigerante (LOCA), oltre alla qualifica dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche di sicurezza.

Relativamente alla sperimentazione a supporto di componentistica dell'impianto SPES-3 sono state condotte delle verifiche sulle prestazioni di elementi scaldanti forniti dalla ditta ROTFIL utilizzando un impianto realizzato nel precedente triennio. Le verifiche effettuate alle condizioni di potenza nominale per un nocciolo di un reattore modulare di piccola/media taglia hanno fornito buoni risultati. Originariamente era prevista l'effettuazione delle verifiche anche su un fascio di canne scaldanti provvisto da un fornitore alternativo (ditta THERMOCOAX) ma vista l'indisponibilità sono state effettuate prove aggiuntive sul fascio ROTFIL.

Lo sviluppo di strumentazione speciale per la prova integrale è stato condotto in collaborazione da SIET e CIRTEN ed ha riguardato la misura della portata in condizioni bifase. Questa attività ha visto da parte SIET la progettazione esecutiva, realizzazione, sperimentazione di due prototipi di sonde capacitive per la misurazione del grado di vuoto per miscele bifase, il primo a freddo ed a bassa pressione (1 MPa, 80 °C), il secondo a caldo ed a pressione maggiore (1,5 MPa, 201 °C). Da parte sua CIRTEN ha caratterizzato la sonda a freddo in un deflusso verticale ascendente di aria-acqua ed ha sviluppato ed analizzato le prestazioni di una catena di misura costituita da una turbina, da un "drag disk" e dalla sonda sviluppata su un deflusso orizzontale di aria-acqua. Infine è stato effettuato uno studio sperimentale del deflusso orizzontale aria-acqua mediante l'utilizzo di una strumentazione speciale alternativa (Wire Mesh Sensor) per misure del grado di vuoto.

L'approvvigionamento della componentistica per la realizzazione dell'impianto SPES-3 nella corrente annualità ha riguardato il trasformatore della stazione elettrica coi relativi sistemi ausiliari, ed i serbatoi del sistema di contenimento: Dry-well, Quench tank, 2 PSS (Pressure Suppression System), Cavity, 2 LGMS (Long Term Gravity Make-up System), 2 EBT (Emergency Boration Tank), 3 scambiatori del sistema EHRS (Emergency Heat Removal System) e 2 piscine RWST (Refuelling Water Storage Tank). A questo riguardo le ditte per le relative forniture e messa in opera sono stati individuate tramite l'espletazione di 2 gare d'appalto ai sensi del D.Lgs. 163 e l'aggiudicazione definitiva è stata fatta in agosto 2011.

Sviluppo componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia

Gli studi hanno riguardato in particolare le fenomenologie relative a downcomer e fondo vessel ed al generatore di vapore. A questo scopo sono state ampiamente utilizzate le attrezzature già realizzate nelle precedenti annualità.

Si è realizzata una campagna sperimentale preliminare su un modello in scala 1:5 del downcomer e fondo vessel del reattore con l'obiettivo di fornire dati sperimentali rilevanti allo studio dei fenomeni di mescolamento in caso di incidente di rottura della linea DVI (SBLOCA). L'apparecchiatura, la cui realizzazione iniziata nell'ambito del PAR2007 è stata completata nella corrente annualità, in questa prima fase è stata configurata ed utilizzata per la qualifica del codice CFD FLUENT per la simulazione del comportamento termo-idraulico del reattore .

Per quanto riguarda il generatore di vapore a tubi elicoidali del tipo concepito per il reattore sono proseguiti gli studi sulle instabilità del flusso utilizzando il mock-up del generatore di vapore a doppio tubo prototipico esistente nell'area sperimentale SIET. Le nuove prove sono state indirizzate allo studio in dettaglio delle instabilità termoidrauliche di tipo DWOs (Density Wave Oscillations) ed hanno portato alla caratterizzazione della potenza di soglia per l'innescarsi di fenomeni di instabilità a differenti valori di portata, pressione e temperatura in ingresso. La disponibilità di dati sperimentali ha inoltre permesso di proseguire l'attività di sviluppo di un modello analitico che permette di individuare i parametri più importanti al fine della corretta predizione della soglia di instabilità.

Sulla base della progettazione concettuale effettuata nella precedente annualità si è proceduto alla realizzazione di un impianto per la sperimentazione termoidraulica di base su generatori di vapore per reattori SMR e per reattori di IV generazione. Le attività completate nell'annualità appena conclusa hanno avuto come risultato la progettazione esecutiva, e per alcune parti l'avvio della realizzazione dell'impianto, che installato nell'area IETI della SIET consentirà di alimentare sezioni di prova simulanti singoli tubi o piccoli fasci tubieri di generatori di vapore nucleari di forma non convenzionale in prevalenza elicoidale. Le sezioni di prova saranno di due tipologie a flusso termico imposto ed a temperatura imposta e permetteranno l'utilizzo di diversi fluidi: olio diatermico a base siliconica, sali fusi e metalli liquidi.

Simulazione ingegneristica: sviluppo di un simulatore

Nel corso di questa prima annualità dell'attività, relativa allo sviluppo di un simulatore ingegneristico di reattore nucleare, sono stati analizzati simulatori di ingegneria e simulatori di tipo educational per arrivare a tracciare il profilo dei possibili futuri simulatori di ingegneria di supporto alla progettazione, verifica e gestione di futuri reattori per impianti nucleari in Italia.

Come simulatori ingegneristici sono stati presi in esame vari tipi di simulatori per reattori di potenza LWR (simulatore Westinghouse – GSE per AP1000, simulatori AREVA-IRSN per PWR francesi, simulatori WSC) per reattori di ricerca (simulatori di reattori TRIGA) e per reattori SMR (simulatore reattore NuScale e simulatore). Tale analisi ha permesso di valutare le funzionalità dei diversi sistemi, i principali componenti hardware e software, i codici di calcolo utilizzati e le prospettive di introduzione di elementi evolutivi di simulazione. Questa analisi si è conclusa con la definizione di opportunità per la prossima progettazione e realizzazione di simulatori per i reattori che più verosimilmente rappresenteranno il meglio dell'offerta industriale in un orizzonte di 5 – 10 anni.

Uno studio analogo è stata effettuato per i simulatori di tipo educational acquisendo, utilizzando e valutando i simulatori resi disponibili dall'IAEA per AP600, PWR generico (PCTRAN), ABWR e VVER. Tale esperienza risulta di supporto alla definizione delle caratteristiche desiderabili dei futuri simulatori di ingegneria.

Analisi di sistema: Analisi eventi esterni

In continuità con le attività condotte nella precedente annualità le analisi di sistema sono state focalizzate anche nel PAR2008-2009 sugli studi di sismica e sull'analisi di eventi incidentali esterni, come l'impatto di un aereo sull'impianto.

Per quanto riguarda gli studi sugli eventi sismici l'obiettivo è stato indirizzato alla ripetizione delle analisi già effettuate su di un reattore di piccola-media taglia provvisto di isolatori sismici, introducendo però le caratteristiche dei dispositivi reali, ottenute durante le prove effettuate precedentemente presso il CESI. Le prove erano state eseguite su dispositivi in scala 1:2, i valori utilizzati nei calcoli sono stati perciò elaborati per riferirli ai dispositivi a scala piena. I risultati delle analisi effettuate utilizzando isolatori di tipo HDRB (High Damping Rubber Bearings) hanno largamente confermato quanto emerso dalle analisi compiute con i modelli teorici degli isolatori, rimarcando i notevoli benefici ottenuti introducendo l'isolamento sismico alla base. Le attività sono state indirizzate alla determinazione della massima accelerazione al suolo sostenibile dal sistema d'isolamento senza subire rotture, utilizzando i risultati delle prove a rottura compiute presso la FIP Industriale e introducendo un modello non lineare per l'isolatore nel codice ABACUS per meglio riprodurne il comportamento ad alte

deformazioni. Questo ha reso possibile conoscere con buona approssimazione i margini di sicurezza rispetto al terremoto di progetto, consentiti dall'applicazione dell'isolamento sismico, considerando soprattutto che la capacità di sostenere il carico verticale non è compromessa anche in caso di rottura dell'isolatore come evidenziato durante le prove.

Gli studi relativi all'impatto aereo sono stati focalizzati sull'analisi della risposta globale di una struttura di contenimento di un reattore SMR e sulla valutazione della vulnerabilità dei principali sistemi di sicurezza, strutture e componenti. A questo scopo è stato adottato un approccio deterministico per la corretta rappresentazione dell'interazione struttura-struttura indotta dall'impatto dell'aereo. Le simulazioni effettuate che hanno considerato impatti orizzontali e inclinati, di aerei commerciali e militari sull'edificio di contenimento hanno mostrato la capacità dell'edificio di contenimento del reattore di garantire l'integrità complessiva dell'impianto pur in presenza di danneggiamenti progressivi localizzati.

Sviluppo e validazione codici di calcolo

Lo sviluppo e la validazione di codici di calcolo per lo studio di reattori SMR evolutivi è principalmente rivolto alla valutazione dell'adeguatezza dei codici di sistema correntemente utilizzati per gli studi di sicurezza nei reattori LWR attuali. Questi codici devono essere verificati a fronte delle fenomenologie alla base della caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva proprie dei reattori SMR come il forte accoppiamento tra primario e contenimento, l'utilizzo della circolazione naturale e di iniezione per gravità in condizioni di emergenza. Le attività realizzate hanno riguardato i più recenti sviluppi della modellistica oltre che l'esigenza di avere a disposizione dati sperimentali adeguati per la validazione di questi codici da una parte valutando le potenzialità del reattore Jules Horowitz Reactor (JHR) dall'altra definendo un programma sperimentale da effettuarsi sull'impianto SPES-2 della SIET.

L'attività di sviluppo e validazione modellistica ha riguardato l'accoppiamento di un codice d'impianto con un codice di contenimento per l'analisi incidentale del reattori modulari di tipo integrato. A questo scopo è stato acquisito il codice GOTHIC ed è stato implementato un accoppiamento semplificato con il codice di sistema RELAP5 definendo una strategia di sviluppo che renda l'accoppiamento più generale. Le potenzialità dell'accoppiamento sono state evidenziate con semplici analisi relative al reattore che hanno inoltre permesso di mettere in evidenza i limiti legati ai diversi algoritmi risolutivi dei due codici e di proporre delle linee guida per l'utilizzo. In parallelo è stata valutata la capacità del codice di sistema TRACE, dotato di speciali moduli per la simulazione dei volumi del contenimento, a trattare l'interazione tra sistema primario e sistema di contenimento.

La partecipazione dell'Italia ai grandi programmi internazionali di ricerca per la sicurezza dei reattori nucleari esistenti e futuri è fondamentale per poter avere a disposizione metodi di simulazione e utilizzatori degli stessi adeguati e validati. Per questa motivo era già stata portata avanti un'azione di valutazione delle potenzialità del reattore Jules Horowitz Reactor (JHR), un reattore per la qualifica di materiali e combustibile nucleare in costruzione presso il centro CEA di Cadarache ed aperto alla collaborazione internazionale. Nel corso dell'attuale annualità, oltre alla definizione di una possibile forma di partecipazione italiana al progetto, sono state intraprese attività sulla progettazione di canali di prova del reattore. Queste attività effettuate da personale distaccato presso il centro di Cadarache hanno riguardato la caratterizzazione dei transitori di potenza in dispositivi per prove di irraggiamento (ADELINE e MOLFI) con codici di neutronica (DULCINEE and TRIPOLI4), e la progettazione termo-idraulica con il codice CATHARE del dispositivo LORELEI per la prova di elementi di combustibile in condizioni di LOCA.

Il dispositivo LORELEI è stato concepito per lo studio degli effetti di transitori incidentali di perdita di refrigerante (LOCA) su una barretta di combustibile. Lo studio è particolarmente indirizzato alle conseguenze termo-meccaniche e radiologiche. La posizione del dispositivo nel riflettore del reattore può essere variata per modificare la potenza generata nella barretta. L'attività ENEA ha riguardato il progetto preliminare del dispositivo il cui lay-out è stato definito con CAD Software SolidWorks mentre lo studio termo-idraulico è state effettuata con il codice di sistema CATHARE. Le analisi condotte per verificare la capacità di raffreddamento in condizioni di circolazione naturale hanno portato ad un'ottimizzazione della geometria del dispositivo.

Nell'ambito di questo obiettivo è anche proseguita l'azione per il recupero dell' impianto SPES-2, costruito nei laboratori SIET negli anni 90 per la simulazione integrale del reattore AP600 e pertanto provvisto dei relativi sistemi di sicurezza passivi. La parte di attività è stata finalizzata all'individuazione delle tematiche di interesse per reattori evolutivi da studiare sulla facility SPES-2 tenendo conto dell'esperienza acquisita nei programmi sperimentali internazionali (in particolare il progetto PKL-2 dell'OECD/NEA) e della configurazione della facility sia attuale (con solo accumulatori come sistema di sicurezza) che potenziale (possibilità di ripristino dei sistemi passivi dell'AP600). In particolare, a causa della rilevanza dell'argomento della diluizione del boro relativamente alla sicurezza dei reattori nucleari, si è deciso di esaminare la possibilità di effettuare questa tipologia di esperimenti nell'apparecchiatura SPES-2. I risultati delle analisi realizzate a supporto dimostrano che i principali aspetti termo-

idraulici osservati nel test E2.2 condotto nell'apparecchiatura PKL, sarebbero presenti anche nel test eseguito sullo SPES-2. E' stata realizzata un'analisi di pre-test per tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) con lo scopo di investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario di massa ridotto. E' stato recuperato e revisionato il modello numerico della facility basato sul codice RELAP5, mentre lo studio associato di ingegneria BGS ha effettuato la simulazione del transitorio sperimentale. Il transitorio, che ha come obiettivo principale di investigare la dipendenza tra l'inventario di massa del circuito primario (che influenza fortemente le modalità di circolazione del primario) e la concentrazione di boro del condensato all'uscita dal generatore di vapore (loop seal), è stato realizzato partendo da condizioni di circolazione naturale monofase e simulando una riduzione in step successivi della quantità di refrigerante presente nel circuito primario. Una volta raggiunto lo scoprimento del core con aumento delle temperature delle canne scaldanti si è proceduto al successivo riempimento.

Reattori di IV Generazione

Le attività di ricerca si sono implementate sia come naturale continuazione di quelle sviluppate nelle precedenti annualità, sia tramite la definizione e attivazione di nuovi obiettivi. In particolare, fra gli obiettivi già sviluppati nelle precedenti annualità vi sono:

- Analisi di sicurezza dei sistemi nucleari di IV generazione refrigerati a piombo, con particolare riferimento alla analisi e caratterizzazione dell'evento di interazione metallo-liquido-acqua a seguito della rottura di uno dei tubi del Generatore di Vapore (GV), che per i sistemi LFR (Lead cooled Fast Reactor) è direttamente inserito nel sistema primario. Tale incidente costituisce uno degli incidenti base di progetto presi definiti per gli LFR.
- Revisione concettuale e avvio realizzazione dell'infrastruttura HELENA, impianto a piombo fluente dedicato allo sviluppo della tecnologia dei metalli liquidi pesanti.
- Implementazione di nuova strumentazione e up-grade impianto CIRCE in configurazione di prova ICE (Integral Circulation Experiment) per la qualifica di uno scambiatore di calore prototipico per la rimozione del calore di decadimento (DHR) nei sistemi LFR, nonché per la caratterizzazione termo-idraulica di fuel pin bundle in sistemi nucleari a piscina refrigerati a piombo.
- Progettazione e realizzazione di un prototipo a piena scala di uno scambiatore di calore per sistemi SFR (Sodium cooled Fast Reactor) con circuito intermedio a sali fusi.
- Rinnovo di apparecchiature, certificazione di macchine e procedure presso i laboratori per prove termo-meccaniche e caratterizzazione materiali strutturali.
- Sviluppo e implementazione della chimica dei refrigeranti per sistemi LFR e SFR.
- Sviluppo e implementazione di modelli fisici e modelli numerici per qualifica e caratterizzazione dei codici di calcolo.
- Concettualizzazione DEMO-LFR.
- Studi di dinamica del nocciolo DEMO-LFR.

Fra i nuovi macro-obiettivi di ricerca implementati nella presente annualità vi sono:

- Implementazione laboratorio della termo-fluidodinamica dei metalli liquidi.
- Progettazione e avvio realizzazione di un fuel pin bundle con filo distanziale "MYRRHA-relevant" per la caratterizzazione della convezione libera nei sistemi nucleari refrigerati a metallo liquido.
- Studio concettuale e di fattibilità di una infrastruttura sperimentale a sodio fuso per studi di shock termici su componenti nucleari, e studi dei criteri di danneggiamento tipici dei reattori di quarta generazione.
- Sviluppo componenti ceramici per sistemi nucleari di quarta generazione, in particolare per reattori a gas ad elevata temperatura.

Tutte le attività previste nelle task in cui erano suddivisi i diversi macro-obiettivi sono state completate e sono descritte nel seguito mettendo in evidenza i risultati raggiunti.

Laboratorio per la termo-fluidodinamica dei metalli liquidi

L'attività ha riguardato in larga parte la definizione e avvio di implementazione di un laboratorio di misura di grandezze fisiche atte alla caratterizzazione termo-fluidodinamica dei metalli liquidi. In tale contesto si sono avviate collaborazione con il Centro di Ricerca tedesco di Rossendorf (Dresda), HZDR (HELMOTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF) per la definizione, progettazione, fornitura e installazione di un misuratore di portata ad induzione elettro-magnetica, non intrusivo (*contactless*). Lo strumento, da installare sull'impianto sperimentale NACIE permetterà di realizzare misure accurate e affidabili della portata di circolazione del metallo liquido durante le prove di transizione dalla circolazione forzata alla circolazione naturale durante le campagne sperimentali previste per la caratterizzazione della convezione libera in *fuel bundle* prototipici. L'esperimento ha quindi come obiettivo l'analisi di sicurezza di un *fuel bundle* operante in metallo liquido pesante a seguito di un qualsivoglia scenario incidentale che porti alla transizione dalla circolazione forzata a quella naturale. Poiché le forze di

galleggiamento giocano un ruolo predominante, è gioco forza quindi provvedere strumenti di misura non invasisi che non inducano perdite di carico superflue nel circuito.

In supporto all'esperimento relativo al *fuel bundle*, e nell'ambito dell'implementazione del laboratorio, si è provveduto alla acquisizione di diverse workstation ad elevate prestazioni per esecuzione di simulazioni numeriche di fluidodinamica computazione da eseguire in parallelo sui processori disponibili. Il calcolo CFD, nell'ottica del laboratorio, permette di individuare i fenomeni critici e comprendere i meccanismi di base, migliorando l'attività sperimentale per esempio attraverso una più ricca e mirata strumentazione.

Tra le altre azioni avviate relativamente alla implementazione del laboratorio della la termo-fluidodinamica dei metalli liquidi si è provveduto a realizzare degli studi relativi a GV prototipici per il DEMO-LFR. In collaborazione con ANSALDO NUCLEARE SPA, si è definito un GV con tubi a baionetta a doppia parte con interposto gap in polvere conduttiva (polvere di diamante), operante con acqua a 180 bar. L'obiettivo è ridurre gli stress termo-meccanici sulle pareti del tubo, preservando ottime proprietà di scambio termico. Inoltre il gap di polvere interposto, tenuto in sovrappressione di elio, garantisce la monitorabilità circa l'integrità del sistema, riducendo notevolmente il rischio di interazione metallo liquido–acqua. Si è progettata e realizzata una facility sperimentale, denominata TxP "Test for Powder" che ha lo scopo di realizzare una caratterizzazione termo-meccanica delle polveri proposte per il gap del GV. La polvere deve presentare una buona fluidità per garantire la dilatazione termica differenziale dei due tubi costituenti la baionetta, e deve inoltre conservare le sue caratteristiche a seguito dei diversi transitori operazionali previsti, che possono indurre ossidazione della polvere e/o principi di sinterizzazione. Ciò porterebbe a una perdita delle prestazioni e potrebbe indurre tensioni termo-meccaniche sul componente. A completamento delle attività si inoltre provveduto a realizzare una approfondita ricerca bibliografica circa i sistemi di promozione di turbolenza in sistemi a vapore ad elevata pressione, e si sono realizzate simulazioni numeriche con codici di sistema (RELAP5) per una analisi di pre-test relativamente alle prestazioni della facility TxP.

Nei prossimi mesi, a seguito della caratterizzazione delle polveri in TxP, si provvederà alla realizzazione di un singolo tubo a baionetta a piena potenza da installare nella facility CIRCE. A tale scopo si sono già avviate alcune azioni tese alla implementazione della sezione di prova. In particolare si è provveduto ad acquisire una pompa di circolazione centrifuga ad asse verticale per sistemi a piscina, da accoppiare con il tubo prototipo di GV e provvedere quindi alla qualifica sperimentale nell'impianto CIRCE.

Nell'ambito dell'obbiettivo, particolare rilievo è stato dato all'investigazione analitico - sperimentale dell'interazione metallo liquido acqua in supporto alla caratterizzazione di generatori di vapore per sistemi LFR, in sinergia con progetti europei quali THINS (*Thermal-Hydraulics of Innovative Nuclear Systems*) e LEADER (*Lead-cooled European Advanced DEmonstration Reactor*) del VII Programma Quadro Euratom.

In questo ambito, attività di supporto analitiche, sperimentali e numeriche sono state implementate per comprendere i fenomeni fisici, prevedere le possibili conseguenze sull'impianto nucleare e progettare eventuali sistemi e/o contromisure che possano mitigare l'impatto sui sistemi coinvolti ed escludere un rilascio significativo di radiazioni verso l'ambiente esterno. L'apparecchiatura sperimentale LIFUS-5, sita al CR Brasimone e costruita per lo studio dell'interazione metallo liquido-acqua, è stata aggiornata per consentire di effettuare esperimenti affidabili e di elevata qualità. La nuova configurazione di impianto consente di semplificare la procedura di esecuzione degli esperimenti attraverso modifiche di componenti e una nuova elettronica di controllo, oltreché di ottenere dati idonei per lo sviluppo di modelli numerici e per la validazione dei codici di calcolo. La strumentazione è stata potenziata e accoppiata a un nuovo sistema di acquisizione. Attualmente sono disponibili sensori veloci di temperatura (70), di pressione (6), ed estensimetri (15) ad elevata temperatura. Si sono eseguite attività numeriche di supporto alle prossime campagne sperimentali, mediante il codice SIMMER-III, simulando il comportamento del generatore di vapore di un impianto LFR.

Sviluppo Tecnologie per Sistemi LFR/SFR

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo in supporto ai sistemi di quarta generazione LFR e SFR, sono state implementate diverse azioni tese allo sviluppo di componenti innovativi.

In particolare si è provveduto alla revisione concettuale dell'impianto a metallo liquido pesante denominato HELENA. L'impianto, che ha come obiettivo il supporto allo sviluppo delle tecnologie dei metalli liquidi pesanti, è stato completamente revisionato. Si è riprogettato il circuito secondario ad acqua in pressione (100 bar), si è rivisto il layout, e mediante simulazioni numeriche con codice di sistema (RELAP5) si è provveduto alla completa analisi termoidraulica del circuito primario e secondario, simulando i transitori operazionali e definendo le procedure di avvio ed esercizio dell'impianto. Si è inoltre provveduto ad acquisire alcuni componenti di impianto (aerotermo da 250 kW, strumentazione, serbatoio di stoccaggio) tra cui la pompa di circolazione. Si è inoltre provveduto alla acquisizione del piombo (purezza 99,9%) per l'utilizzo nella facility.

Relativamente alla pompa di circolazione, si è optato per una pompa centrifuga con girante in acciaio e ricoprimento in tantalio mediante tecnica CVD "Chemical Vapour Deposition". Il ricoprimento in tantalio è stato preferito alla realizzazione della girante in MAXTHAL (estremamente fragile) poiché più affidabile e meno oneroso in termini economici, considerando di poter ottenere le stesse prestazioni termini di resistenza alla corrosione ed erosione in piombo fluente.

Infine, l'impianto HELENA è stato revisionato per poter operare con un tenore di ossigeno disciolto molto basso, inferiore a 10-8% in peso. Tale soluzione è stata concordata in ambito europeo, dovendo provvedere a prove di erosione e corrosione in ambiente non ossidante in cui i fenomeni dissolutivi governino la cinetica di corrosione sui materiali strutturali.

Per quanto concerne la implementazione di strumentazione aggiuntiva sull'impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova ICE (INTEGRAL CIRCULATION EXPERIMENT), che ha come scopo la completa caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW, le attività sono state completamente realizzate. In particolare si è provveduto alla acquisizione ed installazione di uno scambiatore di emergenza ad aria da 40 kW con lo scopo di simulare la transizione dalla piane potenza (800 kW) alla potenza di decadimento (40 kW) in un sistema nucleare a piscina. Si è poi provveduto alla implementazione di nuova strumentazione nel riser, nel DHR, e lungo il circuito primario al fine meglio mappare i fenomeni di stratificazione termica e circolazione secondaria del metallo liquido. La sezione di prova è stata inoltre modificata provvedendo alla installazione di uno scudo termico lungo il riser e modificando gonna e separatore dello scambiatore. Queste modifiche hanno come principale obiettivo la semplificazione delle simulazioni numeriche a supporto, filtrando fenomeni spuri e migliorando la conoscenza delle condizioni a contorno da imporre nelle simulazioni. Infatti, uno degli obiettivi principali degli esperimenti sull'impianto CIRCE-ICE è il supporto alla validazione dei codici di sistema quando applicati su sistemi a piscina.

In parallelo si è realizzata una analisi preliminare di pre-test per verificare, tramite simulazione numerica con codice di fluidodinamica computazionale, il comportamento dello scambiatore di calore di emergenza da 40 kW una volta in esercizio nel downcomer della facility CIRCE. Si è verificato il corretto accoppiamento fra DHR e scambiatore di calore di emergenza, e la stratificazione termica attesa nella piscina di metallo liquido. Inoltre, mediante codice di sistema (RELAP5), si è provveduto ad una analisi di post-test sui risultati sperimentali preliminari resi disponibili durante lo scorso PAR, supportando quindi la definizione e implementazione della nuova strumentazione da installare nella sezione di prova.

Per quanto concerne il fuel bundle, nell'ambito del PAR si è provveduto alla sostituzione degli elementi danneggiati nelle precedenti campagne sperimentali, e all'installazione di nuove griglie spaziatrice e di nuova strumentazione per il monitoraggio della temperatura di camicia, della temperatura del refrigerante nei sottocanali e del coefficiente di scambio termico. L'obiettivo è investigare il comportamento termoidraulico di un fuel bundle operante in un sistema a piscina refrigerato a metallo liquido, durante il normale esercizio e durante la simulazione dei transitori operazionali ed incidentali. La conoscenza dell'andamento della temperatura di camicia durante i transitori incidentali postulati, e la legge di variazione del coefficiente di scambio termico, sono di fondamentale importanza per procedere al licensing di tali sistemi.

Prima dell'avvio della campagna sperimentale si è infatti realizzata un opera di bonifica e pulizia del serbatoio di prova dell'impianto CIRCE. Il serbatoio è stato completamente pulito ed ispezionato anche mediante verifica degli spessori con tecnica ad ultrasuoni. Si è infine installato un nuovo gruppo da vuoto per le procedure di inertizzazione che si rendono necessarie all'avvio di ogni campagna sperimentale.

Una nuova sorgente termica è stata sviluppata e sarà successivamente installata sull'impianto NACIE al posto della attuale. Tale sorgente avrà una potenza complessiva dell'ordine dei 250 kW. Tale scelta comporta la riprogettazione di uno scambiatore di calore in grado di smaltire la potenza richiesta. Scartata la scelta di un elemento tube-in-tube, a causa degli elevati ingombri assiali che avrebbe comportato, l'attenzione si è focalizzata sull'adozione di uno scambiatore del tipo shell-and-tube. In particolare si è progettato uno scambiatore con 12 tubi a doppia parete, in cui fluisce il metallo liquido, mentre l'acqua del circuito secondario, alimentata ad una pressione di 16 bar, verrà fatta scorrere controcorrente lato mantello. Gli obbiettivi della campagna sperimentale prevista su NACIE con l'impiego del nuovo bundle prevedono la misura della temperature di parete delle barrette mediante l'utilizzo di termocoppie incamiciate, la misura della temperature di sottocanale, la verifica della presenza di eventuali punti caldi, la caratterizzazione della stratificazione termica assiale del fluido refrigerante e la lunghezza di attacco nei sottocanali del fuel bundle. La nuova sorgente termica consiste in 19 fuel pin (alimentati elettricamente), caratterizzate da una lunghezza attiva pari di 600 mm ed aventi un diametro di 6,55 mm. Il flusso termico massimo alla parete è di 1 MW/m^2.

E' stato inoltre approntato un modello termoidraulico semplificato dell'intero circuito NACIE con il nuovo bundle, modellando anche la circolazione assistita con iniezione di gas. Tale modello consente di prevedere la portata

circolante in convezione mista per valori arbitrari di potenza di bundle, differenza in quota tra la sorgente calda e lo scambiatore di calore, e la portata di gas insufflata.

Al fine di una migliore la comprensione dei fenomeni fisici oggetto di studio, è stata fatta una rassegna di letteratura sulla termo-fluidodinamica di dettaglio dei bundle refrigerati a metallo liquido. Questa attività è andata di pari passo con la modellazione numerica del bundle stesso al fine di valutare lo scambio termico convettivo nei sottocanali attraverso simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics).

Infine si è provveduto ad acquisire componenti per la implementazione del nuovo esperimento, e oltre alle 19 fuel pin è stato approvvigionato un misuratore di portata prototipico ad induzione elettro-magnetica, non intrusivo, strumentazione (analizzatore da ossigeno per cover gas) e un aerotermo da 250 kW e 16 bar per la realizzazione del circuito secondario.

Per quanto riguarda lo sviluppo delle tecnologie dei sistemi SFR, si è proceduto presso il CR Casaccia alla realizzazione di un prototipo di uno scambiatore di calore a sali fusi come fluido intermedio.

Infatti, la realizzazione di un sistema innovativo di dissipazione del calore, che propone l'inserimento di un circuito intermedio a sali fusi per l'asportazione del calore di decadimento degli elementi di combustibile esauriti di reattori nucleari refrigerati a sodio, ha richiesto la implementazione di studi di base volti alla determinazione delle proprietà fisico-chimiche della miscela di sali fusi utilizzata e alla determinazione dei coefficienti di scambio termico nelle reali condizioni di esercizio.

Per raggiungere questi risultati si è proceduto, nel periodo di riferimento, all'approvvigionamento dei materiali e delle attrezzature necessarie alle azioni sperimentali previste. Tra queste vi è la realizzazione di sensori di misura miniaturizzati, l' allestimento di un laboratorio di misura, la realizzazione della strumentazione di una sezione di prova dedicata alla determinazione dei coefficienti di scambio in fascio tubiero immerso nei sali.

Inoltre è stata effettuata la progettazione termo-fluidodinamica e meccanica di una sezione di prova rappresentante, in condizioni di reale esercizio, uno dei tubi alettati proposti per lo smaltimento passivo del calore della piscina di decadimento degli elementi di combustibile.

Inoltre, nella prospettiva di rilancio della ricerca sperimentale sull'impiantistica nucleare in generale, con riferimento a reattori SFR, è stata proposta la ricostituzione di un gruppo di competenze in considerazione della rilevanza dei sistemi SFR nello scenario di sviluppo dell'energia nucleare delineato a livello comunitario dal SET Plan. Per conseguire tale obiettivo si rende necessario disporre di un impianto sperimentale, da realizzare ex-novo, che sia il più possibile semplice ma sufficientemente completo per avviare l'acquisizione di conoscenze sulle tecniche di progettazione e sulla gestione di impianti al sodio, nonché significativo per accedere alle opportunità di ricerca in ambito europeo sui reattori di IV generazione.

Si è proceduto allo studio di fattibilità di un piccolo impianto a sodio, avendo come obiettivo primario l'esecuzione di test di shock termici su provini tubolari di materiale (T91) proposti quali materiali strutturali per sistemi SFR. Sono state quindi elaborate le specifiche di processo e le linee guida principali, passando poi ad un vero e proprio studio di fattibilità, che si è concluso con la progettazione concettuale. Le dimensioni dell'impianto sono state ridotte al minimo possibile, pur mantenendo l'obiettivo di dare significatività alle prove sui materiali. L'inventario del sodio è stato contenuto nell'ordine di 50 kg, raggiungendo lo scopo della massima semplificazione.

Sviluppo di materiali innovativi per sistemi di IV generazione

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo in supporto alla qualifica dei materiali strutturali per sistemi nucleari innovativi, si è provveduto all'acquisizione di nuove attrezzature di laboratorio e alla certificazione di quelle già esistenti.

Le attività realizzate sono state condotte in completa sinergia con quanto stabilito nella European Energy Research Alliance on Nuclear Materials (EERA), e a completano delle attività di ricerca e sviluppo inserite nei programmi di ricerca definiti nei progetti europei MATTER (MATerial TEsting and Rules) e GETMAT (Gen IV and Transmutation MATerials) del VII Programma Quadro EURATOM.

In particolare, si è implementata presso il Laboratorio Prove Meccaniche del CR Brasimone, una pressa elettromeccanica per prove materiali equipaggiata con tre celle di carico (50 kN, 5 kN, 1 kN) e software per test di trazione, compressione, flessione e ciclo arbitrario. Si è provveduto inoltre alla taratura di tutte le catene di misura riguardanti estensimetri, LVDT e celle di carico relativi a tutte le macchine di trazione e compressione presenti, corredando le tarature con certificazione S.I.T.

Inoltre in sinergia con il progetto GETMAT, nel quale il Laboratorio Prove Meccaniche è impegnato nell'attività di qualifica dei materiali strutturali ODS, si è realizzata una facility sperimentale per la investigazione dei fenomeni di fretting, tipici dell'accoppiamento guaina-griglia spaziatrice degli elementi di combustibile. La facility permette di

realizzare test dinamici di fretting in piombo stagnante ad una temperatura di 550 °C, mediante una camera di prova con n° 2 assi di carico orizzontali e un'asse di movimento verticale.

Per quanto riguarda la effettuazione di test su campioni non irraggiati, l'attività è stata svolta in sinergia con il progetto GETMAT, che prevede di testare materiali innovativi, quali acciai ODS o 15-15Ti stabilizzato, e altri più convenzionali, quali ad esempio il T91 o il AISI 316L come candidati per i reattori di quarta generazione refrigerati a piombo. Molto è stato fatto in questo contesto, soprattuto per quanto concerne l'ambito sperimentale convenzionale, mentre pochissimi sono i dati realtivi alle proprietà meccaniche dei materiali irraggiati. A tale proposito, l'esperimento LEXURII si ripropone di effettuare test di base (trazione, scorrimento viscoso, corrosione) su tali materiali dopo una esposizione a neutroni veloci fino a 16 dpa, confrontando i dati ottenuti con test base realiizati su materiali non irraggiati.

Le prove di irraggiamento vengono condotte presso il reattore di ricerca russo BOR60, a Dimitrovgrad (RIAR), mentre le prove convenzionali "fuori pila" sono condotte presso il Laboratorio Prove Meccaniche del Brasimone, dopo una esposizione dei campioni in piombo fluente (impianto CHEOPE III) a 500 °C e 1 m/s per circa 2000 ore. Tra i materiali strutturali testati vi sono: AISI 316 LN, ODS 9Cr2WVTa, ODS 12CrWTi $Y_2 O_3$. I test sono stati realizzati in un forno ad alta temperatura appositamente realizzato. Il data base è quindi disponibile per il confronto con i materiali irraggiati.

Per quanto riguarda lo sviluppo di materiali ceramici compositi per componenti di reattori nucleari a fissione di IV generazione, specialmente barre di controllo e guaine di combustibile dei reattori veloci a gas, l'attività di ricerca ha riguardato lo sviluppo dei processi di fabbricazione per la messa a punto di quattro tipologie di composito a matrice ceramica a fibra lunga (Carbonio e Carburo di Silicio). In particolare si sono studiati: SiCf/SiC mediante tecnica ibrida CVI+PIP (*Chemical Vapour Infiltration* + *Polymer Infiltration Pyrolisis*), SiCf/SiC mediante tecnica CVI, Cf/C mediante tecnica ibrida CVI+PIP, Cf/C mediante tecnica CVI.

In collaborazione con FN SPA, che dispone di un impianto prototipale per CVI in grado di effettuare deposizioni di 0,3 micron di C o di SiC a ciclo di infiltrazione e di un forno per PIP, anch'esso prototipale, che permette di effettuare cicli di impregnazione di resine e relativa pirolisi a 1000 °C – 1200 °C, si sono realizzate delle preforme a partire da tessuti di C o di SiC mediante trattamento in autoclave, alla successiva deposizione interfase di C mediante CVI, ai trattamenti di densificazione (PIP o CVI) ed infine all'ottenimento dei provini SiCf/SiC e Cf/C.

I pannelli realizzati sono stati sottoposti a taglio laser per l'ottenimento dei provini per la successiva caratterizzazione fisico-meccanica. La tecnologia ibrida CVI+PIP ha dimostrato in questa fase come sia possibile ottenere materiali molto interessanti a costi sicuramente più contenuti rispetto a quella CVI; quest'ultima, infatti, richiede tempistiche molto più lunghe per l'ottenimento di una completa densificazione, sebbene consenta di ottenere delle microstrutture sicuramente più omogenee.

Riguardo la caratterizzazione di materiali e componenti per il nucleare da fissione mediante tecniche neutroniche, l'attività ha riguardato principalmente misure di diffusione neutronica ai piccoli angoli (SANS: small-angle neutron scattering) su acciai strutturali e materiali ODS sottoposti a invecchiamento termico e prove meccaniche, al fine di valutare la resistenza di tali materiali negli impianti e migliorarne le prestazioni. Le misure sono state condotte presso il Reattore ad Alto Flusso dell'ILL-Grenoble, la più intensa sorgente neutronica attualmente disponibile, che l'ENEA utilizza regolarmente da anni per esperimenti di tale tipo. Sono stati effettuati studi su materiali e componenti che hanno fornito una prima valutazione della loro affidabilità in condizioni di servizio e costituirà la base tecnico-scientifica di un sistematico programma di prove, da svilupparsi negli anni successivi per contribuire alla qualifica di materiali e componenti nucleari sotto alte dosi di irraggiamento. L'analisi dei dati neutronici ha consentito di mettere a punto un metodo innovativo per ottenere dai risultati delle prove SANS informazioni microstrutturali di rilevanza per l'impiego di tali materiali in condizioni di esercizio.

Si è realizzata una trattazione dei vari criteri di danno tipici di reattori di IV generazione (buckling, creep, fatica, creep-fatica e ratcheting) e dei modelli costitutivi descrittivi delle leggi di comportamento a temperatura di acciai sia austenitici che ferritici. Particolare attenzione è stata data al modello di *Chaboche*, attualmente largamente utilizzato per l'interpretazione di tali materiali a carichi ciclici ad alta temperatura. Un particolare sforzo è stato condotto per lo studio con simulazione agli elementi finiti CAST3M del comportamento strutturale di un vessel soggetto a variazione di livello di un pelo libero di sodio. La simulazione è stata eseguita per una tanca, di stessa geometria e con stessa condizione di carico, sia realizzata in AISI 316 (austenitico) che in P91 (ferritico). Ciò al fine di valutare la peculiarità del comportamento strutturale di un acciaio ferritico, quale il P91, attualmente proposto quale materiale strutturale per il circuito primario dei reattori di IV generazione LFR/SFR. Le analisi condotte in campo non lineare, per ben quattro cicli di carico, mostrano in modo chiaro, un comportamento del tutto diverso per i due materiali: presenza di ratcheting per la tanca in AISI 316 e la completa assenza di tale fenomeno per la stessa struttura in P91, che si dimostra essere particolarmente adatto, per le sue caratteristiche termo-fisico-meccaniche, a lavorare con carichi ciclici ad alta temperatura.

Tecnologie chimiche per sistemi LFR e SFR nell'ambito dell'Accordo ENEA-CEA

L'attività ha riguardato l'implementazione di tecnologie chimiche in supporto allo sviluppo dei sistemi nucleari refrigerati a piombo e a sodio, in particolare l'implementazione delle tecnologie e del know how dei metalli liquidi pesanti in supporto alla definizione del circuito secondario del prototipo di SFR di IV generazione denominato ASTRID, secondo quanto stabilito nell'ambito dell'Accordo ENEA-CEA.

In tale contesto sono state analizzate le metodiche di cleaning per strutture operanti in metallo liquido pesante (LBE) e in sodio; si sono confrontate alcune metodologie di pulizia di componenti meccanici di reattori LFR/SFR per la rimozione del piombo, delle sue leghe e composti. Le metodologie sono valutate in funzione del loro costo, delle tecniche e dei tempi di trattamento (per componenti di piccola, media e grande taglia) e della loro efficacia, come anche dalle problematiche relative alla gestione dei rifiuti liquidi e solidi derivanti dai vari processi. Le metodiche sono poi state testate in scala laboratorio, con la verifica in strutture anche non accessibili mediante spessimetro digitale ad ultrasuoni. Con riferimento allo sviluppo e implementazione di sistemi gas-liquido e solido-liquido per il controllo attivo del tenore di ossigeno disciolto nei sistemi a metallo liquido, l'attività si è focalizzata sulla progettazione del sistema di monitoraggio e controllo dell'ossigeno nell'impianto HELENA. In ambito europeo si è infatti optato per supportare una diversa metodologia del controllo dell'ossigeno. Rispetto all'opzione ad elevato tenore di ossigeno (10^{-4} – 10^{-6}% in peso) che permette la passivazione dei materiali strutturali operanti in piombo, si vuole studiare il comportamento a corrosione/erosione dei materiali strutturali senza alcuna passivazione. Ciò implica la necessità di tenere il tenore ossigeno ad un livello molto basso (< 10^{-8}% in peso), inibendo l'ossidazione e operando i materiali in condizione di dissoluzione in metallo liquido. Questa opzione, che necessita di una approfondita investigazione potrebbe adottarsi nei sistemi a nucleari a piombo ove date le dimensioni risulta improponibile un controllo accurato dell'ossigeno. In tale contesto l'impianto HELENA realizzerà prove di qualifica ad erosione/corrosione in condizione di basso ossigeno.

A tale scopo per l'impianto HELENA si è definito un sistema che prevede: purificazione nel serbatoio di stoccaggio con inertizzazione continua mediante sistemi riducenti (Ar/H_2), filtrazione meccanica durante le fasi di fill&draining mediante filtri poral da 20 micron per eliminazione di slags (ossidi di piombo), inertizzazione continua mediante sistemi riducenti (Ar/H_2) nel ramo freddo del circuito, sistema di bypass per installazione di trappole per ossigeno. Tale sistema sarà quindi implementato sull'impianto HELENA che inizialmente era stato concettualizzato per operare ad elevato tenore di ossigeno. Infine, per il supporto allo sviluppo dei sistemi SFR, si è considerato il problema relativo alla migrazione del trizio nei sistemi nucleari a spettro veloce.

Il trizio, essendo un isotopo dell'idrogeno, diffonde prontamente attraverso i materiali strutturali alle temperature operative e conseguentemente può essere rilasciato in ambiente. Al fine di studiare ed analizzare possibili accorgimenti necessari per ridurre l'entità dei rilasci di trizio in ambiente è stato sviluppato un codice di calcolo in linguaggio MATLAB (SFR-TPC), il quale viene utilizzato per valutare i rilasci di trizio in ambiente e gli inventari di trizio all'interno dei reattori SFR. Il trizio che viene generato nel core attraverso le fissioni ternarie e l'attivazione del boro, raggiunge quasi interamente il refrigerante primario, attraverso il quale entra nello scambiatore intermedio (IHX); successivamente, permeando attraverso le pareti dei tubi dell'IHX e del generatore di vapore (GV), raggiunge prima il sodio secondario e successivamente il vapore nel loop terziario di power-conversion (generatori di vapore, turbine, condensatori ecc). Al fine di ridurre i rilasci di trizio si possono adottare due principali tecniche:

1) rivestimento (o coating) dei tubi degli scambiatori di calore (IHX e/o GV) di un certo tipo di materiale (in genere ossidi) in grado di ridurre i flussi permeati di un certo fattore PRF (Permeation Reduction Factor);
2) inserimento di trappole fredde (o cold traps) nei rami freddi dei circuiti primari e secondari.

Il cold trapping del sodio ha l'obbiettivo di ridurre la solubilità del trizio nel sodio tramite raffreddamento, determinandone quindi la precipitazione in una limitata regione "fredda". Le trappole fredde rispetto al coating dei tubi sono dispositivi ampiamente utilizzati per la loro efficienza, economicità e compattezza.
Per quanto riguarda invece le superfici a contatto con il sodio, diversi studi hanno evidenziato che alcuni metalli come Fe, Ni e Cr (metalli con attitudine all'ossidazione) difficilmente danno origine a ossidi stabili in quanto il sodio costituisce un ambiente riducente. Le pareti a contatto con il sodio vengono quindi conservativamente considerate "pulite" e prive di alcuna barriera antipermeazione (PRF=1). L'analisi, condotta con l'utilizzo del codice SFR-TPC su un reattore di tipologia "a vasca" denominato PFBR (Prototype Fast Breeder Reactor), ha mostrato che, sotto alcune ipotesi conservative, solo 0,5 mg/a di trizio (su 3,874 g/a prodotti nel core e rilasciati nel refrigerante primario), raggiungono il ciclo del vapore e vengono conservativamente considerati come rilasci in ambiente. Inoltre, le attività specifiche di trizio nel sodio primario e secondario allo stato stazionario ammontano rispettivamente a 18,8 MBq/kg e 0,61 MBq/kg, le quali risultano confrontabili con quelle misurate in alcuni impianti in dismissione simili per tipologia a quello oggetto di studio (PFBR). Nonostante le ipotesi conservative

assunte il dato di rilascio ottenuto non costituisce un elevato rischio radiologico purché si adotti un opportuno set di misure mitigative per il trasporto di trizio (cold traps e coating).

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

L'attività si è incentrata sullo sviluppo e implementazione di modelli fisici e modelli numerici con lo scopo sia di qualificare e caratterizzare i codici di calcolo quali strumenti per la verifica di sicurezza dei sistemi nucleari innovativi, sia per il supporto alla progettazione concettuale, neutronica e termoidraulica.

In particolare parte dell'attività ha riguardato lo sviluppo e la validazione del codice termoidraulico di sistema CATHARE modificato per il trattamento dei metalli liquidi pesanti, piombo e piombo-bismuto (LBE) attraverso il confronto con dati sperimentali provenienti da due circuiti integrali a piombo-bismuto: NACIE presso il CR ENEA Brasimone e HELIOS presso la Seoul National University. I modelli di NACIE e HELIOS per CATHARE sono stati sviluppati e verificati nel funzionamento in circolazione naturale ottenendo buoni risultati sia nella stima delle portate di metallo liquido che delle temperature lungo il circuito. Inoltre sono stati risolti i problemi riguardanti la simulazione di volumi con pelo libero ed è ora possibile utilizzare differenti correlazioni di scambio termico specifiche, ad esempio, per *fuel bundle*.

In parallelo si è proceduto allo sviluppo del codice di fluidodinamica computazionale FEM-LCORE per lo studio della termoidraulica 3D di sistemi a metallo liquido. Nel codice sono stati implementati nuovi modelli di turbolenza come lo standard SST k-ω e altri modelli, come il k-ε a quattro fattori, sono stati investigati per una futura implementazione. Nel codice sono state inoltre introdotte alcune funzionalità basilari di calcolo parallelo che permettono al codice di funzionare su architetture multiprocessore. Con le nuove caratteristiche, il codice è stato impiegato per la simulazione di *flow-blockage* degli elementi di combustibile sia scatolati che aperti.

Relativamente al prosieguo delle attività sulla neutronica e cinetica di noccioli a spettro neutronico veloce, si è implementata una attività dedicata alla validazione del modulo di cinetica KIN3D di ERANOS. Il modulo KIN3D del sistema di calcolo ERANOS è stato sviluppato per l'analisi di cinetica neutronica di sistemi critici e sottocritici (in particolare veloci). Il codice trova un notevole campo di applicazione nelle campagne sperimentali europee in supporto della tecnologia ADS, essedo l'attenzione attualmente focalizzata sul programma sperimentale GUINEVERE, lanciato nel 2007. Il lavoro è stato incentrato sulla validazione del modulo ERANOS/KIN3D sia per un sistema classico quale GODIVA sia per alcune configurazioni di nocciolo rappresentative del programma GUINEVERE/FREYA.

Il reattore veloce sperimentale GODIVA, originariamente installato presso il Los Alamos National Laboratory (LANL), New Mexico, U.S., è costituito da un reattore nudo a simmetria sferica con combustibile uranio arricchito al 94% in U235. Tale sistema è stato simulato in KIN3D mediante un cubo equivalente non essendo presente la geometria sferica nel codice. In particolare sono state analizzate tre configurazioni sottocritiche: sistema nudo, sistema con riflettore rame e sistema con riflettore piombo.

La facility sperimentale GUINEVERE, installata presso il centro SCK•CEN di Mol, Belgio, è un sistema compatto veloce, a potenza zero, costituito da una matrice attiva uranio-piombo, con uranio arricchito al 30% in U235, a simmetria complessiva cilindrica riflessa da piombo (gli elementi di combustibile sono parallelepipedi). Il sistema è accoppiato ad un acceleratore di deutoni in grado di produrre neutroni da 14 MeV mediante il bombardamento dei deutoni su un target di trizio. Le analisi in GUINEVERE sono incentrate sulle tecniche sperimentali per il monitoraggio della reattività in sistemi ADS (Accelerator Driven Systems). Come banco di prova per KIN3D è stata prescelta la risposta del codice nell'analisi della misura del livello di reattività, per entrambi in sistemi GODIVA e GUINEVERE, mediante le tecniche Slope, Area-ratio e Source-jerk. Le analisi sono state effettuate utilizzando in KIN3D l'opzione di calcolo spaziale esplicito (diretto), associata all'opzione cinetica punto come riferimento. I risultati ottenuti indicano l'affidabilità del codice per la simulazione dei transitori di sorgente prescelti, affidabilità confermata anche dai confronti fra i risultati KIN3D e i risultati MCNP ottenuti per una configurazione caratteristica del sistema GUINEVERE.

Il controllo di sistemi nucleari avanzati richiede lo sviluppo di modelli fisico-matematici adeguati, per tener conto della loro complessità e della necessità di calcolare, con sufficiente approssimazione, sia lo stato all'equilibrio (stazionario) sia le possibili evoluzioni operazionali e incidentali della potenza prodotta. Tali modelli devono considerare le grandezze principali in gioco e le loro interazioni (problemi di multifisica). Obiettivo dell'attività relativamente agli studi di dinamica del nocciolo, svolta in collaborazione con il CIRTEN, è stato quello di elaborare un modello di impianto, considerando l'accoppiamento tra la parte neutronica e quella termoidraulica, per descrivere adeguatamente il comportamento della dinamica di nocciolo. L'approccio usato per la neutronica è utilizzare un modello quasi-statico multigruppo, dove il flusso neutronico dipendente dal tempo viene fattorizzato in due termini, una funzione forma, variabile lentamente ed una ampiezza variabile in modo rapido (cinetica punto). Esso permette di calcolare l'evoluzione della potenza neutronica, che costituisce la sorgente termica da

assegnare alla parte termoidraulica per il calcolo della distribuzione delle temperature. Queste saranno, a loro volta, fornite al modulo di neutronica, il quale, con opportuni coefficienti, potrà calcolare l'evoluzione della reattività e quindi, di nuovo, della potenza. I due moduli, scritti in FORTRAN in modo separato, sono richiamati dalla piattaforma TISC, che provvede anche a scambiare tra loro i dati (la potenza dalla neutronica alla termoidraulica, la mappa di temperature all'inverso). I dati necessari per le analisi riportate sono stati ottenuti dal reattore progettato in ambito ELSY.

Infine si è implementata una metodologia per l'analisi delle quantità integrali misurate nelle esperienze di benchmark con relative correlazioni di accoppiamento con quelle relative al reattore di riferimento. Infatti, l'importanza di campagne sperimentali in sistemi di mock-up fisico o ingegneristico (comunemente denominate "critical facilities") in rapporto ad un reattore nucleare di riferimento ricopre una enorme importanza nelle attività di benchmark. In questi casi, nel mock-up sperimentale vengono misurate un certo numero di quantità significative in rapporto ai parametri di maggior rilievo del sistema di riferimento ed a questo esse vengono successivamente trasposte. Nel caso in cui in cui la critical facility rappresenti un mock-up molto vicino al sistema di riferimento, la trasposizione delle quantità misurate implicherà delle correzioni minori. In particolare, potrà essere adottato con successo il ben noto metodo del "bias-factor" (BFT, per Bias Factor Transposition method). Tuttavia, se il sistema di mock-up e quello di riferimento differiscono di qualche misura, e quindi le quantità misurate nella critical facility si discostano significativamente da quelle corrispondenti del sistema di riferimento, sebbene l'informazione contenuta nelle prime rimanga significativa, farne un uso appropriato può diventare problematico. A questo scopo si possono intravedere alcuni metodi, sviluppati nell'ambito dell'attività, che consentono di utilizzare "al meglio" l'informazione disponibile contenuta nei dati sperimentali. Per sviluppare tali metodi è necessario poter disporre, da un lato di coefficienti di sensitività per il cui calcolo ci si avvale di metodi perturbativi, dall'altro lato di tecniche di opportuni metodi di inferenza. Per il calcolo dei coefficienti di sensitività si è utilizzato il codice di calcolo neutronico ERANOS. Questo codice consente infatti di calcolare la funzione aggiunta (importanza) nella modalità eterogenea, vale a dire in presenza di una sorgente esterna (cioè, disomogenea) corrispondente alla quantità integrale che si intende analizzare, funzione che a sua volta entra nelle espressioni perturbative che definiscono tali coefficienti.

Per quanto concerne l'attività condotta sulla progettazione dei reattori di IV Generazione si è fatta una revisione critica della configurazione esistente di DEMO, proposta ed analizzata nelle precedenti annualità del presente Accordo di Programma. Il progetto DEMO nasce con l'intenzione di concepire ed analizzare un sistema capace di dimostrare la fattibilità di ELSY, un reattore nucleare di IV Generazione refrigerato a piombo liquido, progettato nell'ambito dell'omonimo progetto europeo (VI PQ, CE). Nella definizione della configurazione originale di DEMO, tuttavia, alle finalità di dimostrazione fu associato anche un diverso obiettivo – una elevata fluenza neutronica – che attribuisse al reattore la versatilità necessaria per effettuare anche prove di irraggiamento. I compromessi necessari a mitigare le opposte necessità legate alla duplice finalità di DEMO ne hanno però notevolmente complicato la progettazione, esasperandone la configurazione. Recentemente le ambizioni riservate al progetto DEMO sono aumentate al pari delle attenzioni riservate allo stesso. Si è pertanto ricontestualizzato l'obiettivo di dimostrazione nel più vasto ambito di filiera dei reattori refrigerati a piombo liquido: in questo senso, si prevede di sfruttare l'esperienza maturata dall'esercizio di MYRRHA – in qualità di impianto pilota per prove tecnologiche e test sui materiali – a supporto della progettazione di DEMO ed ELSY. In questo modo perde di significato l'obiettivo di elevata fluenza neutronica, essendo le prove di irraggiamento effettuate preliminarmente in MYRRHA. Questa semplificazione permette così di alleggerire i criteri di progetto di DEMO per privilegiare ulteriormente la circolazione naturale e aspirare così ad un "walk-away reactor": un reattore capace di rispondere in modo completamente autonomo e pienamente efficiente a qualsivoglia condizione incidentale, garantendo così l'integrità – senza bisogno di alcun intervento umano dall'esterno – delle barriere multiple interposte fra il reattore stesso e l'ambiente esterno. L'attrattività di un siffatto sistema risulta ancora più palese dopo i fatti di Fukushima. Parallelamente è stato sviluppato, in collaborazione con il CIRTEN, e ulteriormente validato, un simulatore per l'analisi della dinamica del sistema, che comprenda, oltre al nocciolo, anche il generatore di vapore, la pompa primaria e la piscina del reattore.

Infine, nel contesto dello sviluppo e validazione dei codici di sistema, si è provveduto ad una ulteriore validazione su base sperimentale del codice RELAP5, mediante campagna di prove sperimentali realizzate sull'impianto ad elio in pressione HEFUS-3. Durante il primo anno dell'Accordo di Programma è stata infatti svolta una campagna sperimentale sulla sezione di prova denominata 7PIN, avente come obiettivo la realizzazione di transitori sperimentali significativi per la validazione dei codici di termoidraulica per l'analisi di reattori a gas ad alta temperatura. Tenendo conto degli scenari e condizioni di impianto significativi per il progetto e la sicurezza dei reattori a gas veloci (GFR/VHTR) sono state simulate condizioni stazionarie e transitori incidentali che hanno permesso di individuare le condizioni iniziali e al contorno ottimali per la conduzione dei nuovi transitori sperimentali. È stata poi eseguita un upgrade dell'impianto sperimentale, permettendo di ottenere portate di elio

fino a 1000 g/s alla pressione di 70 bar, ed una migliore mappatura dei parametri fisici grazie ad una implementazione della strumentazione al fine di acquisire una quantità di informazioni maggiori per la caratterizzazione dell'impianto. In tale contesto ad esempio si è installata una nuova sorgente termica (riscaldatore a radio frequenza) che ha permesso di simulare componenti ad elevate densità di potenza. In queste nuove condizioni operative sono stati simulati i casi arresto del sistema di circolazione dell'elio e la perdita totale della porta dell'elio a causa della rottura di un componente. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per l'implementazione del modello di calcolo ai fini di ampliare il database di validazione del RELAP5.

Rifiuti radioattivi

Dopo l'incidente di Fukushima e soprattutto dopo il referendum del giugno 2011, il rilancio dell'opzione nucleare in Italia ha subito una decisa battuta d'arresto; tuttavia rimane la necessità di risolvere il problema della gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi prodotti dalle attività nucleari pregresse, oltre che di quelli annualmente prodotti da attività industriali, ospedaliere e di ricerca. L'Italia ha ratificato nel 2006 la "Joint Convention on the Safety of the Management of Spent Fuel and Radioactive Waste", che impegna i Paesi contraenti alla messa in sicurezza del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi. La recente approvazione della Direttiva EURATOM 2011/70 del 19 luglio 2011 ha di fatto trasformato questi impegni in obblighi a carico dei paesi UE. Tra le altre cose viene chiesto ai paesi membri di "*intraprendere attività di ricerca e sviluppo per contemplare le esigenze del programma nazionale per la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi al fine di ottenere, mantenere e sviluppare ulteriormente l'esperienza e le competenze necessarie*".

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

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

Nel corso della terza annualità sono invece state sviluppate le principali attività di R&S inerenti:

- caratterizzazione dei siti e sicurezza dei depositi;
- caratterizzazione dei rifiuti radioattivi;
- smaltimento geologico dei rifiuti ad alta attività e lunga vita;
- rifiuti radioattivi da nucleare di nuova generazione.

Le attività sono state suddivise in diversi macro-obiettivi e sono descritte nel seguito mettendo in evidenza i risultati raggiunti.

Strumenti di analisi sitologiche e fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati ad un deposito di tipo superficiale definitivo di rifiuti radioattivi

Le attività sono state orientate al prosieguo delle analisi sitologiche ed allo studio dei fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati a un deposito di tipo superficiale. In particolare è stato finalizzato il lavoro di modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito superficiale con lo sviluppo di una metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso. Sono stati sviluppati modelli stocastici per descrivere i) il rilascio dei radionuclidi, ii) la migrazione dei radionuclidi attraverso le barriere del deposito, dovuta tipicamente al moto di percolazione delle acque di infiltrazione, iii) il successivo trasporto attraverso la falda acquifera sino a raggiungere le principali vie di esposizione per l'uomo. Il ricorso al metodo di simulazione Monte Carlo ha offerto la flessibilità necessaria per la

soluzione di modelli stocastici di rilascio e di trasporto dei radionuclidi che tenessero in conto aspetti realistici dei fenomeni coinvolti.

In parallelo è proseguito lo sviluppo di competenze su strumenti computazionali deterministici per le procedure di analisi di sicurezza e "performance assessment" del deposito. In particolare è stato modellato il processo di rilascio di alcuni radionuclidi (^{14}C, ^{137}Cs, ^{234}U) nel sottosuolo mediante l'utilizzo del codice AMBER, nell'ipotesi di fallimento delle barriere ingegneristiche di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi. Viste le ipotesi semplificative adottate, i risultati vanno considerati solo come output di un caso studio e non come riferimento per la performance assessment, che necessita obbligatoriamente di ulteriori considerazioni tecniche, prime tra tutte una più accurata conoscenza dei vari comparti del deposito e dei relativi fenomeni di trasporto nel modello stesso.

Per lo stesso scopo è stata anche analizzata la possibilità di utilizzare GENII-LIN, un noto software di radioprotezione ambientale, le cui release stabili vengono regolarmente pubblicate e rese disponibili dai database della NEA e del RSICC. Il GENII-LIN è in grado di stimare dosi potenziali a individui e popolazioni da rilasci sia acuti che cronici di radionuclidi in ambiente e da contaminazione residua da attività di dismissione. Questo lo rende utilizzabile per la maggior parte delle installazioni nucleari, non ancora per i depositi di rifiuti nucleari, che possono avere impatti su scale di tempi molto più lunghe. Per conferire al codice questa capacità, devono essere approfonditi i fenomeni che regolano il trasporto di contaminanti e la messa a punto di modelli per la descrizione dei processi di migrazione attraverso le barriere di contenimento.

Sono poi state avviate ex-novo attività di R&S mirate a individuare e studiare le metodologie e le tecniche più adeguate per la caratterizzazione dei siti e per il monitoraggio ambientale dei siti stessi durante la fase di sorveglianza istituzionale del deposito. In particolare, si è posta l'attenzione su quei radionuclidi la cui mobilità impone un'analisi approfondita, sebbene presenti nel rifiuto in minore quantità (ad es. ^{14}C, ^{3}H, ^{129}I, gas nobili, ecc.), e li rende adatti come radionuclidi di riferimento per il monitoraggio per la tempestiva segnalazione del cedimento delle barriere. In tale ottica si è iniziato con l'approfondimento del comportamento del ^{14}C, la cui elevata mobilità nell'ambiente ed il lungo tempo di dimezzamento fanno sì che sia considerato un radionuclide di estremo interesse per l'analisi di sicurezza in quanto viene incorporato nella biosfera attraverso i cicli biologici ed è un costituente fondamentale della vita terrestre. E' stato anche approfondito il tema dell'utilizzo degli analoghi naturali (isotopi analoghi, elementi analoghi, parametri analoghi, siti analoghi) a supporto della modellazione del trasporto dei radionuclidi nell'ambiente ai fini della "performance assessment" del deposito.

Aggiornamento e revisione critica dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi

Si è proseguito con l'aggiornamento e la revisione critica dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi, già sviluppato negli anni precedenti, soprattutto in termini di dati di caratterizzazione radiologica e di stima dei rifiuti provenienti dallo smantellamento degli impianti nucleari, sia quelli presenti sia quelli di futura realizzazione. L'attività è proseguita con la messa a punto del sistema informativo di gestione del data base, denominato DBRR-SIAP, con l'aggiornamento dei dati e l'ottimizzazione del software.

Si è iniziato ad interagire con la SOGIN per ottenere informazioni aggiornate sul programma di gestione dei rifiuti radioattivi, evitando sovrapposizione di ruoli. La valutazione critica delle informazioni ricavate dall'inventario consente di individuare carenze, soprattutto in termini di caratterizzazione, e fornisce spunti per studi e programmi di R&S sul tema dei rifiuti radioattivi.

Attività relative alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi

E' stato avviato lo studio di alcuni temi specifici e poco esplorati:

- Caratterizzazione radiologica di rifiuti contenenti radionuclidi di difficile rilevabilità (HTMR: Hard To Measure Radionuclides; es. ^{99}Tc, ^{129}I, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{55}Fe, ecc.) con la metodologia degli "scaling factor". La metodologia dei Fattori di Correlazione (Scaling Factor) viene impiegata per determinare la radioattività dei radionuclidi HTMR usando correlazioni fra loro e nuclidi chiave (KN, key nuclides) scelti fra i radionuclidi facili da misurare, ETM (Easy To Measure). Lo scopo del lavoro è lo studio dell' applicabilità dei Fattori di Correlazione sui rifiuti radioattivi italiani. In particolare si è verificata la possibilità di applicare tale metodologia su rifiuti quali la Grafite Irraggiata proveniente dallo smantellamento della Centrale Elettronucleare di Latina.
- Studio di rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a ^{3}He. Scopo del lavoro è stato lo studio di rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a ^{3}He, resosi necessario data la difficoltà di reperimento e il conseguente alto costo di tali contatori, legati alla produzione di Trizio. E' stato fatto uno studio sui rivelatori di neutroni attualmente in commercio e su quelli cosiddetti innovativi. Le proprietà dei rivelatori sono state studiate anche con il codice di calcolo MCNP, al fine di confrontare e capire le reali prestazioni di tali sistemi. Le alternative in pratica sono i rivelatori basati sul boro, che però hanno dei limiti di efficienza che dovranno essere migliorati.
- Test sperimentalmente di un sistema per la localizzazione del materiale fissile all'interno delle matrici di

contenimento tramite misure neutroniche passive. Lo scopo del lavoro è stato quello di aggiornare, validare e verificare opportuni codici di calcolo progettati per la localizzazione di sorgenti alfa-contaminate disperse all'interno dei rifiuti radioattivi. E' stato effettuato l'aggiornamento ed il miglioramento del codice di calcolo sviluppato precedentemente dal Laboratorio Caratterizzazione dei Materiali Nucleari dell'ENEA, per il calcolo dell'efficienza di rivelazione basato sul concetto di Minima Entropia Relativa. Il codice è stato testato tramite simulazioni Monte Carlo e applicato a manufatti simulanti rifiuti radioattivi tecnologici.

Indagini conoscitive relative alle problematiche inerenti lo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita

Sebbene lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e a lunga vita non rientrasse inizialmente nell'oggetto della presente linea progettuale, fin dalla prima annualità si ritenne utile riassumere anche le attività svolte dall'ENEA in tale ambito, tra il 1976 ed il 1991. Successivamente è stato ritenuto opportuno che il nostro Paese ritorni ad occuparsi di tale tematica, in modo da poter sviluppare le competenze a supporto delle future decisioni in merito alla gestione di tali rifiuti.

Si è quindi cominciato a partecipare attivamente alle principali iniziative in corso a livello europeo ed internazionale. L'ENEA e il CIRTEN hanno aderito alla IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform) partecipando ai lavori per la definizione della relativa SRA (Strategic Research Agenda), documento di grande rilevanza in quanto individua i temi di R&S in cui si devono ancora conseguire importanti progressi scientifici e tecnologici per raggiungere l'obiettivo comune, ovvero la realizzazione del primo deposito geologico europeo. Altre partecipazioni a eventi e gruppi di lavoro organizzati dalla IAEA hanno permesso di ulteriormente consolidare le competenze sia sul tema dello smaltimento geologico (GEOSAF) sia sui temi strettamente collegati dello stoccaggio a lungo termine del combustibile esaurito e sullo stato dell'arte del riciclo del Pu in combustibile MOX, primo passo sulla strada che conduce ai cicli del combustibile chiusi, con l'obiettivo di ridurre il carico radiologico dei depositi geologici del futuro.

L'ENEA partecipa all'associazione ARIUS, che ha come obiettivo quello di rendere possibile la realizzazione e l'esercizio di un deposito geologico multinazionale; da ARIUS è nato nel 2009 il gruppo di lavoro ERDO-WG, le cui attività hanno prodotto un modello di struttura per un'organizzazione ERDO (Organizzazione per lo Sviluppo di un Deposito Europeo) compresa la bozza di Statuto, le linee guida operative ed un business plan a 5 anni.

Il tutto è stato poi completato da approfondite indagini conoscitive relative a tutte le altre problematiche inerenti lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita. Il lavoro ha riguardato l'aggiornamento del materiale bibliografico ed il consolidamento delle esperienze delle organizzazioni ed istituzioni di ricerca del settore, al fine di costituire la base conoscitiva per gli sviluppi successivi. In particolare sono state approfondite le conoscenze scientifiche sui principali tipi di formazioni che si stanno studiando in Europa per i depositi geologici, quali il granito, le argille (plastiche o indurite) e i cristalli di sale (salgemma).

Studio di tecniche innovative di trattamento, condizionamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi

Con la terza annualità sono stati avviati studi relativi a tecniche innovative per il trattamento, condizionamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi, con particolare riferimento ai rifiuti attesi dai cicli del combustibile per i reattori di generazione III+ e IV (LFR/SFR).

Dopo una esaustiva descrizione dello stato dell'arte sui processi idro-metallurgici e piro-metallurgici per il ritrattamento del combustibile esaurito e per il "partitioning" di radionuclidi a lunga vita, è stato approfondito sperimentalmente lo studio di processi di separazione pirometallurgica lantanidi/attinidi, mediante prove a "freddo" di elettroraffinazione in sali fusi (impianto Pyrel II). Prove "a freddo" condotte utilizzando metalli di transizione (ferro e nichel) e metalli delle terre rare (lantanio) hanno permesso di stabilire attraverso quali processi avviene l'elettrodeposizione ad un catodo solido immerso in un sale eutettico costituito da LiCl-KCl. Contemporaneamente alle campagne sperimentali sull'impianto Pyrel II, è stato progettato, e conseguentemente dato l'avvio alla realizzazione dell'impianto Pyrel III, analogo al precedente ma con modifiche migliorative e in grado di operare con uranio depleto, destinato a future esperienze di elettroraffinazione di ossidi metallici.

In parallelo è iniziato anche lo sviluppo di matrici di condizionamento per i rifiuti radioattivi provenienti dai detti processi; i rifiuti generati dal processo pirometallurgico, con riferimento soprattutto a quelli salini (cloruri) che provengono dallo step di elettroraffinazione, richiedono particolari tecniche di condizionamento. Due distinti processi sono stati messi a punto negli USA da Argonne National Laboratory: si tratta della Hot Isostatic Pressing (HIP) e del Pressureless Consolidation (PC). Ambedue partono dalla zeolite 4A, nella quale viene fatto percolare il sale a 500°C, per poi trasformarla in sodalite, un minerale presente in natura che contiene cloro.

Le attività sperimentali svolte riguardano sia la verifica del procedimento adottato negli USA, sia una modifica sostanziale dello stesso, che prevede la sintesi della sodalite attraverso la nefelina. Tale procedimento, se

applicato su scala industriale, avrebbe innegabili vantaggi, essendo più semplice e meno costoso. per le matrici vetrose/vetroceramiche si è proceduto anche alla individuazione delle fasi minerali derivanti dai processi di contenimento mediante analisi ai raggi X, spettrofotometria IR, e SEM-EDS.

Contemporaneamente è stata presentata una review delle più moderne tecniche di condizionamento dei rifiuti, con particolare riguardo al cosiddetto "crogiolo freddo".

Qualifica di componenti e sistemi

Le attività sui processi di qualifica di componenti e sistemi che trovano applicazione in campo nucleare hanno permesso di individuare i temi di maggiore interesse dal punto di vista dello sviluppo delle metodologie e delle opportunità di innovazione per il sistema produttivo e delle capacità di valutazione della sicurezza e degli impatti ambientali. Le attività si articolano fondamentalmente seguendo due differenti approcci. Il primo, focalizzato sullo sviluppo di metodologie per le analisi di sicurezza, prevede l'utilizzo di codici e piattaforme di calcolo specifiche per la modellistica termoidraulica e per il trasposto di contaminanti sia in condizioni operative che incidentali. Il secondo, teso alla predisposizione di sistemi già esistenti o componenti innovativi alle necessità di qualifica, è dedicato alla definizione ed alla valutazione delle esigenze di adeguamento degli impianti e dei requisiti richiesti per l'esecuzione delle specifiche campagne sperimentali.

Durante il primo anno di attività sono stati raccolti ed elaborati i dati sui reattori di generazione III e III+, sia attraverso contatti diretti con i vendors e con le utilities, sia partecipando o promuovendo iniziative finalizzate al coinvolgimento del sistema produttivo italiano nell'attuale fase preparatoria al nuovo o maggiore impegno nel settore nucleare. In particolare sono state organizzate in ENEA giornate di studio sui reattori EPR, AP-1000, VVER, ABWRESBWR e su attività orizzontali come l'innovazione nelle tecnologie manifatturiere (grandi forgiati), il supporto tecnico per la sicurezza (TSO IRSN) e la qualificazione industriale di componenti e sistemi. Inoltre è in atto una collaborazione che comporta la partecipazione di esperti ENEA a tutti i gruppi di lavoro UNICEN per l'aggiornamento della normativa nucleare. Sulla base delle collaborazioni ed interazioni che si sono venute a creare, è stato quindi possibile in questa fase delle attività sia sviluppare ed approfondire ulteriormente alcune tematiche già presenti, sia proporre nuovi obiettivi di interesse.

Le tematiche sviluppate, pur essendo molto diverse tra loro, abbracciano tutti gli aspetti legati al processo di qualifica in campo nucleare, con sensibili ricadute non solo in termini di validazione di processi applicati al campo della sicurezza e di innovazione nel campo strettamente sperimentale, ma anche in termini di contributo a livello normativo e procedurale, sotto molti aspetti ancora in parte carente. Le attività sono quindi le seguenti:

- Sviluppo e validazione di strumenti di metodologia e di analisi.
- Sviluppo impianti sperimentali.
- Sviluppo di procedure e messa a punto di tecnologie innovative per test di componenti.
- Studio di metodologie innovative di prova e di integrazione tra prove di tipo e metodo analitico per le qualifiche ambientali, meccaniche, sismiche ed elettromagnetiche di componenti e sistemi per le centrali nucleari.

Verrà fornita una breve descrizione delle singole attività e dei risultati cui si è pervenuti nel corso dell'annualità in corso.

Sviluppo e validazione di strumenti di metodologia e di analisi

Le attività sono state orientate verso lo studio delle piattaforme di calcolo per la termofluidodinamica e per le dinamiche di trasporto dei contaminanti distribuiti nell'impianto in fase incidentale. Il lavoro si riferisce alle tre seguenti direttrici principali:

- Modelli e piattaforme di calcolo per le analisi incidentali e di sicurezza: l'attività ha riguardato la modellistica avanzata per simulazione T/H multiscala sui dati sperimentali relativi ad uno scambiatore in piscina per la rimozione del calore residuo; la simulazione neutronica applicata a unità di tipo LWR, acquisendo la catena di codici deterministici «APOLLO2-CRONOS2» per calcoli di cella e di reattore tramite soluzione dell'equazione del trasporto di neutroni; la modellistica per analisi di sicurezza, mediante lo studio dell'analisi di sensibilità della risposta del codice integrale MELCOR al variare di parametri critici di sistema e d'impianto. Si è proceduto all'implementazione di modelli e alla validazione del codice ICARE-CATHARE V2.3 (IRSN) per lo studio dei fenomeni di "debris bed reflooding" ed allo sviluppo, validazione ed applicazione del codice DRACCAR (IRSN) per la simulazione del comportamento termo-meccanico di elementi di combustibile durante incidenti di perdita di refrigerante (LOCA) in reattori pressurizzati e raffreddati ad acqua leggera. Il gruppo Dati Nucleari (ENEA) ha prodotto due librerie di sezioni d'urto multi-gruppo, identificate con le sigle VITJEFF311.BOLIB e BUGJEFF311.BOLIB, indicato per i calcoli di schermaggio nei Reattori ad Acqua Leggera. Il problema dell'accoppiamento dei codici è uno dei principali compiti della piattaforma NURISP. Rilevanti

informazioni sono inoltre state raccolte e documentate durante gli studi riferiti ai codici SALOME, NEPTUNE; TRIO_U, SATURNE e CATHARE. Analisi di impatto ambientale post-incidentale e/o ad analisi previsionali basate su dati statistici da applicare nell'interfaccia di rilascio tra impianto e sito sono state ottenute dallo sviluppo modelli del codice di calcolo RadCal-III.

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

Sviluppo impianti sperimentali

Sono state svolte attività propedeutiche per il ripristino della funzionalità dell'impianto termoidraulico VAPORE, realizzato per test ad alta pressione su componenti tipici dei circuiti principali di reattori nucleari ad acqua. Le attività hanno coperto i seguenti aspetti:

- selezione del progetto di una valvola prototipo di grandi dimensioni, per applicazioni su linee ad alta pressione di vapore o di miscela acqua/vapore, allo scopo di verificare, tramite simulazione con codice RELAP, l'adeguatezza dell'impianto VAPORE;
- progettazione dell'installazione del prototipo sull'impianto VAPORE sulla base delle specifiche di esercizio dell'impianto, corredata da numerose risultanze sperimentali;
- programmazione delle azioni necessarie per il riallineamento del sito dell'impianto VAPORE alle vigenti normative e ne ha avviato l'attuazione.
- simulazione tramite codice RELAP dell'esecuzione della campagna di prove per la qualifica del prototipo;
- raccolta e trasmissione dei dettagli riguardanti la gestione dell'impianto per l'eventuale esecuzione della campagna sperimentale;
- formulazione di proposte tecniche ed anche di modifica strutturale ove necessario.

L'attività ha consentito di ricostituire un gruppo di esperti nella gestione del codice RELAP, SW specificatamente studiato per la termoidraulica di circuiti complessi, impegnando sia competenze esistenti sia creandone di nuove. Punto di forza è stata la disponibilità di dati reali forniti dall'impianto VAPORE, sia in termini di HW che di dati sperimentali provenienti da precedenti campagne di qualifica di componenti.

Le attività di sviluppo di procedure sperimentali innovative per test di materiali per irraggiamento da neutroni, frutto della collaborazione ENEA, CIRTEN e Politecnico delle Marche, si avvalgono della presenza nel C.R. ENEA Casaccia dei reattori nucleari di ricerca TRIGA RC-1 (neutroni termici) e RSV Tapiro (neutroni veloci). Sono state condotte attività di diverso tipo:

- test di nuovi rivelatori per neutroni a diamante sintetico a singolo cristallo: la loro resistenza alle radiazioni li rende adatti nei processi di qualificazione dei materiali;
- analisi di danneggiamento mediante simulazioni Monte Carlo con il codice MCNPX, versione 2.6.0, per componenti elettronici (schede elettroniche) destinati a operare in ambiente ostile;
- realizzazione di un sistema di acquisizione e monitoraggio dati per i reattori TRIGA e TAPIRO basato sul Compaq RIO della National Instrument;
- adeguamento del canale tangenziale passante per l'installazione di una facility di radiografia e tomografia neutronica;
- indagine sul comportamento di materiali innovativi per la rivelazione di neutroni, considerando gli effetti dell'irraggiamento neutronico su granulati di acido borico, acciai e campioni in Fe(α);
- caratterizzazione delle fluenze neutroniche di ciascuna location di irraggiamento utilizzando nuovi rivelatori NaI(Tl), operando un confronto tra i dati sperimentali e dati di fluenza simulati con MCNPX.

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

L'attività ha avuto il duplice scopo di caratterizzare materiali compositi a matrice ceramica (C_f/C e SiC_f/SiC) per componenti di reattori nucleari a fissione di nuova generazione e di redigere un protocollo di prove e procedure per la qualifica dei materiali, dei metodi e delle apparecchiature impiegate. Poiché si tratta di uno studio esplorativo per valutare la possibile applicazione di questi materiali compositi in campo nucleare, i risultati cui si è pervenuti devono essere considerati del tutto preliminari ad un successivo processo di ottimizzazione sia in termini di scelta di materiali di partenza che di processo di produzione.

A seguito di una iniziale ricerca bibliografica circa lo stato dell'arte normativo in materia di caratterizzazione di materiali compositi (nello specifico per l'impiego nucleare) e della redazione dei documenti di assicurazione qualità conformemente alla ISO 9001: 2008 (piano di qualità, piano di fabbricazione e controllo, piano di qualifica) relativi all'attività di ricerca da svolgere, sono state definite le prove (fisico-meccanico-strutturali e termiche) cui sottoporre i campioni. Sono stati definiti i piani di taglio per l'ottenimento del massimo numero di provini e sperimentate tecniche di taglio di tipo diverso (mole diamantate, elettroerosione a filo, laser). Le caratteristiche riscontrate sui provini analizzati a temperatura ambiente portano a concludere che la tecnica ibrida di realizzazione CVI+PIP (Chemical Vapour Infiltration + Polymer Infiltration Pyrolisis) presenta aspetti molto interessanti, tenendo anche conto della sua maggiore economicità rispetto al solo trattamento di CVI. Un aspetto molto critico ai fini dell'ottenimento di compositi con buone caratteristiche fisico-strutturali è stato individuato nel processo iniziale di produzione (pre-forme). Al momento attuale infatti non si sono ottenuti materiali con requisiti tali da essere impiegati in ambito nucleare, mai margini di miglioramento sono senz'altro consistenti. I risultati dei test ad alta temperatura, seppur parziali, sono piuttosto promettenti, evidenziando bassi valori del coefficiente di espansione termica e di deformazione nelle prove di resistenza a trazione.

Nell'ambito dello sviluppo di nuove procedure per test di qualifica di componenti e sistemi, rientra la Progettazione di una consolle di concezione avanzata per la facility di irraggiamento gamma Calliope presso ilC.R. ENEA Casaccia, che presenta caratteristiche uniche sia a livello italiano che europeo. E' perciò in grado di rispondere a numerose richieste nazionali ed internazionali, consentendo di effettuare test di qualifica, di affidabilità e di valutazione della resistenza a radiazione di sistemi e componenti. L'impianto CALLIOPE è tuttavia attualmente dotato di una consolle di comando di concezione tradizionale di estrema affidabilità ma che non permette di effettuare operazioni di monitoraggio ed acquisizione a distanza. L'attività svolta ha riguardato la progettazione di una nuova consolle di comando per l'impianto stesso. Basandosi su una architettura concettuale avanzata che prevede l'impiego di microprocessori PLC, sarà possibile disporre di informazioni in tempo reale ed il conseguente sviluppo, nel rispetto delle normative di riferimento nazionali ed internazionali, di nuove metodologie di test.

Nello specifico, sono stati definiti i requisiti del sistema e del software di controllo (livello di sicurezza SIL 3), sono stati proposti il *revamping* del Sistema di Controllo Sorgente e l'implementazione di un Sistema di Acquisizione e Reporting. Tutte le attività sono state condotte nella stretta osservanza del criterio generale che prevede la netta separazione tra le funzioni di controllo di sicurezza e di processo.

E' stato infine studiato e progettato un sistema di monitoraggio della movimentazione della sorgente di ^{60}Co mediante l'impiego di sensori ottici: pur risultando completamente svincolato da qualsiasi componente dei sistemi di sicurezza e degli organi di movimentazione della sorgente dell'impianto (come richiesto da normativa), esso permette di definire in modo univoco ed in tempo reale i parametri necessari per la determinazione della dose assorbita dai provini sottoposti ad irraggiamento. In tal modo, i dati relativi ad ogni irraggiamento saranno direttamente registrati ed inviati ad un apposito terminale che permetterà l'emissione dei certificati richiesti per ogni singolo test.

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

Le attività sono state svolte seguendo due filoni principali:

1. Prove di compatibilità elettromagnetica (EMC): verifica della possibilità di eseguire in camera reverberante prove di immunità radiata su sistemi e componenti (parte del processo di qualificazione nucleare), con modalità presumibilmente più severe delle prove eseguite in camera semianecoica. Si è inteso realizzare una camera reverberante trasformando una camera schermata già in dotazione al Laboratorio ENEA. Una volta realizzata questa infrastruttura, si procederà a confrontare l'esito di prove di immunità radiata eseguite in camera reverberante, secondo quanto prescritto dalle norme CEI EN 61000-4-21 o MIL-STD-461E/F, con i risultati di analoghe prove eseguite in camera semianecoica, secondo le norme CEI EN 6100-4-3 e MIL-STD-461E/F. Allo stato attuale, la camera è predisposta per l'installazione del sintonizzatore-agitatore; le catene di misura sperimentali (a meno del controllo remoto del sintonizzatore-agitatore) sono state allestite e

collaudate; il software di gestione è stato realizzato e collaudato sulle catene sperimentali da 200 MHz a 1 GHz e predisposto per l'integrazione fino a 18 GHz.

2. Qualificazioni meccaniche e sismiche: studio dell'integrazione fra prove di tipo e simulazioni numeriche, utilizzando sistemi di acquisizione dei dati sperimentali per mezzo di telecamere ad alta risoluzione nella banda dell'infrarosso vicino e codici numerici di simulazione meccanica e sismica; l'obiettivo finale è lo studio dei limiti di applicabilità dei risultati delle analisi numeriche ai processi di qualificazione nucleare su sistemi complessi similari. L'attività di ricerca è stata al momento rivolta al confronto e alla valutazione della relativa accuratezza delle risposte tra dati sperimentali ottenuti mediante prove su tavola vibrante, acquisiti mediante il sistema STEX della MTS ed il sistema di monitoraggio innovativo denominato 3DVision installato nel laboratorio di prove dinamiche e controllo vibrazioni in ENEA Casaccia (Ed. F65-UTT MAT-QUAL).

Principali soggetti esterni coinvolti

I principali soggetti esterni coinvolti nel tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione" sono:

- CIRTEN – Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare (co-beneficiario).
- SIET SpA (sub-contraente).
- FN SpA (co-beneficiario).
- Università Politecnica delle Marche (co-beneficiario).

Per ciascuno di questi soggetti viene fornito una sintesi delle attività ad essi affidate e dei relativi risultati ottenuti.

CIRTEN

L'impegno del Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica (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: i Politecnici di Milano (PoliMI) e Torino (PoliTO) e le Università di Palermo (UniPA), di Pisa (UniPI), di Roma "La Sapienza" (UniRoma1), di Padova (UniPD) e di Bologna (UniBO). Il CIRTEN, rappresentato dal prof. G. Forasassi, ha svolto un ruolo istituzionale importante nell'ambito della formazione ed informazione e delle attività scientifiche e tecnologiche di R&D nel campo dell'energia nucleare. Tali attività vengono riportate in sintesi in quanto segue, con riferimento alle 5 Linee Progettuali.

Studi sul nuovo nucleare

Il contributo del CIRTEN ha riguardato i seguenti obiettivi previsti.

Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali

Il CIRTEN è stato presente nelle principali organizzazioni che si occupano di energia nucleare sia a livello nazionale che internazionale (ENEN-European Nuclear Education Network Association, WNU-World Nuclear University, INSTN-National Institute for Nuclear Science and Technology, etc.) ed ha assicurato la partecipazione dei suoi rappresentanti in gruppi di lavoro internazionali.

Partecipazione al Progetto internazionale OECD -NEA "Halden Reactor Project"

Il CIRTEN-UniPI (GRNSPG) ha contribuito alla parte del documento congiunto ENEA-CIRTEN, relativa alla review dell'attività svolta in Halden sul tema della sperimentazione e studio del comportamento del combustibile e materiali, in condizioni incidentali LOCA (Loss of Coolant Accident) e RIA (Reactivity Initiated Accident), evidenziando alcune prospettive di interesse nazionali a riguardo.

Il CIRTEN PoliMI ha contribuito al review delle attività attuali Halden Project, sia per la parte Fuel&Materials che Instrumentation&Control, focalizzando in particolare gli aspetti di sperimentazione e problematiche comportamentali di combustibile e materiali in reattore, insieme agli aspetti rilevanti riguardanti la strumentazione in reattore.

Studi per la sicurezza dei reattori nell'ambito dell'Accordo ENEA-IRSN

Il contributo di CIRTEN UniRoma1 è consistito nello sviluppo di una metodologia originale sulla ricostruzione del segnale di hot spot sulla base di segnali e misure (relativi ad eventi di fissione, o cattura neutronica) provenienti da strumenti (collettroni/SPND) inseriti nel nocciolo di reattori di grandi dimensioni.

Studi di meccanica strutturale e relativa normativa tecnica nell'ambito dell'Accordo ENEA-CEA

Il lavoro svolto da CIRTEN ha riguardato:

- una descrizione della struttura della nuova normativa Francese RCC-MRx, in particolare della nuova versione Draft 2010 della AFCEN (da poco acquisita). Vista la complessità del documento, è stata data una

presentazione della struttura, dello scopo e dei vari tomi della norma RCC-MRx.

- Una analisi dettagliata dei metodi per la valutazione della deformazione progressiva (Ratcheting) e dell'Effciency Diagram. In particolare vengono descritti i criteri applicabili per la prevenzione del danneggiamento nei casi di creep significativo o trascurabile ed in presenza o meno di irraggiamento.
- Una descrizione dettagliata delle norme ASME equivalenti (ASME Section NH appendix T) per analisi elastiche ed analisi inelastiche semplificate. Una comparazione sintetica delle due norme per alcune combinazioni di carico con evidenziazione delle peculiarità e dei possibili conservativismi.

Prosecuzione degli studi di scenario, valutazioni economiche e partecipazione al Gruppo Internazionale IAEA-NEA Uranium Group"

Il CIRTEN PoliMI ha effettuato con ENEA le valutazioni economiche comparate su scenari d'investimento riguardanti reattori di grande e piccola-media taglia, effettuate con il proprio modello INCAS (INtegrated model for the Competitiveness Analysis of the Small-Medium sized reactors). I risultati riportati, sono stati presentati all'11th IEMPT meeting della NEA/OECD (Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Novembre, 2010). Seppur la base di riferimento presa fosse il caso italiano, il lavoro è generalizzabile su scala Europea.

Reattori evolutivi

Il contributo del CIRTEN ha riguardato tutti gli obiettivi previsti. Nel seguito si riporta obiettivo per obiettivo una descrizione delle attività e dei risultati.

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

Nell'ambito di questo obiettivo il Politecnico di Torino ha collaborato alla caratterizzazione sperimentale della sonda ad impedenza a freddo sviluppata da SIET e allo sviluppo e verifica di una catena di misurazione costituita da una turbina, un drag disk e dalla sonda stessa. Le prove realizzate sul circuito sperimentale del dipartimento di Energetica del PoliTO in condizioni statiche ed in deflusso verticale ascendente di aria-acqua hanno mostrato le potenzialità e le problematiche legate all'utilizzo dello strumento.

Sviluppo componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia

Le attività riguardano due componenti considerati particolarmente critici in reattori SMR: downcomer-fondo vessel e generatore di vapore.

L'UniPA ha proseguito nell'ambito di questo obiettivo l'attività di ricerca già svolta nel corso delle precedenti annualità riguardante la validazione del codice termoidraulico avanzato Relap5/Mod3.2.β, modificato per il calcolo delle cadute di pressione in tubi elicoidali interessati da deflussi. Una seconda fase delle attività ha comportato l'implementazione di nuove procedure valide per lo studio dello scambio termico bifase in condotti elicoidali. La validazione del codice modificato è stata effettuata facendo ricorso all' estesa campagna sperimentale condotta dal Dipartimento dell'Energia del PoliMI presso i laboratori della SIET di Piacenza.

Il PoliMI ha anche iniziato la fase realizzativa di un impianto per la sperimentazione termoidraulica di base su generatori di vapore per reattori SMR e per reattori di IV generazione.

Presso gli impianti SIET è stata individuata l'area IETI come zona idonea ad ospitare un impianto per ricerca termoidraulica di base. Le sue caratteristiche ed alcune attrezzature già presenti consentono con i dovuti interventi manutentivi e di modifica, di realizzare configurazioni più semplici ma già utili ai fini degli obiettivi di ricerca.

Simulazione ingegneristica: sviluppo di un simulatore

Tutte le attività sono state svolte in stretta collaborazione con ENEA. Alla definizione delle caratteristiche funzionali e tecniche dei futuri simulatori ingegneristici hanno partecipato il PoliMI, l'UniPI e l'UniRoma1, mentre nell'implementazione ed utilizzo di simulatori semplificati "desktop" sono state coinvolte UniPI, UniRoma1 e UniPA.

Analisi di sistema: Analisi eventi esterni

Le attività sono state focalizzate in continuità con i precedenti studi alla valutazione dei margini di sicurezza in caso di eventi esterni per un reattore di piccola-media taglia. A questo scopo sono stati analizzati con un approccio deterministico gli effetti di un sisma su un edificio reattore provvisto di isolatore e dell'impatto di un aereo.

Il PoliMI ha effettuato una valutazione probabilistica del rischio sismico per l'edificio del reattore in caso di implementazione di un sistema di isolamento della base fondato su isolatori HDBR, in continuità con gli studi condotti sulla precedente configurazione senza isolamento.

Sviluppo e validazione codici di calcolo

Il DIMNP dell'UniPI per questo obiettivo si è dedicato allo sviluppo e all'applicazione di una metodologia per accoppiare un codice di sistema per la termoidraulica del circuito primario del reattore con un codice dedicato alla simulazione del contenimento. I codici selezionati per questo accoppiamento sono stati il RELAP5 Mod 3.3 patch 3 e il Gothic version 7.2b (QA). Il sorgente del codice RELAP5 è reso disponibile all'Università di Pisa, tramite l'accordo tra ISPRA e US-NRC, mentre una versione eseguibile di Gothic con diritti di utilizzo limitati è stata acquisita da Numerical Applications, Inc. (NAI).

Il Dipartimento dell'Energia dell'UniPA ha sviluppato una nodalizzazione per il codice di sistema TRACE dell'impianto SPES-3 al fine di rendere disponibile un ulteriore modello numerico dell'impianto per un approccio di tipo benchmark alla progettazione dei test da effettuarsi sulla facility ed in prospettiva con lo scopo di validare il codice stesso. Un'attività di supporto alla progettazione delle sezioni di prova del Jules Horowitz Reactor (JHR) è stata condotta dall'UniBO attraverso il distacco di personale presso il CENTRO di ricerca del CEA di Cadarache. Questa attività ha riguardato lo sviluppo di un modello termo-idraulico e neutronico del core del JHR per mezzo del codice di cinetica DULCINEE.
E' stato realizzato dal GRNSPG (Gruppo Ricerca Nucleare San Piero a Grado) dell'UniPI uno studio di fattibilità per un programma sperimentale da svolgersi presso l'impianto SPES-2. Data la rilevanza dell'argomento della diluizione del boro relativamente alla sicurezza dei reattori nucleari, si è deciso di esaminare la possibilità di effettuare l'esperimento nell'apparecchiatura SPES.

Reattori di IV Generazione

Nel seguito si riporta obiettivo per obiettivo una descrizione delle attività e dei risultati.

Definizione ed implementazione preliminare di un laboratorio per l'investigazione della termo-fluidodinamica dei metalli liquidi

Nell'ambito delle azioni tese alla definizione, progettazione e avvio di implementazione di un laboratorio di misura di grandezze fisiche per la caratterizzazione termo-fluidodinamica dei metalli liquidi, si è reso necessario provvedere a delle azioni di ricerca e sviluppo tese alla caratterizzazione preliminare di Generatori di Vapore (GV) per applicazioni in sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR). Il CIRTEN (UniRoma1) ha contribuito a tale attività realizzando una analisi parametrica sulle prestazioni del sistema. In particolare il CIRTEN (UniRoma1) ha realizzato:

- una approfondita ricerca bibliografica finalizzata all'individuazione di opportune correlazioni e/o modelli che possano essere utilizzati per la definizione prima e lo studio analitico poi del sistema di generazione del vapore, nonché dati e studi riguardanti i materiali utilizzabili per il riempimento dell'intercapedine, le tecniche più efficaci di riempimento, i sistemi di accrescimento della turbolenza in sistemi a gas o vapore;
- calcoli numerici preliminari, per la simulazione analitica del sistema, in supporto alla successiva fase progettuale, costruttiva e sperimentale, attraverso la quale saranno focalizzati aspetti che verranno a essere investigati nel corso delle successive campagne sperimentali.
- progettazione concettuale della sezione di prova per la caratterizzazione sperimentale delle prestazione di un singolo elemento a doppia parete.

Caratterizzazione sperimentale dell'interazione metallo liquido pesante - acqua e qualifica rottura generatore di vapore LFR

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo-fluidodinamica si sono avviate azioni tese a supportare, mediante investigazione analitico – sperimentale sull'interazione metallo liquido acqua, la caratterizzazione di generatori di vapore per sistemi LFR, in sinergia anche con progetti europei quali THINS e LEADER (FP7, EC).

L'attività di CIRTEN (UniPI) è consistita principalmente nella progettazione delle prove sperimentali d'interazione tra leghe di piombo e acqua in pressione, definendo sia le modifiche e aggiornamenti da apportare all'impianto LIFUS 5, sia le condizioni operative. La collaborazione ha riguardato quindi il supporto alla progettazione delle prove sperimentali di interazione tra metallo liquido ed acqua in pressione da effettuarsi sull'impianto LIFUS5.

Sono state inoltre realizzate dal CIRTEN (UniPI) analisi numeriche di pre-test mediante il codice di calcolo SIMMER al fine di definire le condizioni operative per la successiva campagna sperimentale. Infine si è supportato ENEA nella progettazione definitiva delle modifiche dell'impianto con particolare riguardo alla nuova linea d'iniezione dell'acqua, alla sezione di prova per la qualifica del generatore di vapore per LFR e alla selezione di nuova strumentazione per l'acquisizione di dati sperimentali.

Realizzazione circuito a metallo liquido per qualifica girante per pompa centrifuga

Nell'ambito delle azioni tese alla realizzazione del circuito a metallo liquido pesante HELENA, il CIRTEN (UNIPI) ha provveduto al supporto della progettazione definitiva dell'impianto HELENA mediante simulazione numerica con codice di sistema (RELAP5) del circuito secondario ad acqua in pressione dell'apparecchiatura

Implementazione strumentazione sezione di prova e qualifica dello scambiatore prototipico DHR per sistemi LFR

Nell'ambito delle azioni tese alla implementazione di strumentazione aggiuntiva sull'impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova ICE (INTEGRAL CIRCULATION EXPERIMENT) per la completa caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW per sistemi LFR, realizzato ed installato presso il CR ENEA del Brasimone, il CIRTEN (UniPI) ha realizzato calcoli di post-test per la completa interpretazione dei transitori operazionali simulati sperimentalmente. In aggiunta, il CIRTEN (UniPI) ha realizzato delle simulazioni di fluidodinamica di pre-test della sezione di prova ICE, nel caso in cui a questa sia aggiunto uno scambiatore per la rimozione del calore di decadimento ad aria (WA-DHR), realizzato con singolo tubo a baionetta e a doppia parete.

Progettazione e realizzazione di un pin bundle per l'investigazione dello scambio termico in regime di convezione mista in sistemi LFR

Nell'ambito delle attività implementate per lo sviluppo dei sistemi LFR, CIRTEN (UniPI) ha supportato ENEA nella progettazione e realizzazione di un pin bundle per le misure di scambio termico e perdite di carico in regime di convezione libera, fenomeno che caratterizza il comportamento del nocciolo LFR in condizioni di transitori operazionali o incidentali. CIRTEN (UniPI) ha realizzato simulazioni numeriche sul comportamento termoidraulico del bundle, mediante un codice di fluidodinamica computazionale.

Progettazione e studio di fattibilità di impianto a sodio per shock termici e ratchetting sui materiali

Nell'ambito delle azioni implementate tese allo sviluppo delle tecnologie dei sistemi SFR, si è definito come prioritaria la progettazione e relativo studio di fattibilità di un impianto al sodio per la caratterizzazione degli effetti dello shock termico su componenti meccanici, in condizione di rapido transitorio operazionale o incidentale. In particolare l'impianto sarà dedicato alla sperimentazione del fenomeno del ratchetting sui materiali strutturali del generatore di vapore, in sinergia con quanto previsto nel progetto europeo MATTER (FP7 EC), coordinato da ENEA.

Il CIRTEN (UniRoma1) ha realizzato, in collaborazione con ENEA, il progetto concettuale e il relativo studio di fattibilità di un piccolo impianto sperimentale a sodio, di semplice gestione ma configurato con un elevato grado di flessibilità (multipurpose facility), al fine di supportare l'essenziale ricostituzione delle competenze ENEA nel settore della tecnologia del sodio. L'impianto è stato quindi progettato in maniera tale da presentare un elevato grado di automazione, e tenendo anche conto delle esigenze derivanti dall'attuale normativa in materia di sicurezza sul lavoro, prevedendo una gestione remotizzata.

Ricognizione ad ampio spettro, individuazione e studio degli effetti strutturali caratteristici dei transitori termici in reattori di quarta generazione

Tra le azioni tese alla qualifica dei materiali strutturali per sistemi nucleari innovativi, Il CIRTEN (UniRoma1) ha realizzato in collaborazione con ENEA una ricognizione ad ampio spettro sugli effetti strutturali indotti da transitori termici operazionali ed accidentali in reattori di quarta generazione, ed in particolare sui sistemi refrigerati a sodio (SFR). Sono stati analizzati e studiati i modi di danneggiamento strutturale e in dettaglio si è realizzata una approfondita analisi dei principali criteri di comportamento strutturale di componenti di reattori veloci allorché sottoposti a carichi termici ciclici nel campo delle elevate temperature (vessel).

Sviluppo di barriere anti permeazione del Trizio

Nell'ambito delle attività avviate in supporto allo sviluppo dei sistemi nucleari refrigerati a sodio, è previsto che siano implementate le tecnologie e il "know how" dei metalli liquidi pesanti in supporto alla definizione del circuito secondario del DEMO SFR ASTRID, secondo quanto stabilito nell'ambito dell'accordo ENEA-CEA.

In questo contesto, Il CIRTEN (PoliTO), in collaborazione con ENEA, ha valutato la concentrazione di trizio nel circuito primario, intermedio e secondario di un reattore a sodio di IV generazione, studiandone anche la cinetica di diffusione e permeazione. A tale scopo è stato sviluppato un apposito modello di calcolo MATLAB (SFR-TPC) che utilizza come parametri di input le condizioni operative e i parametri geometrici dell' impianto refrigerato a sodio PFBR (Prototype Fast Breeder Reactor).

Sviluppo e validazione di codici di calcolo per la termoidraulica di sistema per reattori refrigerati a metallo liquido pesante

Il CIRTEN (UniBO) ha supportato ENEA nello sviluppo e validazione del codice di sistema CATHARE-2 per applicazioni in ambito LFR; la validazione si è resa possibile utilizzando dati sperimentali appropriati già disponibili dagli impianti ENEA del Brasimone (NACIE). In particolare UniBO ha provveduto a modellare la facility sperimentale NACIE con il codice CATHARE-2, verificando la capacità del modello di riprodurre in maniera affidabile ed efficace i test di circolazione naturale ed assistita già realizzati. Inoltre, UniBO ha implementato, nel codice di calcolo termoidraulico FEM-LCORE, un modello avanzato di turbolenza.

Sviluppo e validazione modelli di calcolo per la neutronica e la cinetica di nocciolo LFR

Il CIRTEN (PoliTO) ha sviluppato un modello neutronico, di tipo coarse-mesh, in grado di operare con la necessaria velocità grazie alla fattorizzazione della distribuzione del flusso in funzione del tempo in un'ampiezza che descrive la parte più rapida dell'evoluzione e in una forma, il cui calcolo è più oneroso ma che può essere eseguito su una scala temporale molto più lenta. Questa struttura del calcolo neutronico si è rivelata utile per l'accoppiamento con la termoidraulica, la cui evoluzione temporale è caratterizzata da costanti di tempo di molti ordini di grandezza maggiori di quelle neutroniche. Per una più esaustiva analisi è stato inoltre incluso un modulo relativo alla meccanica (elaborato da ENEA), che in prima approssimazione include termini macroscopici attraverso l'utilizzo dei coefficienti di reattività di espansione radiale ed assiale del nocciolo.

Nell'ambito della neutronica di sistemi a spettro neutronico veloce, il CIRTEN (UniRoma1) ha supportato la validazione del codice di calcolo neutronico ERANOS. Per la validazione del codice, il lavoro ha implementato un confronto tra le quantità integrali calcolate con quelle ottenute in esperienze benchmark. Il codice ERANOS in particolare è stato utilizzato per effettuare calcoli di coefficienti di sensitività facendo uso dei metodi perturbativi generalizzati (GPT).

Concettualizzazione del DEMO LFR

Il CIRTEN (PoliMI) ha provveduto alla continuazione dello sviluppo del modello di dinamica di nocciolo semplificato, basato sull'approssimazione POINT-KINETICS e su un modello di scambio di calore a temperature medie, al fine di consentire un approccio preliminare alle problematiche di controllo del sistema (analisi relativamente veloce della dinamica e della stabilità del sistema). Il modello oltre al nocciolo, comprende anche il generatore di vapore, la pompa primaria e la piscina del reattore.

Rifiuti radioattivi

Nel seguito si riporta obiettivo per obiettivo la descrizione delle attività e dei risultati svolti dal CIRTEN.

Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi

Proseguendo e finalizzando quanto svolto nelle precedenti annualità, il CIRTEN (PoliMI) ha effettuato:

- il consolidamento e la validazione dei moduli di modellazione sviluppati, e relativi codici di simulazione;
- l'estensione dei moduli di modellazione del rilascio e trasporto di radionuclidi a specifici processi di particolare rilevanza per la valutazione delle prestazioni di sicurezza del deposito;
- l'"ibridizzazione" con modelli deterministici per il trasporto di contaminanti nelle acque di sottosuolo;
- l'investigazione di meta-modelli empirici più snelli per l'eventuale sostituzione di alcuni dei moduli per l'analisi di sicurezza, particolarmente onerosi dal punto di vista computazionale, al fine di poter effettuare in modo computazionalmente efficace la propagazione delle incertezze e le analisi di sensitività.

Acquisizione, sviluppo e studio di strumenti e procedure di analisi di sicurezza, performance assessment e caratterizzazione di siti candidati per un deposito di rifiuti radioattivi e per analisi di scenario.

L'attività è finalizzata all'analisi dello stato dell'arte, sulla base degli indirizzi dell'IAEA, sui criteri per la localizzazione di un deposito di rifiuti radioattivi considerando in particolare le esigenze tecniche necessarie per la caratterizzazione radiologica del sito allo stato zero in termini di dinamica dei radionuclidi naturali nei corpi idrici superficiali e profondi e nel suolo.

Il programma ha una valenza poliennale; nella presente annualità il CIRTEN ha effettuato uno studio esaustivo delle normative internazionali circa la localizzazione dei depositi con riferimento ai radionuclidi in esso stoccati e allo loro mobilità nei diversi comparti ambientali.

Il CIRTEN (UniBO) ha anche analizzato la possibilità di utilizzare GENII-LIN, un noto software di radioprotezione ambientale, per calcoli di "performance assessment" di depositi di rifiuti. Il GENII-LIN è in grado di stimare dosi potenziali a individui e popolazioni da rilasci sia acuti che cronici di radionuclidi in ambiente e da contaminazione residua da attività di dismissione.

Indagini conoscitive relative alle problematiche inerenti lo smaltimento geologico

Sulla base dell'esperienza acquisita nell'analisi dei depositi di smaltimento dei rifiuti di II categoria, è stata avviata una prima indagine conoscitiva relativa alle analoghe problematiche inerenti lo smaltimento geologico dei rifiuti ad alta attività e lunga vita. Il lavoro di CIRTEN (UniRoma1) ha riguardato l'aggiornamento del materiale bibliografico ed il consolidamento delle esperienze delle organizzazioni ed istituzioni di ricerca del settore, al fine di costituire la base conoscitiva per gli sviluppi successivi. In particolare sono state approfondite le conoscenze scientifiche sui principali tipi di formazioni che si stanno studiando in Europa per i depositi geologici, quali il granito, le argille (plastiche o indurite) e i cristalli di sale (salgemma).

In parallelo l'ENEA e il CIRTEN hanno aderito alla IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform) partecipando ai lavori per la definizione della relativa SRA (Strategic Research Agenda), documento di grande rilevanza in quanto individua i temi di R&S in cui si devono ancora conseguire importanti progressi scientifici e tecnologici per raggiungere l'obiettivo comune, ovvero la realizzazione del primo deposito geologico europeo.

Caratterizzazione di matrici per il condizionamento di rifiuti radioattivi da processi di elettroraffinazione.

CIRTEN (PoliMI) ha effettuato la caratterizzazione mediante spettri di diffrazione X di polveri, spettri infrarossi in trasformata di Fourier, analisi termica e microscopia elettronica (SEM-EDS) di matrici vetrose e vetroceramiche contenenti sali esausti (cloruri) utilizzati nei bagni degli elettroraffinatori per la separazione attinidi/lantanidi.

CIRTEN (PoliTO) ha condotto degli studi, utilizzando codici di calcolo ad hoc, relativi al rilascio di radionuclidi dalle matrici di contenimento.

Qualifica di componenti e sistemi

Il Consorzio CIRTEN ha partecipato alle attività previste contribuendo in modo significativo alle tematiche affrontate nei seguenti obiettivi.

Modelli e piattaforme di calcolo per le analisi incidentali e di sicurezza

CIRTEN (UniBO) è coinvolto nell'implementazione, lo sviluppo e la validazione della piattaforma NURISP sul sistema CRESCO (Centro Computazionale di Ricerca sui Sistemi Complessi) dell'ENEA, al fine di studiare il comportamento termoidraulico dei reattori nucleari evolutivi LWR. La piattaforma NURISP è particolarmente adatta alla gestione di sistemi molto complessi, in cui è necessario poter procedere alla risoluzione di problemi mediante l'accoppiamento di diversi codici.

Il prodotto finale delle attività è consistito nella validazione di alcuni tra i codici di calcolo principali implementati sulla piattaforma NURISP, in particolare NEPTUNE; TRIO_U e CATHARE, utilizzando dati sperimentali forniti dalle facilities SPES-99 e PERSEO e simulando anche condizioni incidentali e critiche.

Realizzazione di un database con descrizione di sistemi e componenti relativi ad un PWR di tipo evolutivo per sviluppo e validazione di modelli di calcolo per valutare scenari incidentali

Nell'ambito dei rispettivi Accordi di Programma ENEA e ERSE (ora RSE S.p.A) – MSE, è stato creato un gruppo di lavoro specialistico finalizzato alla rivitalizzazione in Italia delle competenze in materia nucleare, con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza. Questo gruppo, che ha assunto la denominazione di "Gruppo di Lavoro MILLE600", è coordinato da ENEA UTFISSM con ERSE, che funge da Segretario Scientifico.

L'obiettivo del GdL MILLE600 è la realizzazione di un documento tecnico contenente dati ed informazioni utili per chi fosse intenzionato ad intraprendere lavori di simulazione con codici e calcoli per la realizzazione di un progetto di massima di un reattore nucleare di III generazione avanzata ad acqua leggera in pressione. CIRTEN ha contribuito in maniera significativa con la partecipazione di UniPI, UniPA, UniRoma1 e del Gruppo GRNSPG di San Piero a Grado.

La validità della documentazione e dei dati impiantistici raccolti è confermata dal fatto che essi rappresentano una sana approssimazione di dati costruttivi reali, messi a disposizione da costruttori o ricavati attraverso stime ingegneristiche. La non collegabilità diretta dei dati ad un impianto reale ed ai suoi piani progettuali dettagliati o varianti, valorizza la loro importanza ai fini delle molteplici attività di sviluppo e simulazione possibili, ma si precisa anche che proprio per la loro maggiore "elasticità", tali dati non possono essere considerati adeguati per analisi di licensing.

Studio e sviluppo critico di metodi di analisi delle incertezze nei processi di analisi del rischio

Tale studio è stato finalizzato alla identificazione delle sorgenti e delle tipologie di incertezza che entrano nelle diverse fasi di ricerca. Si è proceduto anche alla identificazione degli adeguati strumenti analitici al fine di poter associare la giusta confidenza ai risultati ottenuti ed alle decisioni gestionali che da essi derivano. La partecipazione del CIRTEN ha coinvolto UniPI e UniBO.

Attività propedeutiche per la messa in funzione di un impianto termoidraulico ad alta pressione per pretest su simulacri di componenti

Sono state svolte attività propedeutiche per il ripristino della funzionalità dell'impianto termoidraulico VAPORE, a suo tempo realizzato per test ad alta pressione su componenti tipici dei circuiti principali di reattori nucleari ad acqua. Le attività comprendono azioni di varia natura e sono state condotte parallelamente da ENEA e da CIRTEN (UniRoma1). In particolare, CIRTEN ha:

- simulato tramite codice RELAP, sulla base delle specifiche prodotte da ENEA, l'esecuzione della campagna di prove per la qualifica del prototipo, verificando l'adeguatezza dell'impianto VAPORE ad effettuare la suddetta

campagna nel rispetto della matrice sperimentale;

- fornito i dettagli della gestione dell'impianto per l'eventuale esecuzione della campagna sperimentale e formulato proposte tecniche anche di modifica strutturale ove necessario.

Sviluppo di procedure sperimentali innovative per test di materiali per irraggiamento da neutroni

Le attività di sviluppo di procedure sperimentali innovative per test di materiali per irraggiamento da neutroni, frutto della collaborazione tra ENEA e CIRTEN (UniRoma1, UniPI), si avvalgono della presenza nel C.R. ENEA Casaccia dei reattori nucleari di ricerca TRIGA RC-1 (neutroni termici) e RSV Tapiro (neutroni veloci). UniRoma1 ha effettuato la caratterizzazione del flusso neutronico alla sezione di uscita del collimatore posto all'interno del canale tangenziale passante del reattore TRIGA RC-1, mediante simulazioni con il codice MCNP – Monte Carlo N-Particle. UniPI ha effettuato la valutazione della possibilità di applicazione di rivelatori di neutroni 2D innovativi

Caratterizzare di materiali ceramici compositi da impiegare in reattori nucleari di nuova generazione con qualifica dei metodi e delle apparecchiature impiegate

L'attività in carico a CIRTEN (UniRoma1) è strettamente correlata alla produzione, da parte di FN S.p.A., di materiali compositi a matrice ceramica (C_f/C e SiC_f/SiC) per componenti di reattori nucleari a fissione di nuova generazione.

Progettazione di una consolle di concezione avanzata per la facility di irraggiamento gamma Calliope

L'attività proposta, svolta in collaborazione con CIRTEN (UniRoma1), ha riguardato la progettazione di una nuova consolle di comando per l'impianto di irraggiamento gamma Calliope (C.R. ENEA Casaccia). La facility Calliope, che presenta caratteristiche uniche sia a livello italiano che europeo, è in grado di rispondere a numerose richieste nazionali ed internazionali, consentendo di effettuare test di qualifica, di affidabilità e di valutazione della resistenza a radiazione di sistemi e componenti. UniRoma1 fa definito i requisiti del sistema e del software di controllo (livello di sicurezza SIL 3), ed ha proposto il *revamping* del Sistema di Controllo Sorgente e l'implementazione di un Sistema di Acquisizione e Reporting. Tutte le attività sono state condotte nella stretta osservanza del criterio generale che prevede la netta separazione tra le funzioni di controllo di sicurezza e di processo.

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

Le attività sono state svolte da ENEA e da CIRTEN (UniPI, PoliTO). PoliTO ha effettuato prove di compatibilità elettromagnetica. E' stata verificata la possibilità di eseguire in camera reverberante prove di immunità radiata su sistemi e componenti (parte del processo di qualificazione nucleare), con modalità presumibilmente più severe delle prove eseguite in camera semianecoica. UniPI ha condotto prove di qualificazioni meccaniche e sismiche. E' stato condotto uno studio dell'integrazione fra prove di tipo e simulazioni numeriche, utilizzando sistemi di acquisizione dei dati sperimentali per mezzo di telecamere ad alta risoluzione nella banda dell'infrarosso vicino e codici numerici di simulazione meccanica e sismica.

Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti

(Referente A. Moreno)

La valorizzazione energetica di biomasse e residui di lavorazioni agricole o industriali e dei rifiuti può essere ottenuta attraverso la produzione di biogas, mediante digestione anaerobica (DA) delle biomasse fermentescibili, e di syngas, mediante gassificazione delle biomasse ligno-cellulosiche. Il biogas prodotto, dopo opportuna purificazione ed upgrading per ottenere il biometano, può essere immesso nella rete gas nazionale, oppure il biogas e il syngas possono essere utilizzati in sistemi di piccola taglia distribuiti sul territorio per generazione di elettricità e calore in cicli termici (motogeneratori, turbogeneratori, moduli ORC) o in celle a combustibile ad alta temperatura.

La produzione di biometano da immettere nella rete richiede, da un lato, l'ottimizzazione dei processi di digestione anaerobica, per aumentare la resa e laquota di metano prodotta, dall'altro lo sviluppo di sistemi di depurazione che consentano di ottenere il gas della qualità necessaria.

La diffusione di sistemi di generazione di piccola/media taglia richiede invece la disponibilità di impianti affidabili, di facile gestione e competitivi, da sviluppare attraverso l'ottimizzazione dei processi di produzione e purificazione del gas, la messa a punto delle tecnologie di generazione/cogenerazione e l'integrazione tra i vari sottosistemi.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Le attività condotte per questo tema di ricerca sono il proseguimento delle attività degli anni precedenti con l'aggiunta di nuovi indirizzi volti a completare la tematica della produzione elettrica attraverso le biomasse.

Infatti le attività hanno riguardato in parte il completamento di alcune linee di ricerca del precedente triennio con la realizzazione di prototipi da laboratorio in scala significativa e l'avvio di attività sperimentali su impianti di taglia reale ed in parte l'avvio di nuove attività sperimentali scala laboratorio.

Un tema nuovo affrontato nel presente anno è stato quello della trasformazione del biogas in biometano da immettere nella rete, potenziando le attività svolte in precedenza sull'ottimizzazione dei processi di digestione anaerobica e sullo sviluppo di sistemi di depurazione (clean up) per abbattere i contaminanti, ed avviando nuove attività sui processi di separazione della CO_2 (fuel upgrading) contenuta nel biogas, al fine di raggiungere il grado di qualità richiesto dalla rete.

Sono continuate le attività di sviluppo di sistemi di generazione di piccola taglia con la messa a punto delle tecnologie di generazione/cogenerazione (soprattutto nel caso delle celle a combustibile) e all'integrazione tra i due sottosistemi, quello di produzione e purificazione del gas e quello di valorizzazione energetica (impianto di gassificazione di biomasse accoppiato con sistema a celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC). L'attività di laboratorio ha riguardato in particolare lo sviluppo ed il testing di nuovi materiali nell'ottica di rendere le MCFC più resistenti ai contaminanti nonché più affidabili e meno costose.

Più in dettaglio le attività hanno riguardato lo sviluppo di dei sistemi di produzione di biogas (sia digestori anaerobici che gassificatori), lo sviluppo di sistemi di clean up e fuel upgrading, lo sviluppo di componenti di celle a carbonati fusi più resistenti agli inquinanti e di processi di produzione di componenti a basso costo ed infine lo studio delle problematiche che riguardano l'accoppiamento delle celle a combustibile con sistemi di digestione anaerobica e di gassificazione delle biomasse.

Sono inserite inoltre nel programma alcune attività di supporto ai Ministeri per le collaborazioni internazionali nel settore dell'idrogeno e delle celle a combustibile e la partecipazione dell'ENEA alle stesse. Gli obiettivi previsti nella presente annualità sono:

A. Ottimizzazione della produzione di biogas attraverso processi fermentativi e sviluppo di un prototipo da laboratorio.
B. Ottimizzazione dei processi di abbattimento degli inquinanti dal biogas e di trattamento del digestato.
C. Sviluppo di processi e sistemi per l'arricchimento in metano di biogas, al fine di ottenere la composizione richiesta dalla rete.
D. Sistemi di generazione/cogenerazione a biogas o syngas da biomasse: analisi delle tecnologie per specifiche applicazioni; sviluppo di componenti di celle a combustibile ad alta temperatura a minor costo e resistenti agli inquinanti.
E. Sperimentazione di un sistema da 125 kW gassificatore di biomasse/celle a combustibile.

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

L'obiettivo A prevedeva lo sviluppo di processi di digestione e codigestione anaerobica (a partire da rifiuti urbani, residui agroalimentari, deiezioni animali, colture energetiche, ecc.), ottimizzati in termini di resa in percentuale di metano nel biogas e di limitazione dei contaminati. Le attività sperimentali sono volte a fare da supporto alla realizzazione di un impianto pilota in scala significativa sia per prove di laboratorio in continuo sia per eventuali prove sul campo a supporto della progettazione di impianti reali. A questa attività, in completamento a quelle degli anni precedenti, si è deciso di affiancare un nuovo filone allo scopo di estendere il range di applicazione della digestione anaerobica iniziando un'attività di studio di processi di digestione anaerobica innovativi in grado di utilizzare biomasse lignocellulosiche.

Ottimizzazione di processi di co-digestione

L'oggetto dell'attività di ricerca è stata l'individuazione delle condizioni ottimali per la produzione di biogas puntando sull'ottimizzazione della resa sia del solo metano che della miscela H_2 e CH_4 mediante co-digestione anaerobica di substrati organici biodegradabili (frazione organica dei rifiuti urbani, fanghi dal trattamento delle acque reflue, deiezioni animali), ai fini di un successivo impiego energetico del biogas in tecnologie convenzionali, in celle a combustibile e per immissione in rete.

L'attività sperimentale è stata articolata tenendo conto dei risultati ottenuti nel corso delle precedenti annualità ed è stata svolta in diversi laboratori di ENEA e presso le università secondo una serie di prove sperimentali in scala di laboratorio con protocolli di prova concordati in maniera tale da poter avere risultati omogenei e comparabili tra di loro. In particolare:

- prove in batch per l'ottimizzazione del set-up sperimentale e dei parametri operativi al fine di massimizzare le rese di produzione del biogas. prove in semi-continuo a singolo e a doppio stadio per valutare la stabilità del processo biologico nel tempo nonché i vantaggi derivanti dalla separazione sequenziale delle fasi di digestione anaerobica;
- valutazioni tecnico-economiche basate sull'esecuzione di bilanci di materia e di energia nelle condizioni analizzate.

Presso ENEA sono stati avviati test di codigestione anaerobica di miscele composte di FORSU, reflui suinicoli e reflui bovini, in processi in batch e successivamente in semi-continuo. Sono stati inoltre avviati i primi test in batch per lo studio preliminare della produzione di idrogeno durante la fase acidogenica ed acetogenica della digestione anaerobica di FORSU, inoculata con fango aerobico ed anaerobico.
In seguito all'esito positivo delle prime analisi molecolari eseguite nel secondo anno di attività, l'indagine microbiologica ha riguardato un'analisi dettagliata della dinamica della popolazione microbica avvenuta durante il processo di digestione di reflui suinicoli: fango anaerobico in rapporto 1:1, che aveva prodotto i migliori risultati (55 °C e a pH iniziale 7). Le attività sperimentali condotte presso l'Università La Sapienza hanno riguardato essenzialmente l'individuazione delle condizioni ottimali per la produzione combinata di H_2 e CH_4 mediante co-digestione anaerobica di substrati organici biodegradabili (frazione organica dei rifiuti urbani e fanghi dal trattamento delle acque reflue). In particolare sono state condotte prove in batch di idrogeno genesi. (nella Figura 48 il set up sperimentale presso i laboratori della Sapienza) e prove in semi-continuo a singolo e a doppio stadio per valutare la stabilità del processo biologico nel tempo nonché i vantaggi derivanti dalla separazione sequenziale delle fasi di digestione anaerobica: a conclusione della fase di ottimizzazione sono state anche effettuate delle valutazioni tecnico-economiche basate sull'esecuzione di bilanci di materia e di energia nelle condizioni analizzate per determinare l'effettiva convenienza delle soluzioni proposte.

Figura 48. Set up sperimentale prove in batch

I risultati delle prove di laboratorio ottenuti nel presente anno e quelli ottenuti nelle precedenti annualità dell'accordo di programma sono stati utilizzati per il dimensionamento preliminare e la progettazione di un impianto pilota di taglia significativa (5 m^3 circa di volume totale del reattore) utilizzabile per eventuali prove in campo a supporto di impianti reali.

L'impianto pilota di digestione anaerobica, denominato DIMM-6000 (Digestore Modulare Mobile), la cui realizzazione è stata affidata alla Società Ecoinnovative Technologies S.r.l. (Spin off dell'ENEA di Bologna), è in grado di operare su miscele di substrati con un contenuto in sostanza secca fino al 15%. Nel caso di substrati con un maggior contenuto di solidi, si procederà ad una opportuna diluizione con acqua e, a processo avviato, con un parziale riciclo dell'effluente liquido del processo. L'impianto pilota, unico nel suo genere in Italia, è montato su un rimorchio stradale, il che lo rende facilmente trasportabile su strada ed installabile nel sito più opportuno per le attività di dimostrazione tenuto conto della logistica delle biomasse e del digestato.

L'impianto è di tipo a plug-flow inclinabile, con l'angolo di inclinazione che può essere modificato opportunamente in funzione delle esigenze sperimentali, cosa che rispetto al plug-flow classico, permette una migliore ritenzione e omogeneizzazione dei solidi all'interno del reattore stesso, permettendo quindi una migliore digestione di quelle frazioni organiche che richiedono tempi di degradazione maggiori. L'impianto così disegnato permette di ridurre la richiesta energetica per la miscelazione interna del materiale posto in digestione in quanto questa viene garantita in maniera sufficiente durante le fasi di carico dell'alimento e dalla produzione di gas, che determina un rimescolamento naturale della massa in fermentazione.

Data la sua caratteristica di variabilità dell'inclinazione, il volume del reattore non è definito a priori, ma viene determinato dall'inclinazione alla quale viene fatto lavorare e dalla pressione del gas alla quale viene gestito. L'impianto pilota è stato dimensionato per poter alimentare in continuo una cella a combustibile a carbonati fusi della potenza indicativa di 0,5-1 kW, ma la sua utilizzazione al fine di sperimentare processi innovativi di digestione anaerobica prescinde ovviamente dalla destinazione finale del gas prodotto, che può essere indifferentemente impiegato per la generazione di energia elettrica mediante micromotori, microturbine o celle a combustibile o per la successiva alimentazione di sistemi a membrana per l'upgrading del biogas a biometano. E' stato prodotto un rapporto relativo al progetto costruttivo del DMM-6000 ed il manuale di esercizio.

Studio dei processi di Digestione Anaerobica innovativi per la digestione di biomasse ligno-cellulosiche

Per questo obiettivo è stato studiato e sperimentato, con approccio innovativo, il processo di produzione di Biogas da letame animale, scarti industriali e rifiuti vegetali ad alto contenuto di cellulosa. L'attività sperimentale è stata focalizzata sulla fase acidogenica/acetogenica con la produzione di idrogeno come propedeutica ad un'efficiente metanogenesi. Infatti l'attività principale è stata la sperimentazione della produzione d'idrogeno da letame in co-digestione con altri scarti industriali, sperimentando e caratterizzando inoculi specifici di varia provenienza. Le prove sono state effettuate in batch da 125 ml con un volume di fermentazione di 50 ml a temperatura costante di 37 °C. Sono state effettuate tre repliche per ogni test. I risultati ottenuti, sono tra i più alti pubblicati nella letteratura mondiale e dal punto di vista applicativo aprono nuove prospettive industriali.

Sono stati selezionati ceppi batterici anaerobi facoltativi e mesofili, poco noti, con una buona resa idrolitica sulla cellulosa e specificità sui prodotti dell'idrolisi, anche in tal caso la produzione d'idrogeno per via fermentativa è risultata alta. I primi test di codigestione condotti nel presente anno hanno messo in evidenza la reale possibilità di migliorare l'efficienza del processo di produzione di idrogeno dal letame e/o liquame con l'aggiunta di substrati quali scotta e glicerolo crudo. Il lavoro futuro consisterà nell'individuazione della composizione ottimale della miscela di tali substrati, in modo da massimizzare la produzione di H_2. E' stata effettuata un'indagine sulla biodiversità delle popolazioni microbiche coinvolte in fermentazioni anaerobiche in condizioni di mesofilia a fine di studiare le condizioni migliori per la digestione anaerobica di biomasse lignocellulosiche.

Nella prima parte del lavoro si è proceduto all'ottimizzazione della tecnica di DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis, basata sull'elettroforesi di frammenti di DNA) in funzione della sua applicabilità ai campioni di nostro interesse e permettere un corretto svolgimento dell'analisi. Una volta messo a punto, il metodo DGGE è stato applicato ai campioni forniti da ENEA per effettuare l'analisi della biodiversità microbica dei campioni oggetti di questo studio (campioni-MIX). I risultati ottenuti hanno poi permesso di fare un primo screening che sarà utilizzato come base di partenza per la prosecuzione delle attività.

Al momento è stata completata l'estrazione dei plasmidi dai 100 cloni isolati e sono in corso le analisi per completare i profili di restrizione ed il sequenziamento. Contemporaneamente, si sta procedendo alla elaborazione delle sequenze già ottenute, per creare la sequenza di consenso che sarà confrontata con quelle contenute nei database di sequenza di 16S rDNA batterici ed identificare le specie batteriche che caratterizzano l'inoculo GM. La stessa procedura sperimentale sarà utilizzata nel prosieguo delle attività.

Ottimizzazione dei processi di abbattimento degli inquinanti dal biogas e di trattamento del digestato

Per quanto concerne questo obbiettivo, sono state attivate tre linee:

- lo sviluppo di metodologie per la riduzione degli inquinanti a livello di digestore (inibizione dei batteri solfatigeni; precipitazione dei contaminanti in fase solida mediante l'aggiunta di additivi chimici che non andassero ad inficiare l'intero processo di Digestione Anaerobica - DA), o sul gas prodotto (inserendo opportuni batteri, eventualmente selezionati e potenziati ad hoc, nella parte superiore del digestore e facendo avvenire una digestione aerobica dei composti dello zolfo);
- lo sviluppo di processi chimici o chimico-fisici per la purificazione del biogas a valle del digestore, a partire dai risultati già ottenuti e dai materiali selezionati e/o sintetizzati nella prima fase delle attività, attraverso lo studio del comportamento degli stessi in diverse condizioni operative e la messa a punto di un sistema in grado di ridurre il livello di inquinanti a pochi ppm;
- la valutazione dei problemi connessi con lo smaltimento del digestato e lo studio di possibili soluzioni per la riduzione del contenuto di composti azotati nello stesso.

Le attività riguardanti l'abbattimento degli inquinanti, come previsto dal piano annuale, hanno riguardato diversi approcci: l'abbattimento "in situ", cioè all'interno del digestore anaerobico; l'abbattimento "ex situ", cioè immediatamente a valle del digestore.

Analisi dei sistemi di abbattimento degli inquinanti nel DA

Le attività hanno riguardato la messa a punto di un processo innovativo basato sull'utilizzo della fotosintesi anossigenica che avviene secondo la reazione $6CO_2 + 12H_2S = C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 12SO$. Lo studio ha riguardato l'analisi dei processi naturali basati sullo stesso concetto e che avvengono in quasi totale assenza di luce al fine di individuare le lunghezze d'onda che possono promuovere artificialmente tale processo anche in un digestore.

A tale scopo si è pensato ad una combinazione di led monocromatici a basso consumo. È stato quindi realizzato un impianto consistente in un fotobioreattore illuminato artificialmente con luce composta da più bande per sperimentare l'efficacia dei batteri fotosintetici nella purificazione del biogas; la sperimentazione inizierà a breve con 4 specie batteriche provenienti da collezioni.

Sperimentazione di materiali per il clean up del biogas a valle del DA in condizioni operative simulate e realizzazione di un prototipo

Le attività sono state condotte con la collaborazione di due gruppi universitari (Università di Salerno ed Università Federico II di Napoli) data la grande mole di test sperimentali da effettuare.

Durante l'attività di ricerca sono stati sperimentati diversi materiali adsorbenti e/o catalizzatori in diverse condizioni operative (temperatura, concentrazione di inquinante, presenza/assenza O_2) con l'obiettivo di ottimizzare il processo di rimozione dell'H_2S (inquinante principale) in termini di efficienza di rimozione ed efficienza energetica.

Per quanto concerne la rimozione di H_2S tramite carboni attivi lo studio ha riguardato essenzialmente i carboni attivi, già selezionati durante lo screening condotto nel precedente anno di attività. Tali materiali sono stati dunque sperimentati al variare delle condizioni operative: concentrazione iniziale di H_2S, temperatura, presenza di O_2 nel gas da trattare. In parallelo alla sperimentazione condotta con i carboni attivi, alcuni ossidi metallici, individuati come catalizzatori per la reazioni di ossidazione selettiva dell'H_2S, sono stati sviluppati e testati determinando per alcuni di essi i parametri cinetici di base.

Come è noto l'H_2S è il contaminante sempre presente ed in maggiori quantità nel biogas, ma altre sostanze inquinanti possono essere presenti in funzione della tipologia di biomassa digerita. Si è studiato pertanto anche il comportamento degli stessi materiali verso altri contaminanti tipici del biogas (silossani e HCl), e si è investigato l'effetto "competitivo" della CO_2 (presente in concentrazione tra il 30 ed il 45% in una corrente di biogas) verso l'H_2S nei processi di adsorbimento. Uno studio sperimentale è stato in particolare condotto anche sull''HCl per verificare il suo adsorbimento da parte dei carboni attivi (già utilizzati per i test con l'H_2S) e delle zeoliti. Per le prove di adsorbimento di HCl è stato usato un impianto di laboratorio appositamente progettato e realizzato presso i laboratori ENEA, vedi Figura 49.

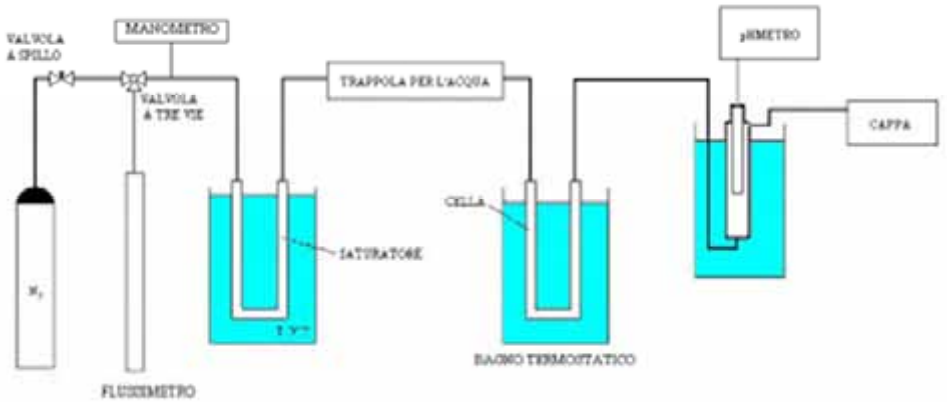


Figura 49. Apparecchiatura per le prove di adsorbimento di HCl

I risultati ottenuti durante la fase sperimentale hanno portato ad individuare uno dei carboni attivi come quello con maggiore capacità di rimozione dell'H_2S, migliore selettività in caso di presenza di CO_2, buona capacità di adsorbimento verso l'HCl (anche se di poco inferiore a quella mostrata delle zeoliti). Tale carbone, funzionalizzato con sali di rame e di cromo, è stato selezionato come riferimento nella progettazione del prototipo scala banco della taglia necessaria per alimentare un sistema da 1 kW.

Analisi dei problemi connessi con la gestione del digestato e la riduzione della sua componente azotata

Lo studio ha affrontato il problema dal punto di vista tecnico e normativo. Si è convenuto che la normativa nazionale costituisce un ostacolo allo sviluppo del settore e che ci sono prospettive di innovazione tecnico-scientifica per un miglioramento qualitativo degli scarti finali del processo di digestione anaerobica.

Dall'analisi complessiva delle problematiche e dalle considerazioni soprattutto di carattere energetico si è ritenuto di esaminare un'ipotesi alternativa che preveda l'utilizzo di celle a combustibile biologiche, definite BEAMR in cui l'ammonio potrebbe venir convertito in idrogeno ed azoto molecolare. Questo processo è stato definito come *bioelectro-chemically assisted microbial reactor* (BEAMR), ovvero l'elettrolisi microbica della sostanza organica (poiché elettroni e protoni derivano dalla sostanza organica e non dall'acqua). Sfruttando lo stesso principio e batteri chemoautotrofi è possibile ottenere una reazione di scomposizione dell'ammonio liberando azoto molecolare all'anodo e idrogeno al catodo. I batteri deputati sono i nitrificanti, che crescono con l'energia ricavata dall'ossidazione dell'ammonio a nitrato in presenza di ossigeno. Il processo utilizzerà questi batteri, o gli enzimi da essi estratti, in assenza di ossigeno. Ciò appare fattibile perché l'ossigeno è l'accettore di elettroni nell'ossidazione dell'ammonio e viene sostituito dall'anodo della cella che ricrea la stessa differenza di potenziale favorevole alla reazione. Gli elementi maggiormente innovativi riguardano la creazione di condizioni ottimali per l'adattamento alle condizione di reazione dei batteri ammonio ossidanti. Le notevoli prospettive di questo processo, e la sua potenziale applicabilità su larga scala, rendono interessante lo sviluppo di un'attività specifica di ricerca negli anni successivi.

Sviluppo di processi e sistemi per l'arricchimento in metano di biogas

L'obiettivo C è stato inserito nella presente annualità per esplorare una nuova via per la trasformazione del biogas in biometano: lo sviluppo di sistemi per la separazione della CO_2 dal biogas. Partendo dall'analisi dello stato dell'arte delle tecnologie impiegate industrialmente e di quelle in corso di studio e di messa a punto per la separazione della CO_2 dal biogas (fuel upgrading), si intendeva mettere a confronto due possibili soluzioni: le membrane ceramiche e quelle polimeriche. Dato il diverso grado di maturità per le prime era previsto uno studio volto allo sviluppo di laboratorio del materiale (membrane ceramiche) con individuazione dei materiali da utilizzare e dei possibili processi di produzione e caratterizzazione delle prestazioni dei campioni ottenuti in termini di capacità di separazione, durata, robustezza ed affidabilità; per quelle polimeriche era previsto lo sviluppo di un processo per la purificazione del biogas da CO_2 e H_2S, con definizione della configurazione e dei parametri ottimali di funzionamento del sistema.

In particolare per quest'ultimo obiettivo sono stati acquistati 2 moduli commerciali separativi di polimero PEEK dalla corporation americana POROGEN, abili a trattare miscele di biogas da 5-30 m^3/h nel range di pressione di poco superiore a quello atmosferico fino a 40bara, inoltre è stata avviata la realizzazione di un impianto per il testing di differenti moduli polimerici. La finalità dell'attività è, oltre ad avere disponibile un impianto pilota di caratterizzazione del processo, soprattutto, quella di sviluppare, grazie anche alle collaborazioni universitarie in corso e future, delle migliorie alla struttura reticolare dello stesso polimero PEEK (o di differenti matrici polimeriche), sviluppando dei moduli che saranno testati con l'impianto pilota per l'upgrading mediante una filiera

italiana che inizia dalla digestione anaerobica delle biomasse per arrivare al biometano da upgrading. Come detto, le attività sono state condotte articolandole in due fasi principali:

- Analisi bibliografica.
- Studio sperimentale.

La prima fase coincide con il primo degli obiettivi previsti, ossia l'elaborazione di uno stato dell'arte delle tecnologie per la separazione della CO_2, sia quelle attualmente impiegate sia quelle in via di sviluppo, con particolare attenzione ai sistemi che utilizzano membrane ed alle relative prospettive di sviluppo.
Nella seconda fase ci si è occupati del raggiungimento degli altri due obiettivi riguardanti rispettivamente lo studio e lo sviluppo di membrane ceramiche e lo studio e caratterizzazione di membrane polimeriche.

Tutta l'attività è stata affiancata da uno studio sui modelli per sistemi di separazione gas a membrana che ha previsto una preliminare analisi bibliografica dell'esistente ed un successivo sviluppo di modelli a vario grado di dettaglio, atti alla simulazione di sistemi di separazione di gas per mezzo di membrane, sulla base di un'espressione lineare per il trasporto di materia.

Analisi dello stato dell'arte dei processi di rimozione della CO_2 dal biogas

L'analisi e lo studio bibliografico sono stati condotti partendo dalla considerazione che le caratteristiche ottenute dal gas dopo il trattamento per la separazione della CO_2 dovessero essere tali da incontrare le proprietà richieste per l'immissione del gas metano in rete. Si è fatto dunque riferimento al Codice di Rete-Qualità del gas (SNAM), aggiornato all'11 gennaio 2011.

Avendo, nella prima parte dello Stato dell'Arte, definite le caratteristiche richieste per il biometano, nella seconda parte è stata effettuata un'analisi approfondita dei processi di upgrading del biogas attualmente utilizzati (non basati su sistemi a membrana) mettendo in luce aspetti quantitativi e qualitativi relativi a potenzialità medio-basse (530 Nm^3/h di gas, necessari per l'alimentazione di un motore da 1 MW) e all'ottenimento di specifiche per l'immissione in rete o per l'alimentazione di motori a combustione interna (contenuto di metano superiore a 97%).

Una parte dell'analisi di letteratura è stata utilizzata per lo sviluppo dei modelli, prevalentemente rivolti all'adsorbimento della CO_2 su matrici solide a letto fisso. A tale proposito si è proceduto anche alla modellazione di una unità di adsorbimento per la simulazione di operazioni di PSA in colonna a letto fisso al fine di predisporre uno strumento per un'analisi più approfondita di questi processi.

Tale modello così come sviluppato è adatto sia per l'analisi e il confronto delle prestazioni di diversi cicli di PSA, sia come supporto per la definizione del piano delle prove e per l'analisi dei risultati di una campagna sperimentale. Inoltre, con piccole modifiche alle equazioni di bilancio per la fase solida, il modello può essere adattato anche alla descrizione dei processi di adsorbimento reattivo.

Individuazione dei materiali e dei processi produttivi più idonei per lo sviluppo di membrane ceramiche

Il primo passo è stato il reperimento di membrane commerciali ceramiche o vetrose tubolari con strato esterno finale microporoso (pori inferiori a 1 micron o più precisamente dell'ordine dei nanometri) con caratteristiche di tenuta da vuoto (omogeneità del deposito, assenza di cricche ecc.), con lo scopo di testarle sperimentalmente tal quali o dopo aver depositato strati a porosità inferiore tramite CVD o sol-gel. Sono state individuate 5 ditte.

Sono state testate alcune membrane commerciali fornite dalla ditta IKTS, per verificarne l'idoneità a fungere da supporti microporosi per la sintesi di strati sottili di silica a porosità controllata. Per effettuare tali misure è stata utilizzata una sezione di prova predisposta ad hoc per geometrie cilindriche. Entrambi i provini (tubi IKTS ricoperti e non) non sono risultati idonei per essere utilizzati come supporti per la realizzazione delle membrane selettive. Tale risultato ha evidenziato l'importanza dell'obiettivo di realizzare supporti specifici aventi caratteristiche diverse da quelli commerciali.

A tale scopo sono state fornite alla società FN, partner dell'Accordo, le specifiche (dimensioni, porosità, tenuta meccanica) dei supporti ceramici in forma di dischi per individuare un processo a due step (tape casting e CVD) idoneo a produrre ceramiche selettive. FN ha prodotto campioni di zirconia tri-strato e prototipi in α-allumina microporosi bi-layer a porosità decrescente, con densificazione dello strato su cui depositare la Silice. L'α-allumina è stata preferita alla zirconia in quanto meglio risponde alle necessità del progetto, essa, infatti, dovrebbe legarsi chimicamente con lo strato membrana di silice (da deporre successivamente sui supporti stessi) e contemporaneamente con la sua porosità residua, lasciar passare i gas agevolandone la distribuzione diffusa grazie alla struttura tipica di un sinterizzato microporoso. FN ha dunque fornito set di campioni piani (dischetti) di allumina realizzati tramite tape-casting. Per entrambi i set di campioni è stata misurata la permeabilità a temperatura ambiente tramite apposita sezione di prova predisposta per geometrie piane (Figura 50). La tenuta delle membrana è stata realizzata tramite anelli di viton. La planarità e la resistenza meccanica dei dischi ceramici

si è mostrata adeguata alle sollecitazioni introdotte dal serraggio della sezione di prova e dalla differenza di pressione introdotta tra camera a monte e camera a valle, in particolare per il secondo set di campioni che presentava una migliore planarità.

Figura 50. Sezione di prova (geometria piana) utilizzata per misurare la permeabilità a temperatura ambiente dei dischi di allumina realizzati da Fabbricazioni Nucleari

Le prove sono state condotte utilizzando il metodo CRM (continuos flow method). Le asperità della superficie differenti da una faccia e l'altra del disco e dal primo e secondo set, hanno consentito di raggiungere livelli di tenuta (isolamento della camera a valle e a monte rispetto all'esterno) differenti (da 10-6 mbar a 10-2 mbar in regime di pompaggio) ma sufficienti per effettuare le misure tramite spettrometro.

Una volta evacuato l'impianto e minimizzate le perdite (Helium leakage) sia a monte che a valle, sono stati inseriti nella camera a monte prima l'argon (10-1000 mbar) poi l'idrogeno (10-1000 mbar). I segnali corrispondenti (Ar e H_2) dello spettrometro di massa posto nella camera a valle non hanno mostrato variazioni, confermando la perfetta impermeabilità ai gas di test dei dischi ceramici misurati. Non si è ritenuto utile (vista la impermeabilità all'idrogeno) realizzare le misure programmate con anidride carbonica e metano.

Sintesi di strati sottili permselettivi di silica tramite deposizione chimica da fase vapore

Al fine di verificare la riproducibilità della deposizione di strati di silica abbiamo realizzato alcune deposizioni di prova misurando lo spessore e la qualità dello strato di silica su Silicio bilucidato (100) e Allumina. Le prove su silicio sono state realizzate per poter analizzare la composizione del campione tramite spettrofotometria ottica nel range UV-VIS-NIR. Le deposizioni sono state effettuate ad una temperatura di 650 °C con flusso di 5 Scm^3/min di TEOS e di 100 Scm^3/min di Ossigeno. Le osservazioni al microscopio elettronico (SEM-FEG ZEISS) in sezione, ottenute clivando il silicio e l'allumina, hanno mostrato uno strato di silica denso che ricopre in maniera conforme il substrato. La velocità di crescita è differente per i due substrati utilizzati.

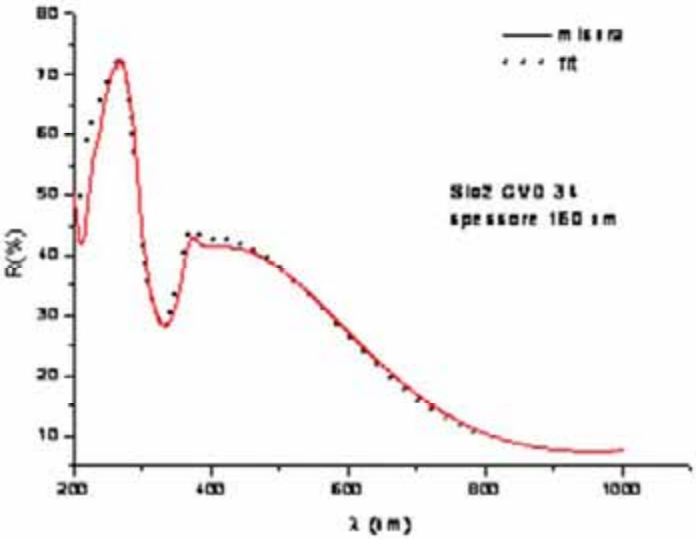


Figura 51. Esempio di spettro di riflettanza (e di simulazione al calcolatore) di uno strato di Silica depositato su Silicio per determinarne lo spessore e la composizione

Le misure di riflettanza (Figura 51) dello strato di silica, depositato tramite CVD su substrato di silicio lucidato, hanno confermato la velocità di crescita e la composizione della silica (indice di rifrazione pari a quello di letteratura). Verificato che il processo di deposizione da fase chimica della silica è riproducibile e produce

ricoprimenti sufficientemente omogenei in spessore abbiamo ritenuto inutile effettuare i ricoprimenti sui supporti di allumina pervenuti fino ad ora a causa della loro sostanziale impermeabilità ai gas, riservandoci di effettuarli quando supporti con una porosità maggiore verranno realizzati. Riteniamo altresì che il processo di tape-casting sviluppato da Fabbricazioni Nucleare, ottimizzato in termini di porosità passante in modo da determinare un misurabile flusso permeato, sia adeguato per produrre i supporti di allumina su cui sviluppare membrane ceramiche selettive ai gas di interesse dell'attività del programma.

Sviluppo di un processo in membrane polimeriche per la purificazione del biogas da CO_2 e H_2S

Questa attività si è concentrata sull'analisi della permeabilità di gas puri in Matrimid®, una poliimide commerciale potenzialmente interessante per l'upgrading del biogas. In particolare si sono svolte prove con metano e CO_2 in un range di temperature e pressioni variabili rispettivamente tra 25 e 35 °C e tra 1 e 3 bar.

Sulla base dei dati ottenuti si può concludere che la variazione dei valori di permeabilità della Matrimid in funzione dei parametri di controllo durante le prove individua un trend analogo per entrambi i gas indagati: la permeabilità, infatti, cresce al crescere della temperatura e cala al crescere delle pressioni a cui il sistema si trova a lavorare. La temperatura ha sicuramente un effetto prevalente, mentre le variazioni ottenibili con la pressione risultano in generale molto più limitate.

Nel confronto con i dati letteratura, i risultati sperimentali prodotti durante questo primo anno di lavoro hanno mostrato essere, nel caso della permeabilità, circa il doppio di quelli generalmente reperibili dalle fonti bibliografiche, a parità di pressione e temperatura. Questo aspetto risulta particolarmente interessante, in quanto a parità di flusso permeato permetterebbe un dimezzamento dell'area di membrana necessaria, e sembra essere riconducibile al diverso trattamento termico a cui è stato sottoposto il film polimerico in fase di preparazione, rispetto a quanto è solitamente riportato in letteratura. A questo proposito, ulteriori indagini a riguardo sono, comunque richieste, sia per verificare l'effettiva influenza di tale pretrattamento sulle proprietà della membrana sia eventualmente per testare la stabilità dei suoi effetti, visto che anche le poliimidi, come tutti i polimeri vetrosi tendono a subire un invecchiamento che riduce il volume libero e la permeabilità nel tempo. Sulla base di tali dati nel prossimo anno di attività si prevede di proseguire lo studio del polimero considerato su miscele CO_2/CH_4 ed anche in presenza di umidità, presente nell'ambito delle produzione di biogas, che da studi recenti risulta comunque modificare la risposta delle membrane.

Oltre a ciò, nel tentativo di migliorare ulteriormente le proprietà del polimero considerato nell'ambito della separazione della CO_2, si sta procedendo all'addizione di nano particelle di silice al polimero stesso al fine di determinarne l'effetto sulle proprietà di trasporto. Diversi lavori di letteratura infatti hanno mostrato la possibilità di incrementare flusso e selettività di diversi materiali tramite l'addizione di filler nanometrici che vanno in alcuni casi a modificare la struttura del polimero incrementandone il volume libero. Alcune applicazioni di questo tipo, relative a Matrimid o altre poliimidi del resto hanno dato risultati interessanti lasciando comunque spazio ad ulteriori approfondimenti. Anche nell'ambito del lavoro svolto, per altro, i primi risultati ottenuti in tal senso sono certamente di interesse, ma l'attività è ancora in fase embrionale ed ulteriori verifiche e sviluppi sono necessari per poter ottenere dati affidabili e ripetibili.

Nell'ambito dell'utilizzo di filler nanometrici per lo sviluppo di nano compositi, conviene anche considerare le possibilità di collaborazione con le altre unità partecipanti al progetto ed esperte nella preparazione di materiali ceramici. Se infatti la produzione di membrane ceramiche con caratteristiche ottimali risultasse non perseguibile nei tempi del progetto, la produzione di nano filler porosi intrinsecamente selettivi per la CO2 da inglobare nel polimero potrebbe essere un obbiettivo intermedio potenzialmente raggiungibile ed in grado di ottimizzare le prestazioni del materiale polimerico di partenza. Per ciò che concerne la linea di attività condotta nel centro ENEA di Trisaia, in ambito membrane polimeriche, essa ha riguardato lo sviluppo di un impianto test per moduli polimerici in scala significativa al fine di avere disponibile una piattaforma di caratterizzazione di processo per i moduli stessi (inizialmente solo industriali) particolarmente performanti.

In Figura 52 si riportano le caratteristiche del modulo polimerico PEEK in polieterchetone per l'upgrading del biogas ed i risultati ottenibili da un doppio stadio separativo sulla base dei risultati di simulazioni numeriche con una particolare configurazione impiantistica. Il modulo è del tipo Hollow fiber di polimero PEEK ed ha una capacita di trattamento biogas che, nelle condizioni operative più spinte, può arrivare ad ottenere fino a circa 20 m^3/h di biometano con pressione di alimentazione non oltre i 40 bar. L'impianto è stato realizzato secondo una specifica tecnica ed elaborati di progetto tali da soddisfare le esigenze richieste dalla rete di distribuzione. In Figura 53 si rappresenta una vista del cartridge di contenimento del modulo stesso con le relative connessioni d'impianto durante le prime fasi di montaggio.

Figura 52. Modulo polimerico in PEEK con i risultati di processo ottenuti dal doppio stadio separativo

Figura 53. Cartridge di contenimento del modulo PEEK

In prima istanza, le prove sperimentali si basano sulla configurazione a singolo stadio al fine di valutare le performance del modulo in polieterchetone e la capacità di separazione in funzione di differenti parametri di processo, quali pressione di alimentazione, feed, pressione retentato e permeato, mentre nella successiva annualità saranno condotte prove utilizzando entrambi i moduli al fine di validare i risultati numerici del processo separativo. La linea di attività prevede lo sviluppo di attività di ricerca per le modifiche della struttura reticolare dello stesso polimero PEEK e di differenti matrici polimeriche, al fine di produrre dei moduli ad hoc che saranno testati con l'impianto pilota per l'upgrading di biogas.

La Figura 54 mostra la filiera di produzione dei moduli polimerici a partire dalle matrici stesse fino al testing di caratterizzazione di processo rappresentativo dell'obiettivo realizzativo posto per le successive annualità in accordo con i programmi di ricerca in essere e future con le università partner.

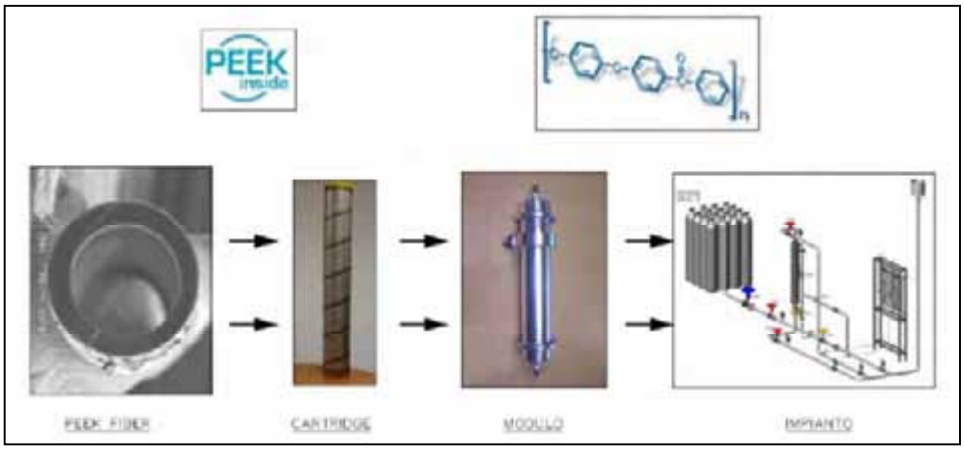


Figura 54. Filiera per l'upgrading del biogas a partire dalla matrice polimerica

Sorbenti solidi a media temperatura

Tra i vari sorbenti a media temperatura (tra 200 e 400 °C) le idrotalciti (HT) sono state ampiamente studiate e si crede possano essere tra i più promettenti candidati poiché dimostrano di avere:

- velocità reversibile di adsorbimento/desorbimento relativamente alta
- stabile capacità per la cattura della CO_2 durante esperimenti ciclici a lungo termine
- buona resistenza meccanica alle alte pressioni
- temperatura intermedia di adsorbimento (200-400 °C).

Dal punto di vista della ricerca, la struttura dei siti attivi e l'evoluzione strutturale di questi materiali durante assorbimento/desorbimento sono ancora poco chiare e dovrebbero essere ulteriormente indagate. L'attività sperimentale condotta presso il C.R. ENEA della Trisaia ha avuto come obiettivo l'approfondimento di tale tematiche. La cattura di CO_2 è stata investigata in un reattore in scala di laboratorio attraverso adsorbimento su diversi campioni preparati.

Sono stati effettuati esperimenti di risposta a gradino positivo per determinare la conversione dell'HT calcinata e carbonatata, in funzione del tempo. Si è osservato che la dinamica del sequestro della CO_2 può essere estratta dalla curva della risposta globale del sistema utilizzando una prova in bianco.

Si è scelto di effettuare le prove in bianco riempiendo il reattore con carborundum , materiale inerte, e mantenendo identiche le condizioni operative e processuali. Misure online della concentrazione di CO_2 della corrente gassosa in uscita hanno fornito le curve di risposta dalle quali è stata calcolata la velocità di cattura della CO_2 come funzione del tempo. Grazie alla loro struttura (Figura 55), le HT sono precursori per la catalisi ideali. L'idoneità delle HT come sorbenti per la CO_2 a medio- alte temperature deriva dalla pluralità dei forti siti basici che questa struttura offre in superficie, e che favoriscono l'adsorbimento della acida CO_2 in accordo con la teoria acido-base di Lewis.

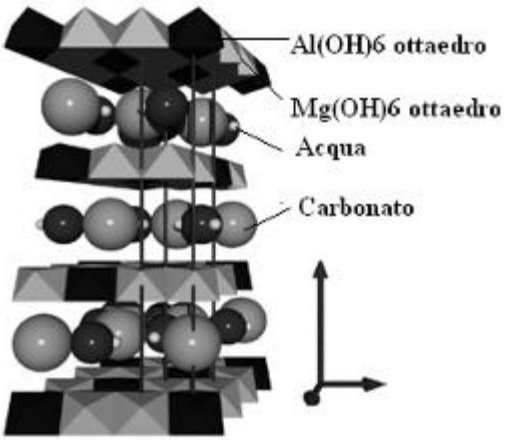


Figura 55. Struttura multistrato HT

Nella Tabella 21 vengono riportati, per confronto, i dati relativi a vari sorbenti e alla loro capacità di assorbimento.

Tabella 21. sorbenti e capacità di assorbimento alla varie temperature

Tipi di sorbenti	Temperature di assorbimento (°C)	Capacità di assorbimento della CO_2 (m mol/g)
Carboni	≤80	≤3,5
Zeoli	≤100	≤4,9
MOF	≤100	≤4,5
Metalli alcalini	≤120	≤9,4
Ammine	≤60	≤5,5
Idrotalciti	200-400	≤1,4
Ossido di calcio	600-700	≤11,6
Alcali ceramici	500-600	≤6,5

Preparazione del materiale

L'HT utilizzata $CH_{16}Al_2Mg_6O_{19}$ tetraidrata (Aldrich), idrofobica è stata sciolta con C_2H_5OH e C_3H_7OH e miscelata con una soluzione K_2CO_3 o $KHCO_3$ in H_2O e metil cellulosa, a seconda delle diverse tipologie i campioni preparati verranno denominati A, B, C, D . Si riportano le composizioni in massa in Tabella 22.

Tabella 22. Composizione campioni preparati

COMPONENTI	CAMPIONE A	CAMPIONE B	CAMPIONE C	CAMPIONE D
HTC [g]	100	100	50	50
H_20 [ml]	/	120	20	50
C_2H_5OH [ml]	/	/	50	/
C_3H_7OH [ml]	50	50	/	100
K_2CO_3 [g]	/	/	10	25
$KHCO_3$ [g]	/	40	/	/
Metilcellulosa [g]	/	/	5	2,5

I diversi campioni sono stati dapprima essiccati in forno e poi calcinati fino a T=450 °C. In Figura 56 si riportano le immagini delle dimensioni degli agglomerati delle particelle di alcuni campioni preparati.

Figura 56. Foto campione A e B

Per svolgere le prove, è stato assemblato l'impianto in Figura 57. I dati operativi sono riportati nella Tabella 23.

Tabella 23. Dati operativi e di processo delle prove effettuate

Prova Adsorbimento	Campione A	Campione B	Campione C	Campione D
T [°C]	400	400	290	399,4
P [atm]	1	1	1	1
Perdite di carico [mmH_2O]	1400	/	2300	3800
Volume campione [ml]	50	/	68	/
Massa Campione [g]	23,9	34	42,2	28
d_p [micron]	$150 < d_p < 710$	$150 < d_p < 710$	$150 < d_p < 500$	$150 < d_p < 300$
CO_2 % vol	20,6	20,3	22,52	20,15
Prova in bianco	**Sì**	**No**	**Sì**	**No**

La concentrazione di CO_2 che lascia il reattore è stata monitorata in continuo on-line per mezzo di un analizzatore detectante la conduttività termica (ABB) .

Il reattore è portato alla temperatura di lavoro in flusso di azoto e al tempo t=0, mantenendo la corrente di N_2 si è inviata al reattore la corrente di CO_2 pari a 10 l/h corrispondente ad una concentrazione finale di 8,923 10^{-3} mol/Nl e lanciata l'acquisizione. Per assegnare e mantenere le condizioni di flusso per l'N_2 e la CO_2 costanti, sono stati utilizzati mass flow meters, preventivamente calibrati. Quando la concentrazione di CO_2 in uscita ha raggiunto un livello costante pari a quello interno (valore di plateau) si è chiusa la valvola d'alimentazione della CO_2 ed il test d'adsorbimento si è considerato concluso. Tale procedura si è ripetuta per ogni campione, e per la prova in bianco, in cui il reattore è stato riempito di carborundum, materiale inerte.

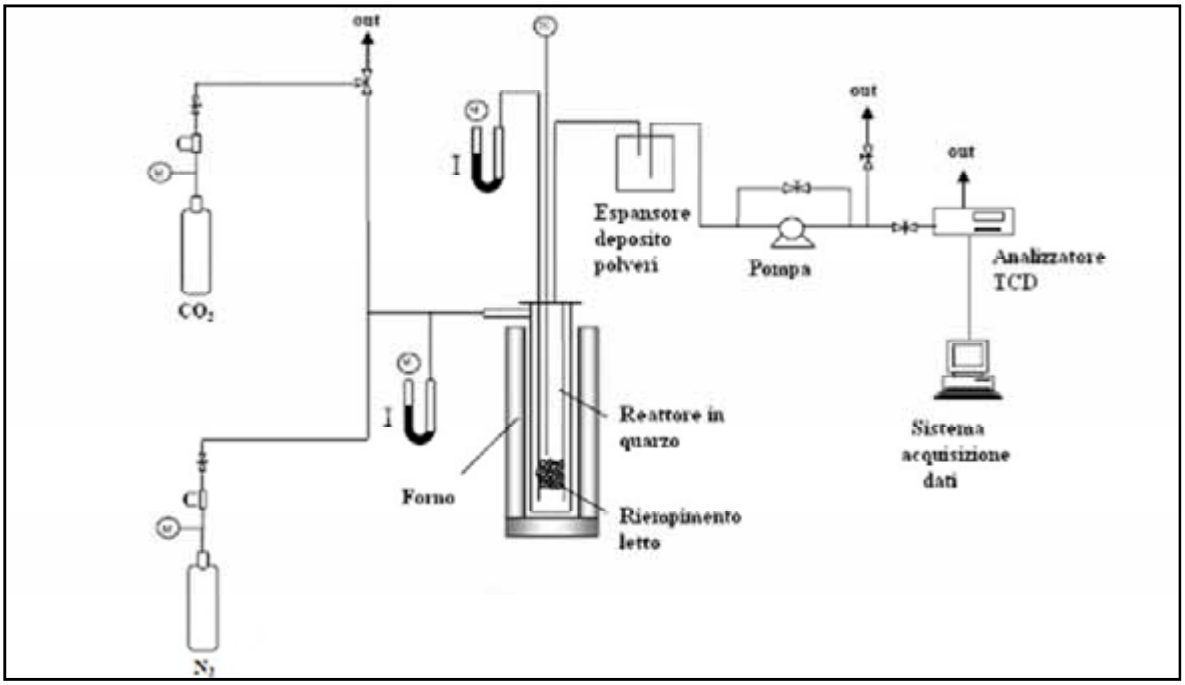


Figura 57. Schema d'impianto

La prova in bianco si è rivelata di cruciale importanza per l'analisi e lo studio del comportamento del transitorio registrato per la cattura della CO_2. Si è scelto per il test in bianco di utilizzare carborundum come riempimento del letto e di operare la prova in bianco alle stesse condizioni di portata pressione e temperatura della prova di adsorbimento. Sono state effettuate varie prove di confronto e nella Figura 58 se ne riporta una a titolo di esempio. Il test in bianco ci ha permesso sia di calcolare l'hold-up della fase gas H_G sia di adattare un semplice modello di miscelamento fluidodinamico alla curva di risposta globale della fase gas.

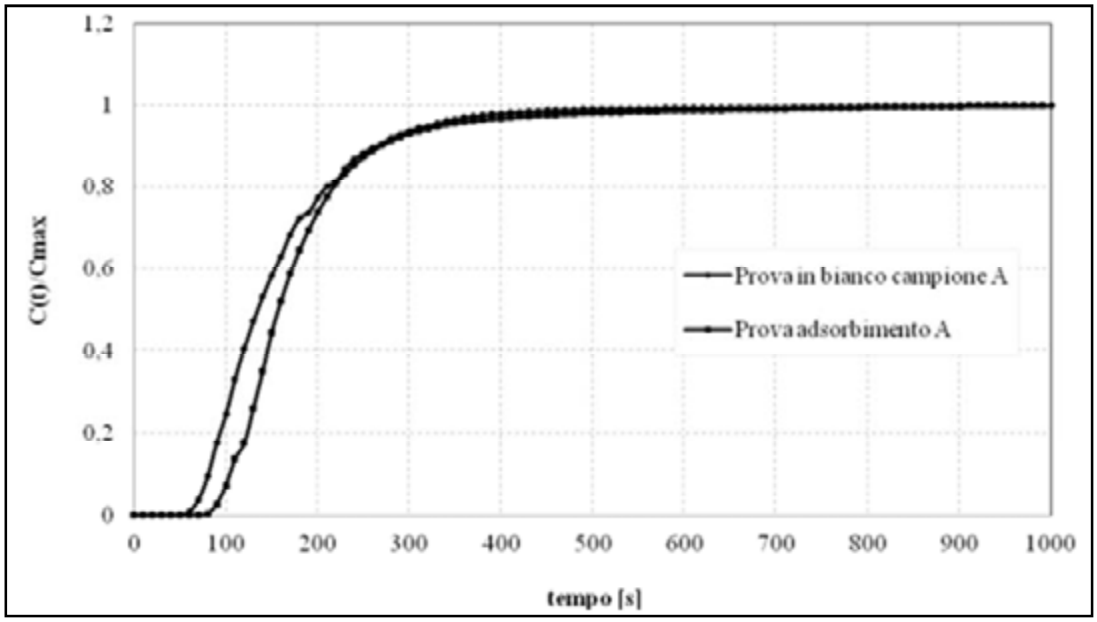


Figura 58. Confronto curve di risposta della concentrazione di CO_2 normalizzata della prova in bianco con carborundum e della curva di risposta della concentrazione di CO_2 durante la prova di adsorbimento campione A

Dalle prove di cattura della CO_2, riportate in Figura 58, la sola differenza sarà imputabile all'adsorbimento.

La curva di risposta in Figura 59 è stata utilizzata per valutare la quantità totale di CO_2 presente nell'intero sistema in funzione del tempo: pari alla differenza tra le moli entrate nel sistema al tempo t e quelle uscenti allo stesso tempo. Con il modello e con i dati sperimentali è stata ricavata una relazione che consente di calcolare l'holdup della CO_2 nell'idrotalcite come funzione del tempo in termini di concentrazione di CO_2 catturata nella fase solida del letto Cs.

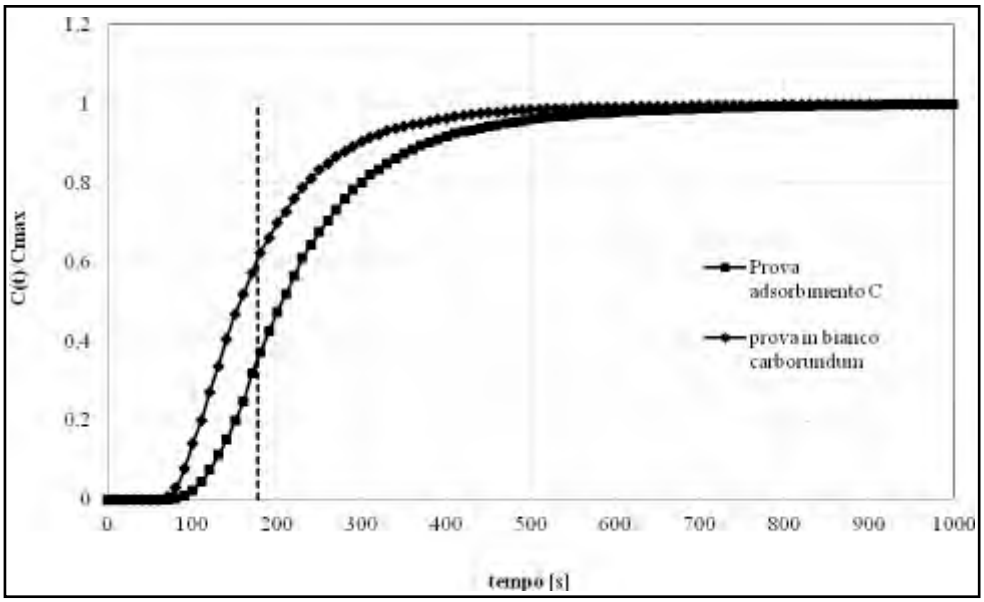


Figura 59. Confronto test di risposta a gradino con concentrazioni di CO_2 normalizzate prova adsorbimento e prova in bianco

Configurazioni impiantistiche per il processo separativo a moduli di membrane polimeriche

Un'altra parte delle sperimentazioni condotte presso ENEA Trisaia ha riguardato la definizione delle configurazioni impiantistiche basate su membrane polimeriche, ne sono state individuate diverse, a singolo stadio, a doppio stadio. Tra queste ne sono state proposte:

- supponendo di partire da una membrana PVAm/PVA (polivinilammina/polivinil alcol) i cui dati di letteratura mostrano una selettività CO_2/CH_4 fino a 40 e permeabilità pari a 0,55 m^3(STP)/m^2 h bar a 2 bar;
- supponendo di partire da una portata di 1000 Nm^3/h di biogas grezzo contenente 35% vol CO_2 e 65% vol CH_4;
- imponendo in ciascun caso una purezza in metano in uscita pari al 98% nelle condizioni operative di indagine.

Per tali configurazioni sono state effettuate simulazioni in ambiente Aspen HYSYS per studiare l'effetto della pressurizzazione interstadio e dell'umidità del biogas. Di seguito si riportano alcuni dei principali risultati ottenuti.

La Figura 60 mostra i risultati ottenibili da un singolo processo separativo al variare della pressione di alimentazione in presenza o meno del gas di purga(estrazione del gas) lato permeato, fissata la purezza in metano pari al 98% per soddisfare le specifiche di prodotto:

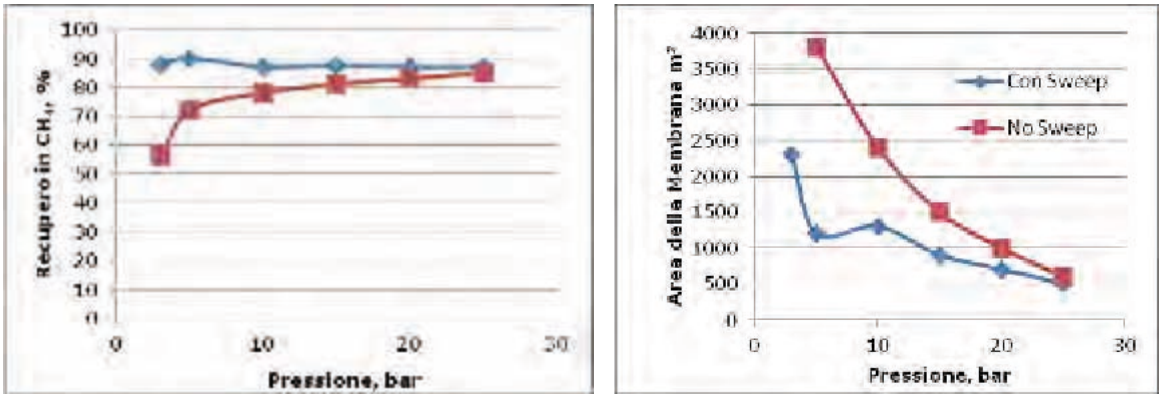


Figura 60. Recupero in metano e area superficiale in funzione della pressione di alimentazione allo stadio separativo

La Tabella 24 riassume i risultati della simulazione del biogas utilizzando le quattro configurazioni avendo fissato la purezza nel biogas upgradato pari al 98% al fine di soddisfare le specifiche di prodotto.

Tabella 24. Risultati delle simulazioni nelle 4 tipologie di processo

Parametri	Stadio singolo	Doppio stadio	Doppio stadio	Doppio stadio
		Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
Alimentazione biogas(Nm^3/h)	1000	1000	1000	1000
Pressione al 1° e 2° stadio(bar)	20 ; -	20 ; 20	20 ; 20	20 ; 19,5
Portata di upgrading(Nm^3/h)	566	745	769	638
Purezza in CH_4 (% vol)	98	98	98	98
Purezza in CO_2(% vol)	78	92,2	98,1	92,5
Recupero di CH_4(% vol)	85,5	97,3	99,7	95,7
Rapporto di riciclo	-	-	0,24	0,26
Area membrana(m^2)	956	1167	1297	1226
Energia compressione(kW)	157	220	220	203
Costo capitale(M€)	1,33	2,14	2,19	1,67
Costo esercizio (€cent/Nm^3 biogas upgradato)	4,43	6,36	6,29	6,01
Costi totali incluso biogas grezzo (€cent/Nm^3 biogas upgradato)	16,3	14,63	14,37	21,57

In definitiva, nelle condizioni di indagine e nella portata di alimentazione del biogas da inviare allo stadio di upgrading (1000 Nm^3/h) risulta che le condizioni maggiormente performanti e con un minor impatto economico sono date dalla configurazione a doppio stadio nella tipologia 2 con le condizioni operative riportate in Tabella 25.

Tabella 25. Condizione migliore di processo per il trattamento di 1000 Nm^3/h di biogas grezzo con un contenuto di CO_2 pari al 35% vol

Parametri	Risultati simulazioni
Area Totale(m^2)	1440
Pressione di alimentazione al 1° e 2° stadio (bar)	20 ; 10
Temperatura e pressione al permeato (°C, bar)	25 ; 1
Portata di biometano prodotta (Nm^3/h)	761
Purezza in CH_4 (% vol)	98
Purezza in CO_2 (% vol)	98
Recupero in CH_4 (% vol)	99
Energia di compressione (kW)	234
Costi capitale (M€)	1,97
Costi di esercizio (€cent/Nm^3 di biogas upgradato)	5,83
Costi totali (€cent/Nm^3 di biogas upgradato incluso il biogas grezzo)	13,97

Il costo del processo di purificazione del biogas varia notevolmente in funzione della tecnologia, della capacità d'impianto, della ubicazione, ecc. nel range 13-50 €cent/Nm^3. Per le condizioni di indagine il costo per la produzione di biometano risulta pari a 13,97 €cent/Nm^3 per un capacità dell'impianto di 1000 Nm^3/h, compreso il valore biogas grezzo e la compressione del biogas alla pressione di rete del gas naturale a 40 bar, mentre il prezzo di mercato in Italia del metano è di 40,09 €cent/Nm^3 al gennaio 2010, il che giustificherebbe la fattibilità industriale per tali impianti (http://www.autorita.energia.it/it/relaz_ann/10/10.htm).

Sviluppo modello matematico di simulazione

Come già detto, per quanto non fosse esplicitamente menzionato come obiettivo si è ritenuto necessario sviluppare un software di modellazione di membrane per avere un utile strumento per fare analisi comparate di sistemi differenti per poter più facilmente costruire una matrice di condizioni sperimentali in maniera da ottimizzare i tempi ed i risultati della sperimentazione.

In base agli obiettivi del progetto, ci si è orientati verso un modello del modulo a membrane finalizzato a *equipment design, rating e simulation* (quindi formulato in termini di permeanza) e predisposto per l'integrazione in modelli di processo. Sono quindi risultati necessari modelli auto-inizializzanti e robusti, con derivate analitiche.

Considerato inoltre il requisito emerso dalla review di realizzare un modello a parametri distribuiti mono-dimensionale, si è optato per una formulazione "costruttivista", basata su un'unità fondamentale a parametri concentrati che viene opportunamente replicata e interconnessa, piuttosto che su una più astratta formulazione in termini di equazioni differenziali.

Questo approccio infatti consente una più immediata corrispondenza fra modelli e realtà fisica e rende più intuitiva l'inizializzazione dei modelli stessi. I modelli sviluppati sono rispettivamente un modello semplificato a parametri concentrati e un modello preliminare di dettaglio a parametri distribuiti, con specifico riferimento alle membrane polimeriche testate dai partner. I modelli sono stati poi preliminarmente convalidati sulla base dei dati di letteratura.

I modelli delle membrane sono inoltre stati integrati in un modello complessivo del processo di upgrading del biogas, che calcola direttamente i parametri di prestazione, permettendo così il confronto con altre tecnologie convenzionali ed innovative per la rimozione dell'anidride carbonica da biogas. Nello specifico è stato simulato uno schema impiantistico preliminare compatibile con la taglia di riferimento, basato su un processo a due stadi con un solo compressore. I valori di permeanza sono stati ipotizzati.

Si osserva che l'impianto soddisfa la specifica sull'anidride carbonica nel biogas upgradato, ma non quella sull'acqua anche se tutti i risultati saranno comunque da verificare sulla scorta di valori sperimentali sulle permeanze. Inoltre sarà necessario completare l'impianto prevedendo altri step di processo necessari, quali la rimozione dell'H_2S, che non è stato considerato in questa sede.

Sistemi di generazione/cogenerazione a biogas o syngas da biomasse

L'obiettivo prevedeva lo sviluppo di sistemi cogenerativi alimentati da biogas o gassificazione delle biomasse. A tale scopo era prevista la prosecuzione delle attività riguardanti la realizzazione di un software per effettuare analisi tecnico-economiche per la individuazione dei sistemi più promettenti nelle diverse applicazioni. Allo stesso tempo, in vista di una possibile applicazione delle celle a combustibile nella catena Waste to Energy e tenuto conto che fra gli ostacoli all'impiego di tali celle ci sono la loro sensibilità ai contaminati e il loro costo, le attività del presente anno riguardavano lo sviluppo e sperimentazione di componenti innovativi per celle a combustibile, prodotti con processi più economici e a minor impatto ambientale e/o in grado di resistere meglio agli inquinanti contenuti nei gas di alimentazione.

Sviluppo di un software per l'analisi tecnico-economica dei sistemi di generazione-cogenerazione

L'obiettivo del progetto è quello di realizzare un modello di calcolo in grado di analizzare alcune tra le filiere bio-energetiche più diffuse nel sistema produttivo nazionale, contestualizzandole dal punto di vista territoriale, allo scopo di poterne eseguire un'approfondita valutazione sotto i tre aspetti economico, energetico e ambientale che concorrono a determinarne la sostenibilità globale della valorizzazione energetica delle biomasse e dei rifiuti. La disponibilità di uno strumento in grado di confrontare diverse filiere e/o diverse soluzioni attuabili all'interno della stessa filiera produttiva, può rivelarsi un'utile applicazione nella ricerca della soluzione ottimale.

Al fine della messa a punto del software denominato AIDA (Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants) si è proceduto al completamento delle funzioni di supporto per il modello, al potenziamento della piattaforma web AIDA e all'implementazione del modello di Gassificazione come un sistema integrato e complementare al modello della Digestione Anaerobica già realizzato.

I risultati conseguiti nel corso degli anni precedenti, rappresentati dalla realizzazione dell'Atlante Italiano delle Biomasse e dal software sulla digestione anaerobica, costituiscono il supporto principale che ha permesso lo sviluppo nel tempo del modello di calcolo oggetto delle attività del presente anno. Tale modello si presenta come uno strumento accurato e flessibile in grado di eseguire una valutazione di fattibilità per la valorizzazione energetica delle biomasse, in termini sia tecnico-economici che energetici-ambientali. Si è passati da un modello preliminare realizzato mediante un software proprietario FileMaker [Report RSE/2009/185] ad una prima versione più evoluta realizzata mediante una piattaforma web dedicata, seguita poi da una nuova versione rivisitata, ampliata sia dal punto di vista informatico che tecnico che si è concretizza nella piattaforma AIDA .

Il software nella sua versione attuale consente di analizzare i potenziali produttivi dei settori relativi al campo delle biomasse fermentescibili e delle biomasse lignocellulosiche censite dall'Atlante Italiano delle Biomasse. In questa sede l'indagine è stata estesa anche al settore dei fanghi prodotti dagli impianti di depurazione delle acque reflue urbane, essendo questo un ottimo potenziale in termini di recupero energetico da rifiuti. Il punto di maggior forza dello strumento, che lo differenzia da altri studi di settore, è la possibilità di offrire un riferimento territoriale della disponibilità delle biomasse con un dettaglio comunale e di proporre inoltre un dimensionamento di massima per un impianto di valorizzazione energetica oltre che fornire alcuni parametri economici per la valutazione della fattibilità e della convenienza dell'investimento. Un ulteriore punto di forza di tale strumento risiede nell'implementazione di tre percorsi decisionali differenti che si concretizzano nelle esigenze di tre tipologie di utenza:

- Pubblica Amministrazione: indaga sulla potenziale disponibilità della biomassa localizzata sul territorio di propria competenza in base alla quale opera una scelta per la tecnologia di valorizzazione energetica, valutando la fattibilità tecnica ed economica di un investimento nel settore.

- Imprenditore Finanziario: ha lo scopo di ricercare una soluzione pratica e conveniente in cui investire. Lo scopo da perseguire consiste nella scelta di una determinata taglia di impianto, e di una specifica tecnologia di valorizzazione energetica in relazione alla convenienza energetica ed economica seguita poi dalla valutazione delle quantità necessarie per alimentare l'impianto.
- Utente Unico: elabora uno Studio di Fattibilità ad hoc in relazione alle esigenze in termini di spese di gestione e manutenzione della propria azienda, di consumi energetici e altre spese varie; confronta i costi del "non fare" con la convenienza dell'integrazione nella propria azienda di un sistema di valorizzazione energetica dello scarto aziendale (sia esso uno scarto agricolo che uno agro-industriale).

Implementazione del processo di formatura in plastico per la realizzazione di elettrodi per MCFC

Le attività sono state finalizzate alla realizzazione di campionature di elettrodi di celle a combustibile a carbonati fusi (anodi e catodi MCFC). Più in particolare la finalità era quella di realizzare una campionatura prototipale di elettrodi di cella (catodo e anodo) da sottoporre a caratterizzazione interna FN ed esterna da parte di ENEA. Tali elettrodi sono fabbricati tramite la tecnologia delle materie plastiche applicata, in maniera assolutamente innovativa, in alternativa alla colatura su nastro.

Le attività sono state sviluppate sulla base delle conoscenze acquisite da FN durante lo svolgimento sia delle attività delle precedenti annualità PAR, relativamente all'allestimento della linea di compoundazione ed estrusione, sia delle attività svolte nel presente accordo allo scopo di esplorare la possibilità di sinterizzare tramite microonde e fabbricazione in plastico, prototipi di piccole dimensioni per celle MCFC.

Nel corso dell'annualità ADP precedente, FN ha potuto collaudare le attrezzature per la formatura in plastico di componenti porosi di celle MCFC, con particolare riferimento alle matrici in gamma alluminato di litio, e ha potuto predisporre le stesse macchine (turbomiscelatore, compoundatore/ estrusore, presse) alla realizzazione su scala di laboratorio di manufatti estrusi/stampati con caratteristiche il più possibile vicine a quelle degli elettrodi tradizionali di celle MCFC, in modo da trattare polveri metalliche (nichel per i catodi, miscela nichel-cromo per gli anodi) anziché ceramiche. Gli elettrodi "verdi" (colati su nastro o, come in questo caso, estrusi e stampati), una volta formati devono essere decerati e sinterizzati al grado di porosità voluto che, tipicamente, per i catodi si assesta attorno al 70-75 % di porosità aperta e per gli anodi attorno al 50%. Tali valori di porosità, che nella cella determinano la condizione di funzionamento ritenuta ottimale allo stato dell'arte (anche per la specifica distribuzione dei pori), devono essere raggiunti individuando le condizioni di processo che costituiscono il miglior compromesso possibile con gli altri parametri chimico-fisici da rispettare (densità, resistenza meccanica, morfologia microstrutturale e dispersione del cromo negli anodi).

La messa a punto del processo di formatura "al verde" è senza dubbio un processo complesso, tuttavia i vantaggi che si possono immaginare ci fanno capire che questo nuovo processo potrà esser visto come una validissima alternativa a quello tradizionale che è contrassegnato da un massiccio impiego di solventi organici anche pericolosi, da un conseguente elevato impatto ambientale ed è anche particolarmente dispendioso. Inoltre il nuovo processo in plastico è caratterizzato da un elevato contenuto di innovazione tecnologica e di sviluppo sui materiali plasto-ceramici e plasto-metallici fortemente caricati ed è anche particolarmente allettante per via della flessibilità intrinseca che permette di realizzare manufatti con diverse forme e dimensioni sostituendo lo stampo o la testa d'estrusione.

Per l'applicazione alla fabbricazione di elettrodi MCFC, il prodotto finale è un lamierino metallico microporoso dello spessore di circa 0,5 mm. Il "verde" ottenuto per estrusione/stampaggio, costituisce il semilavorato intermedio quindi deve essere ancora sottoposto ai trattamenti termici, il debinding con cui si elimina la plastica (detto anche "deceratura") e la successiva sinterizzazione a 800 °C per i catodi e a 1100 °C per gli anodi: i trattamenti termici costituiscono la fase di lavorazione più delicata perché determinanti ai fini dell'ottenimento di un prodotto finale di buona qualità. Riguardo a tali trattamenti, FN ha potuto sperimentarli solo su piccola scala poiché a seguito del trasferimento della sede operativa da Bosco Marengo a Saluggia presso il C.R. ENEA, non è stato possibile utilizzare i forni industriali Pro.Ba che avrebbero consentito di validare i risultati di laboratorio in una scala significativa. In alternativa sono state eseguite prove di deceratura e sinterizzazione sia con tecniche di attivazione termica con microonde sia con trattamenti in forni tradizionali, questi ultimi eseguiti presso ditta esterna.

Delle due fasi di trattamento termico quella di deceratura si è confermata essere la più critica, come già era emerso dai dati sperimentali raccolti svolgendo le attività della precedente annualità ancora condotte nei laboratori di Bosco Marengo. Di conseguenza la messa a punto dei trattamenti termici era già stata individuata come la maggior criticità da superare, ragion per cui le attività sono state orientate nel corso della presente annualità anche alla verifica di fattibilità del trattamento alternativo a microonde.

Qui di seguito si presentano le attività sperimentali svolte che si sono articolate nelle seguenti fasi:

- prove per ottenere diversi tipi di compound e stamparli;
- conclusioni sulla sperimentazione della deceratura a microonde e prove di trattamento termico in forni tradizionali;
- formatura in plastico dei prototipi finali e trattamenti di deceratura e sinterizzazione presso ditta esterna specializzata.

I risultati di ogni attività sono stati valutati tramite controlli e analisi di caratterizzazione dimensionale e chimico-fisica microstrutturale.

Riformulazione del Compound

Sulla base dei risultati delle prove effettuate nel periodo precedente, in particolare per cercare di migliorare il comportamento in deceratura e sinterizzazione, sono state messe in campo due ricette nuove per il compound di catodo.

La principale problematica incontrata è rappresentata dalla diversa densità delle componenti della miscela; l'elevata densità del Ni rispetto alla parte polimerica tende a creare fenomeni di sedimentazione durante il trattamento di deceratura che possono portare a difettologie estese. Si è visto come fosse necessario cercare di legare il più possibile la parte metallica a quella polimerica in modo da evitare queste pericolose stratificazioni. Al fine di avere quindi una migliore omogeneizzazione e distribuzione del polimero all'interno della mescola si sono valutate due possibili mescole, alternative alle precedenti, sia per catodo che per anodo.

Catodo

La prima, denominata Ni6, è costituita da Ni al 50% in peso e la componente polimerica principale è data da polipropilene in polvere anziché granulo che risulta maggiormente disperdibile con la polvere di Ni. Gli additivi leganti e aggraffanti della carica minerale sulla parte polimerica sono stati lasciati invariati. Lo "spaghetto" si è presentato molto uniforme e consistente (Figura 61).

Con il compound ottenuto sono state effettuate prove di stampaggio con pressa Negri Bossi (di seguito NB) per ottenere i semilavorati da sottoporre a successivo stampaggio a caldo con pressa Komage a formare i campioni verdi di catodo. Alcuni campioni sono stati sottoposti a deceratura. Poiché il PP non era stato precedentemente additivato per romperne la catena, così come si era proceduto per le mescole precedenti, si è visto che, malgrado l'ottimo grado di miscelazione, si avevano ancora difficoltà nell'evacuazione del polimero. Si è quindi deciso di sperimentare una variante a tale mescola (Ni6bis), impiegando sempre la polvere di PP, ma inserendo all'interno l'additivo necessario per rompere la catena e rendere il polimero più vicino ad una cera. Sono state quindi ripetute le fasi di miscelazione, estrusione, stampaggio e realizzazione dei verdi. Le prove di deceratura effettuate hanno mostrato un comportamento migliore, dovuto, appunto alla catena più ridotta.

Figura 61. Estrusione compound Ni6

In alternativa alle mescole descritte, al fine di cercare di disperdere al meglio il polimero all'interno della mescola, è stata anche presa in considerazione la possibilità di variare il tipo di aggraffante. La polvere di Ni è stata pre-trattata in muffola per eliminarne l'umidità e, prima di inserire l'aggraffante ed il polimero, è stata bagnata con alcool isopropilico e olio di vaselina al fine di consentire l'accoppiamento fisico con i granuli. Si è ottenuta una buona dispersione. La mescola Ni7 è stata quindi estrusa a parametri diversi rispetto alla Ni6 e Ni6 bis. Anche in questo caso lo spaghetto è risultato molto liscio (indice di buona miscelazione). Con il compound realizzato sono stati ottenuti per stampaggio ad iniezione i semilavorati ("scatolini") da sottoporre a successiva compressione a

caldo in pressa Komage. I campioni verdi ottenuti sono stati sottoposti a deceratura, sia con il ciclo ultimo sperimentato, sia modificando alcune rampe.

Anodo

In parallelo alla sperimentazione condotta per il catodo, si è deciso di sperimentare le stesse tipologie di mescole anche per l'anodo. Per quanto riguarda la mescola a base di PP in polvere, visto l'esito della Ni6, si è passati direttamente ad inserire anche l'additivo che rendeva la catena polimerica più corta, per ovviare alle problematiche di deceratura precedentemente incontrate.

La prima mescola realizzata, denominata NiCr P, è stata realizzata pre-miscelando in turbomiscelatore il Ni con il 3% di Cr, previa essiccazione in muffola delle due componenti al fine di eliminare l'eventuale umidità presente. Si è lasciato invariato il valore di carica minerale rispetto alle mescole precedenti. Anche in questo caso, si è ottenuta una buona miscelazione e la mescola è stata successivamente sottoposta alla fase di estrusione a formare il compound. Con quest'ultimo sono state effettuate prove di stampaggio ad iniezione con la pressa NB, variando i parametri di formatura in modo da ottenere compatti della densità nel range 1,47 – 1,68 g/cm^3. I semilavorati ottenuti sono stati impiegati per realizzare dei tondi mediante pressatura a caldo con la pressa Komage.

Alcuni campioni sono stati sottoposti a deceratura presso ProBa Forni. Anche per l'anodo si è deciso di testare la possibilità di impiegare un aggraffante diverso. Lo spaghetto è risultato molto compatto e liscio e di facile taglio con la taglierina in linea. Come per le altre prove si è passati alla pressatura dei semilavorati ad iniezione ed alla successiva realizzazione dei tondi verdi con la pressa Komage. Questi sono poi stati tagliati a formare dei quadrati da inserire nei cicli di deceratura (vedi paragrafo successivo).

Trattamenti termici e caratterizzazione

Per la fase di messa a punto dei trattamenti termici FN si è servita sia di una collaborazione con l'Università di Modena per la deceratura a microonde, sia della ditta Pro.Ba. Le prove condotte presso l'Università di Modena non hanno dato l'esito atteso: le prove di debinding dei campioni sottoposti ai trattamenti a microonde (catodi e anodi al verde) hanno messo in evidenza alcune criticità ancora da superare. Poiché non si può escludere che questa tipologia di materiali (plasto-metallici sottili) non sia trattabile per via delle proprie intrinseche caratteristiche (alta superficie e basso volume, eccesso di polimero, sezione sottile), si è deciso di interrompere le prove. In alternativa si è provveduto a far decerare e sinterizzare presso la ditta Pro.Ba di Cambiano (TO) un lotto di catodi in plastico, delle stesse dimensioni di quelli trattati a microonde, dopo una serie di riparametrizzazioni per adeguare il trattamento alla tipologia di forno disponibile. I campioni però si sono presentati fragili e di difficile movimentazione, oltre che deformati. Si è quindi deciso di sottoporre ad un nuovo ciclo di deceratura, opportunamente modificato (Tabella 26), alcuni campioni di catodi ottenuti con l'ultima modifica alla formulazione del compound e, poiché il risultato finale del debinding è stato soddisfacente, sono stati sinterizzati 3 catodi e 3 anodi di dimensioni al verde 13x13 cm^2 (ciclo in Tabella 27).

Tabella 26. Ciclo di deceratura in flusso di N_2

Passi	Temperatura (°C)	Gradiente (°C/h)	Tempo (h)
1	TA - 200	10	20
2	200	-	0,5
3	200-300	5	20
4	300-350	10	5
5	350	-	2
6	350-450	5	20
7	450	-	2
8	450-650	25	8
9	650 - TA	Raffreddamento controllato	

Tabella 27. Variante ciclo di deceratura (flusso di N_2 con 5% Idrogeno)

Passi	Temperatura (°C)	Gradiente (°C/h)	Tempo (h)
1	TA - 300	10	25
2	300	-	24
3	300-450	5	30
4	450	-	8
5	450-550	25	4
6	550-700	50	3
7	700	-	0,5
8	700 - TA	Raffreddamento controllato	

Il ciclo termico nella versione finale è stato progettato da FN che ha dato indicazioni a Pro.Ba su come decerare (in via precauzionale molto gradualmente in modo da limitare il più possibile l'innesco di cricche o di deformazioni) e come trasferire il decerato, che è molto fragile, al forno di sinterizzazione. Di sei campioni (tre anodi e tre catodi) decerati, due si sono deformati in maniera eccessiva e quindi non sono stati sinterizzati, mentre i restanti quattro hanno sinterizzato in maniera soddisfacente (Tabella 28 e Tabella 29), permettendoci di ricavare due anodi e due catodi accettabili all'esame visivo (Figura 62).

Tabella 28. Ciclo di sinterizzazione Catodi (flusso di N_2 con 10% Idrogeno)

Passi	Temperatura (°C)	Gradiente (°C/h)	Tempo (h)
1	TA - 700	100	7
2	700-850	50	3
3	850	-	2
4	850 - TA	Raffreddamento controllato	

Tabella 29. Ciclo di sinterizzazione Anodi (flusso di N_2 con 10% Idrogeno)

Passi	Temperatura (°C)	Gradiente (°C/h)	Tempo (h)
1	TA - 700	100	6,7
2	700-850	50	3
3	850 - 1100	25	10
4	1100	-	2
5	1100 - TA	Raffreddamento controllato	

Il ritiro in trattamento termico è stato del 9% per i catodi e del 13% per gli anodi.

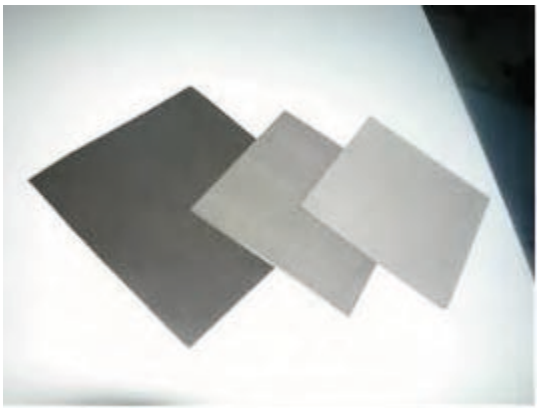


Figura 62. Elettrodi nella sequenza: verde stampato, anodo, catodo

Sono state eseguite le caratterizzazioni chimico-fisiche e microstrutturali dei provini prodotti consistenti in misure di:

- rapporto peso/area, spessore e planarità;
- morfologia al microscopio elettronico e microanalisi con particolare riferimento alla distribuzione del cromo negli anodi;
- porosità a mercurio, in base a queste misure si è potuto concludere che le caratteristiche porosimetriche del catodo (porosità 65-70%, diametro medio dei pori circa 7 micron) e quelle dell'anodo (porosità 50%, diametro medio dei pori circa 4 micron) si avvicinano a quelle che si possono prendere a riferimento: per il catodo porosità 75% e diametro medio dei pori circa 9 micron, per l'anodo porosità 50% e diametro medio dei pori circa 4 micron;
- microscopia elettronica e microanalisi; nelle figure seguenti si presentano i risultati della caratterizzazione morfologica microstrutturale, finalizzata alla valutazione del grado di sinterizzazione e di eventuali difettologie, e dell'analisi di composizione chimica semiquantitativa.

Dall'analisi si è potuto verificare che:

- per l'anodo e il catodo la struttura è simile dal punto di vista della corretta e omogenea sinterizzazione;
- il catodo appare più poroso, anche se senza grosse differenze rispetto all'anodo e quindi, coerentemente con i risultati della porosimetria, risulta più denso di quello atteso da specifica;
- nell'anodo non appaiono evidenti particelle di cromo isolato (non entrato in lega col nichel) e le microanalisi confermano che il cromo è omogeneamente disperso attorno all'1,5% p/p;
- in entrambi gli elettrodi non sono rilevati elementi estranei al nichel o nichel-cromo.

In conclusione si è dimostrato che la sinterizzazione dei verdi in plastico è possibile anche se in condizioni termiche molto differenti da quelle dei cicli tradizionali su catodi e anodi prodotti col tape casting. Sebbene vi sia tendenza alla densificazione, con particolare riferimento ai catodi, e quindi alla riduzione del volume totale di porosità aperta, gli elettrodi sinterizzati e laminati sono da valutare positivamente con risultati incoraggianti che potranno essere utilizzati nella futura attività di utilizzare il processo di fabbricazione in plastico e successivi trattamenti termici per produrre materiali porosi a spessore e porosità controllata per usi in sistemi energetici quali le celle a combustibile ad alta temperatura (MCFC e SOFC) o come supporti ceramici per membrane di separazione /purificazione di gas. In ogni caso l'esperienza, le conoscenze acquisite e le attrezzature collaudate mettono FN in condizione di proporre anche altre diverse applicazioni della tecnica in plastico a nuovi materiali compositi quali quelli plasto-inorganici (sia ceramici che metallici), da realizzare in diverse forme e dimensioni.

Sviluppo di anodi per MCFC più resistenti agli inquinanti e prove in cella

Negli anni precedenti sono stati studiati i meccanismi di avvelenamento della cella a combustibile a carbonati fusi (MCFC) in presenza di idrogeno solforato nel gas di alimentazione anodico simulante quello proveniente da biomassa. Per migliorare le prestazioni dell' anodo in termini di tolleranza allo zolfo, si è progettato di modificare le caratteristiche superficiali di un anodo convenzionale di Ni- 5% Cr ricoprendolo con un sottile strato di ossido di cerio CeO_2 per aumentare la tolleranza allo zolfo e per ottenere una maggiore reversibilità del processo di avvelenamento di una cella con anodo classico. La reversibilità della reazione scritta in precedenza, consente di rigenerare l'anodo di una cella MCFC alimentandolo per tempi opportuni con un flusso di idrogeno privo di inquinanti e contenente acqua. La tecnica migliore per tale processo di ricopertura si è dimostrata il metodo sol-gel. Le particelle del sol di cerio hanno piccole dimensioni e possono penetrare all'interno dei pori più piccoli senza provocarne l'ostruzione. Il sol di cerio (IV) depositato sull'anodo, è stato preparato, asciugato e messo in cella dove, nella fase di start up, si trasforma in ossido.

Oltre agli elettrodi ricoperti con ossido di cerio sono stati preparati elettrodi ricoperti con una miscela di ceria e zirconia. L'utilizzo di soluzioni solide ceria-zirconia è preferito rispetto alla ricopertura con la sola ceria, perché la superficie degli ossidi è maggiormente porosa, mostra caratteristiche redox superiori e modulabili variando il rapporto Ce/Zr. Inoltre l'aggiunta di ZrO_2 a CeO_2 aumenta la resistenza al sintering e favorisce la capacità di rigenerazione dell'anodo per l'elevata oxygen storage capacity. Sulla base dei buoni risultati si qui ottenuti le attività del presente anno si sono concentrate sull'ottimizzazione della preparazione degli anodi rivestiti tenendo particolarmente presente la necessità di ottenere, con opportuni trattamenti termici, uno strato di ricopertura di ceria o ceria-zirconia, molto aderente al substrato. I nuovi anodi così ottenuti sono stati confrontati con i tradizionali allo scopo di evidenziarne l'effetto positivo sulle prestazioni di cella.

Da studi di letteratura si è individuata inoltre una seconda possibilità di realizzazione di anodi resistenti allo zolfo basata sull'utilizzo del rame che può essere usato come strato protettivo o inserito come drogante durante la preparazione dell'anodo di nichel-cromo. Anche il rame forma solfuri con l'idrogeno solforato in bulk e sulla superficie per adsorbimento. Dai valori di variazione di energia libera relativi alla reazione, si deduce che la formazione di solfuri sia superficiali che di bulk avviene più facilmente sul nichel che sul rame. Per ambedue i metalli la formazione di solfuri superficiali è favorita e, per il rame, avviene a concentrazioni di idrogeno solforato quasi uguali a quelle necessarie per la formazione sul nichel di solfuri in bulk. L'uso di elettrodi di nichel ricoperti con uno strato superficiale di rame potrebbe dare luogo, nelle condizioni di esercizio di una cella a combustibile a carbonati fusi ed in presenza di zolfo, ad una diminuzione delle sovratensioni anodiche: la formazione di solfuri superficiali di rame che sono circa 800 volte meno stabili di quelli del nichel, consentirebbe di lavorare con le stesse prestazioni di cella in presenza di una quantità di idrogeno solforato molto più elevata. La preparazione di anodi di nichel-cromo rivestiti con un sottile strato di rame è stato il secondo obiettivo oggetto del presente contratto.

Le attività sono state condotte in collaborazione con l'Università di Perugia cha ha affiancato ENEA nella fase di caratterizzazione elettrochimiche dei nuovi materiali e con l'università di Tor Vergata, in particolare tale università ha preparato anodi di nichel-cromo rivestiti con ceria e ceria-zirconia. Su tali anodi sono stati messi a punto trattamenti termici atti a fissare lo strato di ricopertura superficiale. La stabilità del rivestimento è stata studiata sia fuori cella che dopo aver utilizzato gli anodi per alcuni giorni in una cella a carbonati fusi.

Messo a punto il trattamento termico più indicato alla stabilizzazione dello strato di ricopertura, si è proceduto alla caratterizzazione dei nuovi anodi in una cella da 3 cm^2: sono state individuate le condizioni operative ottimali per avere delle misure elettrochimiche significative, sono state effettuate misure di impedenza elettrochimica su una cella simmetrica e su una cella completa, sono state eseguite curve tensione corrente. Per evidenziare l'effetto positivo della ricopertura, le medesime misure sono state eseguite anche con celle assemblate con anodo tradizionale di nichel-cromo. Infine l'Università di Tor Vergata ha proceduto alla preparazione di anodi di nichel-

cromo rivestiti con un sottile strato di rame. La caratterizzazione in cella di questi ultimi elettrodi deve essere ancora effettuata.

Per quanto concerne i trattamenti termici essi sono stati messa a punto con particolare cura al fine di rendere possibile la formazione dei soli ossidi $CeZrO_4$ a partire dai precursori depositati mediante tecnica di deep coating in quanto tali precursori portavano a campioni con ricopertura omogeneamente distribuita all'interno dei substrati anodici porosi forniti da ENEA. I precursori esaminati sono stati $CeZrO_4$ colloidale (CZ50 coll) e $CeZrO_4$ sol (CZ50 sol2). Inoltre per evitare l'eventuale ossidazione del Ni contenuto nei substrati anodici, la temperatura di calcinazione del rivestimento è stata fissata a 350 °C sulla base di dati TGA. In conclusione l'attività condotta da Tor Vergata ha permesso di:

- Individuare un possibile trattamento termico (5 ore a 350 °C) che garantisse la formazione della fase cubica $CeZrO_4$ per entrambi i precursori.
- Evidenziare come la morfologia del rivestimento dipenda dal tipo di precursore utilizzato, in particolare il precursore *CZ50 Sol2* porta a particelle discrete di ossido.

Sono state effettuate analisi pre e post-test con la tecnica della fluorescenza che hanno evidenziato, nella maggior parte dei casi, perdita del materiale di ricopertura, si è quindi determinata la necessità di nuove indagini sperimentali al fine di individuare un ulteriore trattamento termico per la formazione di un "cermet" con il substrato di nichel da effettuare a valle della deposizione dei precursori con la tecnica del sol-gel. Sono stati sperimentati due diversi trattamenti termici del substrato rivestito: il primo consiste in un solo step in cui si raggiunge lentamente la temperatura di 750°C in N_2 e H_2 5% che viene mantenuta per 2 ore; il secondo è suddiviso in due step: il primo, già analizzato nel precedente paragrafo,di 350 °C per 1 ora in aria per bruciare tutte le sostanze organiche ed il secondo di 650 °C in N_2, H_2 5% per un'ulteriore ora.
I campioni di anodi rivestiti, dopo essere stati sottoposti ai due trattamenti termici, sono stati e analizzati con analisi a raggi x. Inoltre, dal confronto tra i valori ex situ e in situ i risultati ricavati ci indicano che, con opportune modifiche, vi è la possibilità di effettuare la procedura di trattamento termico direttamente all'interno della cella durante la procedura di start-up. Il cerio sembra essere particolarmente stabile tanto che dopo un test in cella di 3 settimane la concentrazione di Ce è circa di 1,30 contro gli 1,46 iniziali.

Si è passati quindi alla caratterizzazione elettrochimica per analizzare le performance delle celle a combustibile con i nuovi anodi. Questa parte di sperimentazione è stata condivisa con l'Università di Perugia ed ha visto diverse fasi:

- test in cella simmetrica da 3 cm^2 in differenti condizioni sia di gas puri che di gas contenenti H_2S;
- test in monocella completa in differenti condizioni sia di gas puri che di gas contenenti H_2S per:
  - ✓ Studiare la cinetica di avvelenamento e rigenerazione.
  - ✓ Confrontare l'anodo tradizionale con l'anodo nichel-ceria.
  - ✓ Confrontare con anodo tradizionale attraverso curve di polarizzazione.
  - ✓ Studiare l'effetto della temperatura sui meccanismi di avvelenamento attraverso l'effettuazione di polarizzazione in funzione della temperatura.
  - ✓ In tutti i test sia in semicella che in cella completa sono state effettuate curve di impedenza (diagramma di Nyquist) e analisi post test.

Nel seguito si riportano i risultati delle fasi sopra elencate.

Test in cella simmetrica da 3 cm^2

Una prima caratterizzazione elettrochimica degli anodi di Ni-Cr preparati con rivestimenti di ceria è stata eseguita in una cella da 3 cm^2 *simmetrica* e cioè una cella assemblata con due anodi. Tale configurazione non consente di valutare le prestazioni della cella, ma permette di confrontare i materiali attraverso i parametri elettrochimici ottenuti con la spettroscopia di impedenza, anche in funzione della presenza di H_2S.

Al fine di studiare l'effetto dell' avvelenamento, sono stati per prima cosa stabiliti i protocolli di misura che individuano le composizioni gassose del gas di alimentazione, i tempi necessari all'avvelenamento ed alla rigenerazione, i parametri della misura elettrochimica di impedenza.

L'avvelenamento con H_2S è stato effettuato a varie concentrazioni (2, 6, 12 e 24 ppm): per ciascuna concentrazione si è controllato il raggiungimento dello stato di equilibrio e stabilito un tempo di avvelenamento, registrando il diagramma di Nyquist fino a quando lo stesso non si manteneva su valori costanti.

Successivamente la procedura di avvelenamento ha avuto inizio con l'introduzione di H_2S seguita dall'applicazione del carico elettrico alla cella di 75 mA/cm^2 per 1,5 ore. Alla fine dell'esposizione, misure EIS sono state effettuate sia a OCV che a 100 mA/cm^2, seguite dalla esecuzione di una curva I–V. Simile procedura è stata applicata anche

durante la rigenerazione della cella che si effettua con l'introduzione di gas pulito, successiva applicazione del carico a 75 mA/cm^2 per 1,5 ore.

Sono state provate tre diverse composizioni di gas per studiare l'effetto dell'acqua sulla cella. La prima composizione detta Ref B, è fondamentalmente quella più simile al biogas prodotto da un digestore anaerobico e consiste di H_2, CO_2 e H_2O rispettivamente al 25%, 4% e 25% più azoto. La portata totale è 12,1 Nl/h. La seconda composizione del gas detta CC1, ha come fondamentale differenza un contenuto di H_2O del 40% mentre la terza (optimum gas), un contenuto del 5%.

Risultati dei test con cella simmetrica

La cella simmetrica è stata utilizzata allo scopo di eliminare il contributo del catodo al diagramma di Nyquist e di amplificare gli effetti dovuti alla polarizzazione dell' anodo. La Figura 63 mostra il diagramma di Nyquist a 100 mA/cm^2 con 48 ppm di H_2S dopo 3 ore di avvelenamento per un anodo tradizionale di Ni-Cr e per un anodo rivestito con ceria e zirconia. La minore polarizzazione ohmica dell'anodo rivestito è dovuta a differenze nell'assemblaggio della cella.

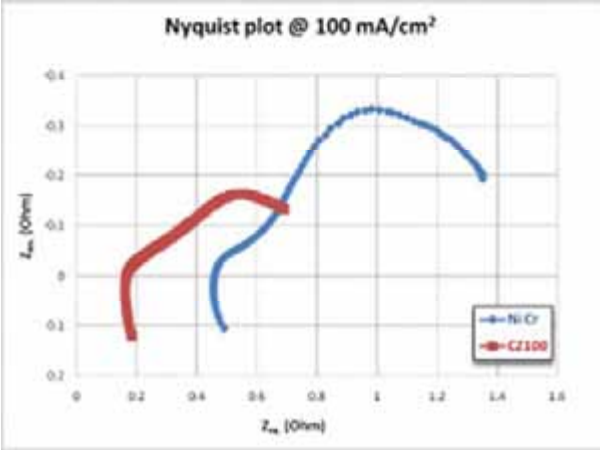


Figura 63. Diagramma di Nyquist a 100 mA/cm^2 in cella simmetrica con 48 ppm di H_2S

Non ci sono invece differenze significative nel diametro del primo semicerchio che indica che la resistenza di polarizzazione al trasferimento di carica è simile nei due materiali. Il secondo semicerchio nella regione delle basse frequenze, mostra che l'anodo rivestito, definito come CZ100, ha un diametro del semicerchio dovuto alla diffusione dei reagenti inferiore di quello dell'anodo di Ni-Cr convenzionale.

Questo fenomeno sembra dovuto al fatto che, quando il nichel è completamente ricoperto di zolfo, l'idrogeno riesce con difficoltà a penetrare il confine della tripla fase per completare la reazione elettrochimica.

Risultati test in cella completa

La caratterizzazione elettrochimica in cella completa degli elettrodi con il rivestimento di ceria è stata eseguita dopo aver sottoposto l'elettrodo al trattamento termico prima dell'inserimento in cella. Sono state acquisite curve di polarizzazione e misure di impedenza.

Cinetica di avvelenamento e rigenerazione

Come passo successivo alla cella simmetrica, per comprendere i meccanismi dell'avvelenamento prima dell'utilizzo degli elettrodi in un impianto di prova, i materiali messi a punto sono stati caratterizzati in una cella completa da 3 cm^2. La cella è stata assemblata con anodo innovativo e un catodo tradizionale.

Per completare la procedura di prova della cella, si è studiata la cinetica di avvelenamento e rigenerazione effettuando misure di impedenza elettrochimica ad intervalli di tempo molto brevi, durante l'avvelenamento dell'anodo con 24 ppm di H_2S e durante la rigenerazione con gas pulito. La Figura 64 mostra i diagrammi di Nyquist in funzione del tempo con anodo rivestito di ceria. E' stato applicato alla cella un carico elettrico di 75 mA/cm^2 in quanto, da studi precedenti, si è dimostrato che l' H_2S è adsorbito solo quando il carico è applicato.

Un carico superiore può danneggiare la cella mentre un carico inferiore non può garantire che l'avvelenamento elettrochimico sia avvenuto.

Un esperimento simile è stato effettuato anche per capire la velocità della rigenerazione dell'elettrodo. Anche la rigenerazione è stata effettuata sotto carico in quanto il più elevato contenuto di acqua formata dalla reazione, accelera il processo di rigenerazione. Come per i diagrammi ottenuti durante l'avvelenamento, non si evidenzia

alcun cambiamento significativo per la resistenza ohmica della cella e per la resistenza di polarizzazione dovuta al trasferimento di carica.

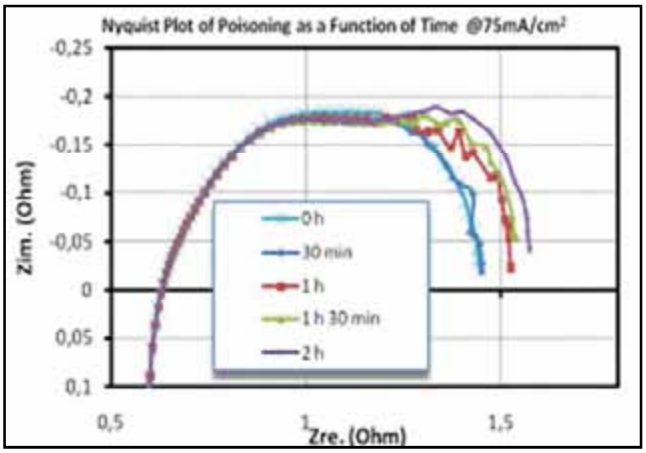


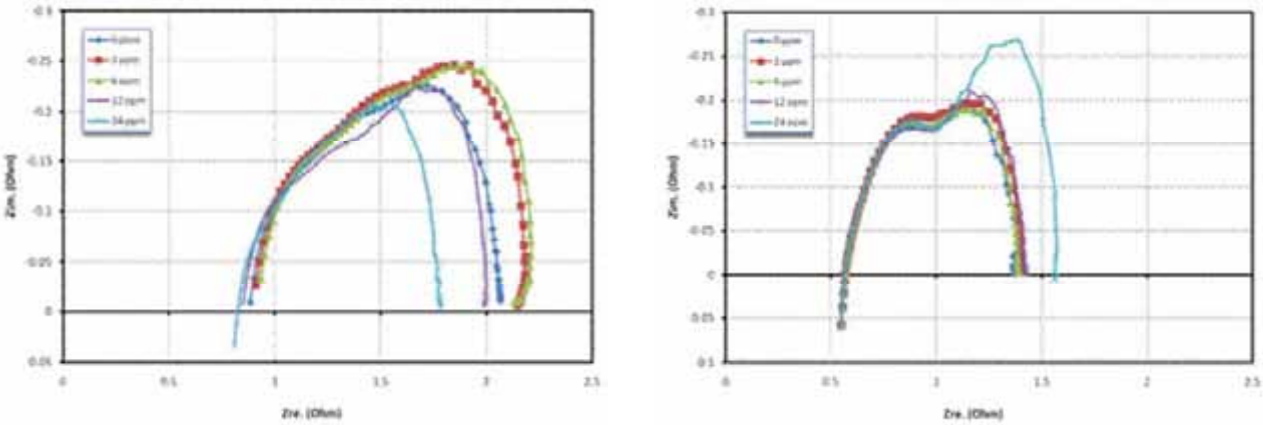
Figura 64. Diagramma di Nyquist con 24 ppm di H_2S in funzione del tempo

Sulla base delle prove effettuate sulla cella simmetrica e su quella completa è stato possibile definire la composizione ottimale del gas che evita eccessivi problemi di corrosione e consente misure di impedenza prive di dati troppo scatterati (optimum gas H_2O 5%), il tempo necessario per l'avvelenamento e per la rigenerazione della cella fissato in 1 h e 30 min, il carico elettrico a cui deve essere sottoposta 75-100 mA/cm^2.

Confronto anodo tradizionale anodo nichel-ceria

Usando il protocollo messo precedentemente a punto, sono state confrontate le prestazioni di un anodo Ni-Cr convenzionale con un anodo rivestito di ceria in varie condizioni (OCV, 100 mA, dopo rigenerazione). Nella Figura 65, a titolo di esempio, si riportano i diagrammi di Nyquist ad OCV per diverse concentrazioni di idrogeno solforato.

Per ambedue gli elettrodi non ci sono grandi differenze della resistenza ohmica della cella o di quella al trasferimento di carica; questo sta ad indicare che l'avv elenamento dovuto alla reazione con l'elettrolita non è significativo dopo 1h e 30 min di esposizione all'H_2S.



(a) *(b)*

Figura 65. Diagramma di Nyquist di anodi (a) Ni-Cr e (b) Ni-ceria a OCV durante avvelenamento con 2, 6, 12, 24 ppm di H_2S

Confronto con anodo tradizionale attraverso curve di polarizzazione

Un ulteriore confronto delle prestazioni dei due anodi in esame è stato effettuato registrando le curve di polarizzazione a diverse concentrazioni di inquinante. Il confronto dei dati delle curve tensione corrente può essere effettuato osservando la Figura 66.

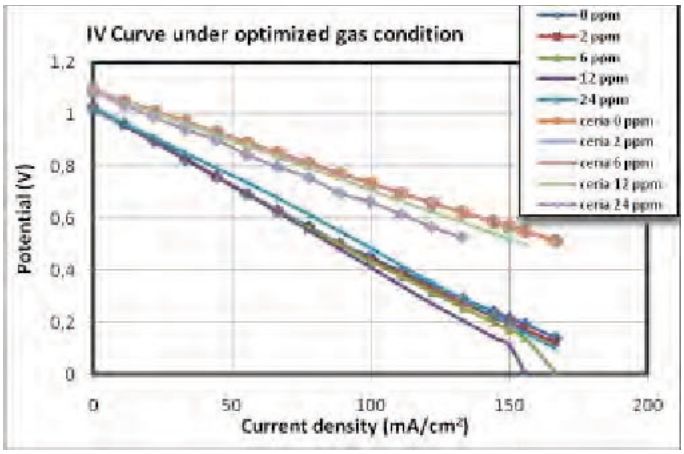


Figura 66. Curve tensione-corrente di anodi Ni-Cr e Ni-ceria a diverse concentrazioni di H_2S

Per l'anodo Ni-Cr, è stato osservato un calo delle prestazioni in particolare ad elevate densità di corrente fino a 12 ppm di H_2S. In buon accordo con le misure di impedenza elettrochimica, si evidenzia un miglioramento delle prestazioni di cella ad una concentrazione di 24 ppm di H_2S. Ulteriori indagini devono essere effettuate per valutare l'effetto di 24 ppm di H_2S alimentato all'anodo per tempi più lunghi.

Nel complesso l'anodo rivestito con ceria mostra prestazioni migliori di quello tradizionale: l'effetto dell'avvelenamento si evidenzia intorno ad una concentrazione di 12 ppm di H_2S ed aumenta in modo contenuto anche a 24 ppm. Si può inoltre osservare che l'anodo rivestito con ceria presenta una OCV maggiore di quella dell'anodo tradizionale: questo fenomeno è dovuto alla presenza in superficie dell'ossido che rende l'elettrodo più facilmente bagnabile dai carbonati.

Curve di polarizzazione in funzione della temperatura

Sono state effettuate curve di polarizzazione per l'elettrodo rivestito con ceria, a diverse concentrazioni di H_2S e tre diverse temperature: 650, 675 e 700 °C. Si è visto in tal modo che l'aumento della temperatura ha un effetto positivo sulle prestazioni di cella anche in presenza di idrogeno solforato: le reazioni dell'H_2S con l'elettrodo di nichel o con l'elettrolita sono infatti reazioni esotermiche e quindi termodinamicamente sfavorite da un aumento della temperatura.

Analisi post test

Sugli elettrodi esposti per 24 h a 12 ppm di H_2S sono state effettuate fotografie al microscopio elettronico a 1000 e 5000 ingrandimenti. Le immagini mostrano come non ci sono cambiamenti nella morfologia dell'anodo, né si vedono evidenti modifiche della porosità.

In conclusione, le misure di impedenza elettrochimica, le misure di polarizzazione e le analisi post test mostrano che gli elettrodi ricoperti hanno prestazioni più elevate di quelli tradizionali e risultano essere efficaci nel ridurre gli effetti dell'avvelenamento, soprattutto a basse concentrazioni di idrogeno solforato. Tale condizione dovrebbe essere assicurata dalla fase di clean up che viene prevista all'uscita del biodigestore e che riduce la concentrazione dell'inquinante a valori inferiori al ppm. Lo strato di rivestimento con ceria e ceria–zirconia è dunque una potenziale soluzione per ridurre l'avvelenamento di una MCFC alimentata con gas proveniente da digestore.

Come accennato all'inizio si è deciso di investigare anche la possibilità di usare un coating di rame e quindi si è proceduto con lo studio della deposizione in soluzione alcalina di rame. L'attività di ricerca è stata finalizzata all'individuazione di protocolli di sintesi per il rivestimento di substrati anodici in Ni forniti da ENEA con Cu metallico, ovvero con opportuni precursori che, in seguito a trattamento termico in atmosfera riducente, possano essere facilmente convertiti in Cu metallico. La deposizione di CuO su substrati anodici porosi di Ni è stata eseguita con due metodi:

- il CBD, largamente impiegato per la formazione di film sottili di diversi materiali (ossidi, calcogeniti, etc.) a bassa temperatura (300 – 350 K), impiegando precursori inorganici e attrezzature di facile industrializzazione.
- Deposizione elettrolitica di Cu metallico su substrati porosi di Ni mediante elettrolisi pulsata.

Campioni prodotti con i due metodi sono stati sottoposti a varie analisi chimico-fisiche e morfologiche che hanno portato a concludere:

- il metodo di CBD consente la deposizione di film nanostrutturati di CuO su substrati anodici di Ni. Scegliendo opportunamente le condizioni sperimentali, quali la concentrazione della soluzione e i tempi di deposizione, è

possibile ottenere film di determinato spessore. Il CuO depositato può essere facilmente trasformato in Cu metallico con un trattamento termico in atmosfera riducente.

- La deposizione elettrolitica pulsata consente il rivestimento con particelle submicrometriche di Cu. In questo caso non è necessario alcun trattamento termico dei substrati per formare la fase metallica di Cu. Inoltre rispetto al metodo CBD si producono meno materiali di scarto.

Le future attività di caratterizzazione elettrochimica consentiranno di individuare quale dei due metodi sarà più rispondente alle caratteristiche volute.

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

Nell'ambito dell'attuale piano il presente obiettivo prevede il completamento di alcune linee di ricerca del precedente triennio con la realizzazione di prototipi da laboratorio in scala significativa e l'avvio di attività sperimentali su impianti di taglia reale ed in parte, l'avvio di nuove attività sperimentali scala laboratorio, finalizzate alla produzione di energia elettrica anche in assetto cogenerativo. In particolare, era previsto l'esercizio di un impianto di gassificazione di biomasse accoppiato con sistema a celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC) da 125 kW presso il Centro della Trisaia e la relativa sperimentazione del sistema integrato.

La prima fase dell'attività è stata dedicata alle simulazioni numeriche delle performance di cella al variare della qualità del syngas (regolata modificando i parametri di processo) condotte mediante utilizzo di software commerciali valutando il comportamento della cella al variare del carico anodico proveniente dal gassificatore sia in condizioni stazionarie, mediante software Chemcad, sia nei transitori di cella mediante Fluent, come sarà mostrato nei paragrafi seguenti.

Sul versante impiantistico, l'accoppiamento fra gassificatore e cella è stato completato con la fornitura e la posa in opera della parte elettrostrumentale. Tuttavia la sospensione delle attività Ansaldo Fuel Cell nell'ambito della tecnologia a carbonati fusi e la chiusura dei siti produttivi ed operativi di Terni e Bosco Marengo hanno comportato un cambiamento nelle attività dovute all'assenza del partner industriale italiano produttore dello stack di celle a combustibile; pertanto si è deciso di non gravare ulteriormente sulle spese previste per tale attività sperimentale, non completando la parte strumentazione e componentistica accessoria interno vessel.

Nella terza annualità è stata effettuato lo studio modellistico per la produzione di gas naturale sintetico (SNG) a partire da biomasse. Tale studio è stato mirato all'analisi dei problemi connessi con la formazione di metano a partire da syngas, pertanto ricco in CO e CO_2 ; in particolare, l'esotermicità della reazione di metanazione, richiede un controllo accurato della temperatura, che necessita di un'efficiente rimozione di calore per minimizzare la disattivazione del catalizzatore a causa di stress termici che non favoriscono la reazione di metanazione.

Per ciò che concerne la prima parte sono state prese in considerazioni due principali tipologie di reattore per la produzione di gas naturale sintetico: reattori a letto fisso adiabatici in serie con raffreddamento intermedio e reattori a letto fluidizzato. Per la definizione dei parametri di processo si è utilizzato come strumento di simulazione il software commerciale CHEMCAD.

L'alimentazione di gas proveniente dal processo di gassificazione contiene, oltre ai reagenti della reazione di metanazione CO e H_2, anche CO_2, H_2O e una frazione di metano non convertita dalle reazioni di reforming nel gassificatore. Nello studio del processo si è previsto un pretrattamento di questo gas, attraverso un reattore di *Water Gas Shift* (WGS) tra il reattore di gassificazione e quello di metanazione. Si è ottimizzata la temperatura in tale reattore ed il rapporto H_2/CO entrante nella sezione di metanazione, inoltre, è stata valutata l'incidenza di CO_2 e H_2O sul prodotto di reazione e quindi gli effetti di un eventuale step di condensazione del vapore e/o di cattura di CO_2 utilizzando un sorbente solido a basso costo come l'ossido di calcio, prima dell'ingresso nel reattore di metanazione.

Il feed gas entrante viene convogliato nel reattore adiabatico, dove è previsto un sistema di ricircolo per controllare la temperatura a causa della forte esotermicità delle reazioni coinvolte. Si è studiato l'effetto dell'inserimento di uno scambiatore dei calore in ingresso e in uscita ad ogni reattore, in modo da controllare il processo attraverso la temperatura di ciascun reattore di metanazione; anche la pressione è tra le variabili analizzate nell'ottimizzazione della resa termodinamica del processo. Il calore in eccesso potrà essere recuperato, per esempio attraverso la produzione di vapor d'acqua, agente gassificante nel gassificatore. Il risultato finale del report è il dimensionamento di massima del reattore con l'indicazione del numero di reattori ottimali per ottimizzare la resa in metano. Per quanto riguarda questa linea lo schema concettuale sul quale si è basata l'attività sperimentale è riportato nella Figura 67.

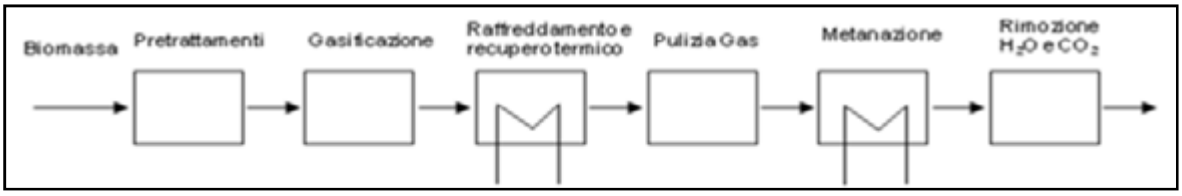


Figura 67. Schema di base

La seconda parte della ricerca ha riguardato lo studio dei processi di purificazione finale del metano, infatti la miscela di syngas proveniente dal gassificatore è costituita essenzialmente da CH_4, CO, CO_2, H_2 e H_2O ed a seconda delle portate e della composizione dei gas in gioco sono state prospettate diversi metodi di separazione(membrane polimeriche, membrane nanocomposite, membrane a liquidi ionici, processi di adsorbimento, distillazione criogenia, etc. Nel caso della ricerca in oggetto si è studiato, oltre alla separazione in sé della CO_2, anche il suo eventuale utilizzo all'interno del processo integrato.

Il lavoro ha riguardato lo studio di prefattibilità delle varie tecnologie disponibili, supportato da indagini sperimentali ad integrazione e verifica della letteratura disponibile con la finalità di ottimizzare il processo in funzione dei parametrici input forniti nel precedente report dell'accordo di collaborazione, ottenendo come risultato finale la valutazione della purificazione finale del metano dalla miscela prodotta, contenente CO, CO_2, H_2 e H_2O, cercando di minimizzare il consumo di energia richiesta in questo step al fine di ottenere una concentrazione in volume di metano all'interno della miscela di SNG almeno pari a quella prevista dal codice SNAM RETE GAS.

Impianto gassificazione – celle a combustibile

Allo stato attuale l'impianto risulta completo nelle opere civili necessari all'allocazione dei serbatoi criogenici e del bunker stoccaggio idrogeno necessari per lo start-up ed esercizio dell'impianto. E' stata predisposta la sala controllo dell'impianto all'interno della quale sono collocati i quadri di comando dei riscaldatori elettrici, della soffiante, nonché il quadro di potenza dell'impianto. Sono state inoltre predisposti i siti per lo stoccaggio dei gas criogenici (azoto e anidride carbonica) e dei gas compressi (idrogeno e aria compressa) e di tutte le linee di collegamento. Ad oggi l'impianto risulta completato per ciò che concerne la regolazione ed il controllo esterno dei flussi anodico e catodico, ciononostante per i motivi precedentemente illustrati, risulta incompleto nella strumentazione e nella componentistica accessoria interno vessel.

Accanto alla parte sperimentale è stato implementato un modello di simulazione per la cella a combustibile a carbonati fusi (Figura 68), nell'ipotesi che venga alimentata con un gas simulato dalle caratteristiche simili a quelle del syngas prodotto dall'impianto di gassificazione a vapore a doppio letto fluido operante presso il Centro Ricerche ENEA di Trisaia.

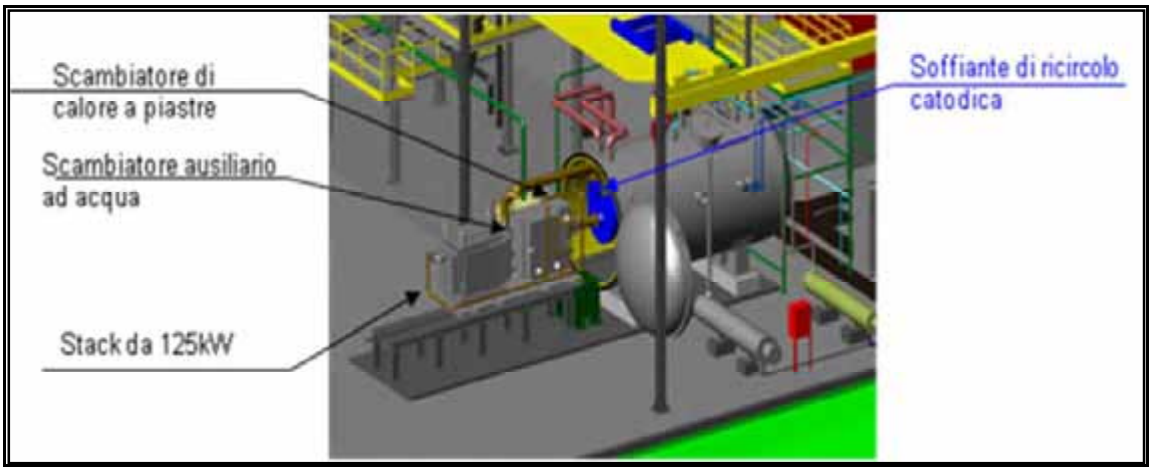


Figura 68. Sezione longitudinale dell'impianto a celle a combustibile a carbonati fusi

Le simulazione effettuate per differenti intensità di carico, hanno permesso di valutare i consumi di combustibile attesi all'interno della cella. Confrontando tali valori con quelli teorici si può fare una indicativa valutazione della attendibilità del modello. In Figura 69 vengono confrontati i consumi teorici di idrogeno rispetto a quelli calcolati per mezzo del simulatore in funzione della intensità di corrente generata.

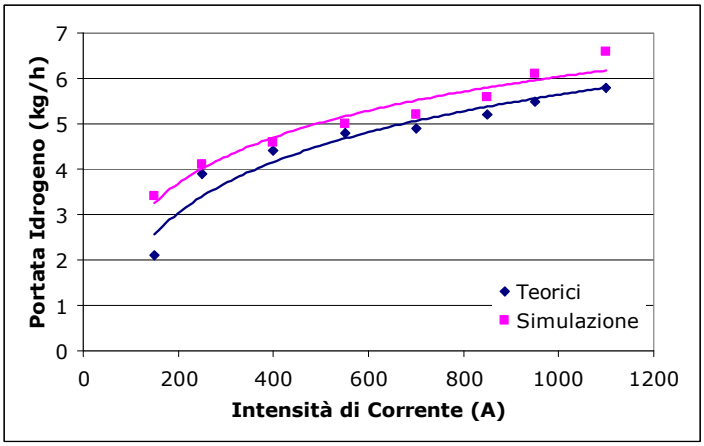


Figura 69. Confronto tra consumi teorici e da simulazione di idrogeno al variare dell'intensità di corrente prodotta

Anche per il monossido di carbonio è stato fatto un confronto tra consumi teorici in cella e consumi ottenuti dalla simulazione in funzione dell'intensità di corrente come è possibile osservare nella Figura 70.

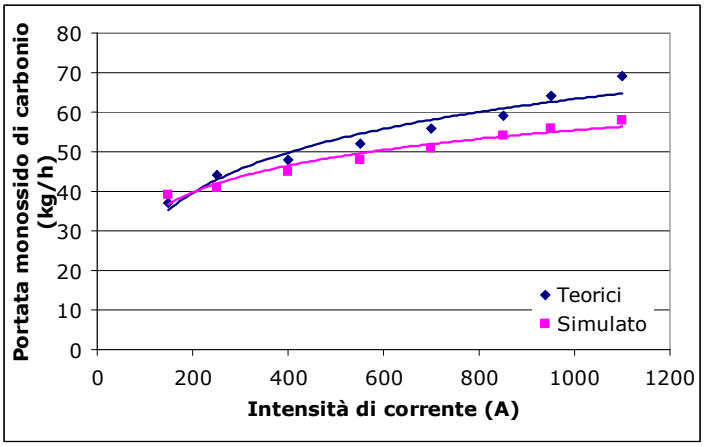


Figura 70. Confronto tra consumi teorici e da simulazione di monossido di carbonio al variare dell'intensità di corrente prodotta

Successivamente all'utilizzo del biogas simulato, il modello della cella sviluppato con ChemCAD®, è stato utilizzato per verificare il comportamento del sistema MCFC al variare della composizione del gas alimentato. Sono state utilizzate le portate e le composizioni del biogas ottenuto da quattro prove sperimentali effettuate con l'impianto di gassificazione operante al Centro di Ricerche ENEA di Trisaia. È possibile osservare che l'idrogeno presente nella miscela gassosa varia dal 26 fino al 33,4% in volume mentre il monossido di carbonio assume percentuali che variano tra il 19 ed il 25,1% in volume. Dalle simulazioni effettuate nei quattro casi presi in esame si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 30.

Tabella 30. Principali prestazioni della cella

TEST	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
Portata biogas [kg/h]	170,6	134,5	208,3	198,5
Temperatura cella [°C]	656,3	652,7	678,4	682,5
U_f [%]	76,4	79,5	81,3	83,4
Rendimento della cella [%]	**43**	**46,3**	**47,4**	**48,6**

Nella Figura 71 viene messo in evidenza il variare dei valori del coefficiente di utilizzazione e del rendimento di cella al variare della composizione del biogas alimentato in cella.

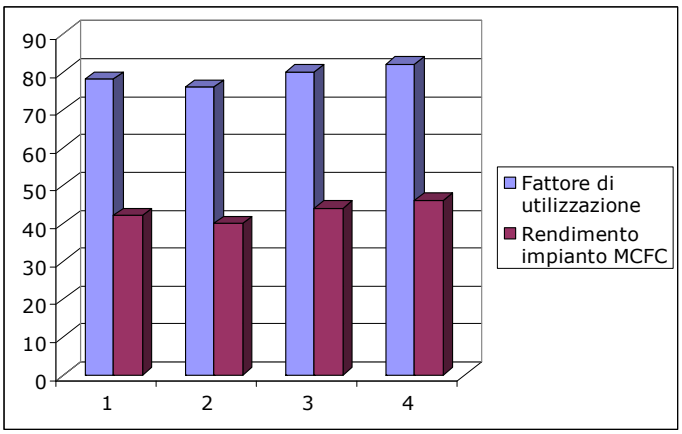


Figura 71. Confronto fra i rendimenti della cella in varie condizioni

Come è possibile verificare dalla Figura 71, l'efficienza complessiva di impianto MCFC da 125 kW alimentato dal syngas di qualità pari a quello ottenuto nelle quattro prove sperimentali si attesta tra il 40-45%.

E stata anche effettuata un'analisi di sensibilità per vedere l'influenza di alcuni parametri operativi del gassificatore sulla resa della cella a combustibile. In particolare, utilizzando un modello di letteratura, sono state fatte delle simulazioni sull'effetto della temperatura di gassificazione e del rapporto SBR sulla composizione del gas prodotto. In Figura 72 sono riportati alcuni risultati.

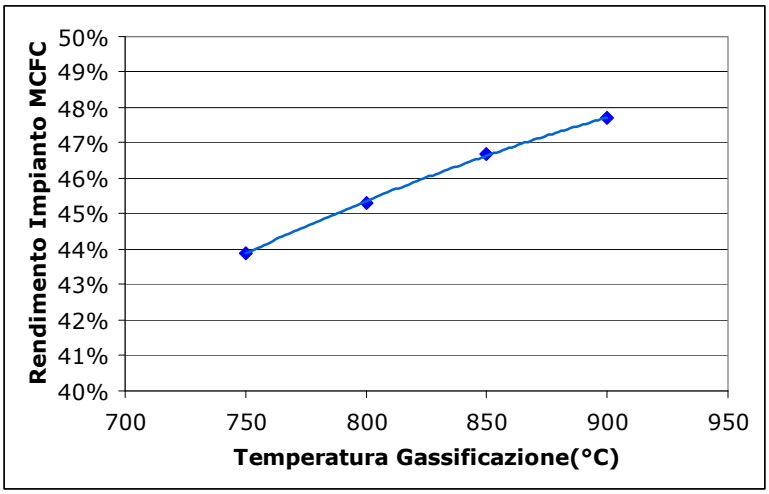


Figura 72. Andamento del rendimento di cella al variare della temperatura di gassificazione

Principali soggetti esterni coinvolti

Di seguito verranno riportati i contributi delle Università e della co-beneficiaria FN.

Università di Roma "La Sapienza"

Oggetto dell'attività di ricerca condotta è stato l'individuazione delle condizioni ottimali per la produzione combinata di H_2 e CH_4 mediante co-digestione anaerobica di substrati organici biodegradabili (frazione organica dei rifiuti urbani e fanghi dal trattamento delle acque reflue), ai fini di un successivo impiego del biogas in celle a combustibile.

L'Università ha effettuato un'analisi dello stato dell'arte sui processi di upgrading di biogas, condotta con particolare riferimento a processi per l'ottenimento di gas idoneo all'alimentazione di motori a combustione interna o all'iniezione nella rete di distribuzione del gas naturale. Le caratteristiche di processo sono state definite considerando di dover ottenere gas per l'alimentazione di un motore da 1 MW. UniRoma1 ha anche fornito il supporto:

- per la progettazione di un apparato sperimentale per la caratterizzazione e lo studio dei processi selezionati;
- nella definizione ed effettuazione delle prove sperimentali presso i laboratori ENEA della Casaccia;
- nell'elaborazione ed interpretazione dei dati così prodotti mediante l'utilizzo di un modello matematico

sviluppato ad hoc dalla stessa UniRoma1;

- per la modellizzazione di processi a membrana per la separazione della CO_2 e per la simulazione di membrane condotta dal gruppo PERT dell'Università di Genova. In particolare, UniRoma1 ha messo a disposizione sia le sue competenze nell'ambito della modellizzazione di processi a membrana per contribuire allo sviluppo di modelli preliminari a parametri distribuiti, che la sua esperienza per l'individuazione dei software più adatti all'implementazione dei modelli sviluppati nell'ambito del progetto.

Università della Tuscia

L'Università della Tuscia ha condotto un'indagine sulla biodiversità delle popolazioni microbiche coinvolte in fermentazioni anaerobiche in condizioni di mesofilia, approfondendo lo studio dell'ecologia microbica per ottenere un completo e corretto quadro della distribuzione dei microrganismi studiati e in parallelo, e per ampliare anche gli studi sulla loro tassonomia e sulla fisiologia. L'analisi della biodiversità microbica sui diversi campioni oggetti di questo studio (campioni-MIX) è stata condotta mediante l'applicazione della tecnica DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis). Questa tecnica è stata impiegata per determinare la presenza e l'abbondanza relativa delle differenti specie e per ottenere un profilo sia qualitativo (presenza/assenza di bande) che semiquantitativo (intensità delle bande) delle comunità microbiche oggetto di studio. Il lavoro sperimentale ha riguardato l'ottimizzazione della tecnica di DGGE in funzione della sua applicabilità ai campioni di nostro interesse. L'analisi DGGE è stata condotta con il sistema DCodeTM Universal Mutation DetectionSystem (BIO-RAD).

Università di Salerno - Fisciano

L'Università si è concentrata principalmente sulla caratterizzazione si materiali per l'ossidazione selettive dei contaminanti contenuti nel biogas da digestione anaerobica ed ha contribuito ad individuare i principali parametri operativi dei processi più promettenti. In particolare sono state effettuate campagne sperimentali per approfondire lo screening fatto negli anni precedenti concentrandosi sui campioni più interessanti, sui quali sono state condotte prove sperimentali rivolte alla determinazione dei principali parametri cinetici della reazione catalitica, quali ad esempio ordine di reazione rispetto ai reagenti (H_2S e O_2), nonché dell'energia di attivazione. Oltre alle formulazioni dei nuovi catalizzatori e ai risultati sperimentali, in questa fase ha contribuito alla realizzazione di una prima versione semplificata di un modello del reattore catalitico, che è stato impiegato ai fini della modellazione di processo.

Una seconda parte delle attività sperimentali è stata dedicata allo studio del comportamento dei catalizzatori in presenza dei principali composti tipicamente costituenti il biogas oltre all'idrogeno solforato. In particolare è stata esaminata anche l'influenza del CH_4 nella reazione di ossidazione parziale selettiva dell'H2S; la verifica sperimentale è stata condotta in termini di attività catalitica e di selettività del sistema reagente, valutando eventuali effetti di competizione da parte dei principali componenti.

Università Federico II di Napoli

L'Università di Napoli si è prevalentemente concentrata sulla progettazione di metodiche adatte alla rimozione di H_2S e di alidi mediante l'impiego di processi di adsorbimento. L'attività ha avuto come presupposto i risultati acquisiti nell'attività precedente ed ha avuto come obiettivo la definizione di una metodologia per approfondire lo screening precedente, concentrandosi sui campioni più interessanti, sui quali sono state condotte prove sperimentali rivolte alla definizione e determinazione dei principali meccanismi che intervengono nel processo di adsorbimento. A tale scopo sono state condotte prove di adsorbimento al variare dei principali parametri operativi, tenendo conto anche della presenza della CO_2. Nella sperimentazione si è anche affrontato, per le diverse tipologie di materiali, la determinazione delle tecniche e metodologie sperimentali idonee allo studio delle proprietà adsorbenti nei confronti anche di alidi presenti in correnti di biogas, quali HCl o HF.

L'Università si è dedicata anche al completamento dello sviluppo di uno strumento software, denominato A.I.D.A. in grado di fornire un supporto all'assistenza tecnica per gli operatori del sistema produttivo agricoltura e agroindustria. Le attività del presente anno riguardavano tre aspetti:

a) il potenziamento del software A.I.D.A. mediante funzioni di "ricerca avanzata".
b) L'approfondimento dell'Analisi tecnico-economica con l'introduzione di aspetti critici nella gestione delle biomasse in un impianto di digestione anaerobica.
c) Lo strumento di calcolo è stato completato, inoltre, dall'analisi di sensitività, che consente di valutare la variazione della redditività dell'investimento, sulla base dei principali fattori economici: costo delle matrici, saggio di sconto bancario, prezzo dei certificati verdi, quota di incentivo in conto capitale ecc.

d) È stato aggiunta la parte che riguarda la valorizzazione energetica delle biomasse lignocellulosiche aggiungendo al software il modello per la simulazione della sezione di gassificazione delle biomasse lignocellulosiche.

Università di Genova

L'Università di Genova ha ricoperto il ruolo di modellista pertanto al sua attività è consistita nello sviluppo di modelli a vario grado di dettaglio, atti alla simulazione di sistemi di separazione di gas per mezzo di membrane, sulla base di un'espressione lineare per il trasporto di materia. L'attività modellistica è stata indirizzata verso un modello del modulo a membrane finalizzato a equipment design, rating e simulation (quindi formulato in termini di permeanza) e predisposto per l'integrazione in modelli di processo. Sono stai quindi realizzati quindi modelli auto-inizializzanti e robusti, con derivate analitiche.

Università di Bologna

L'Università di Bologna ha avuto il compito di indagare le caratteristiche di diverse matrici polimeriche, al fine di individuare quelle con le migliori proprietà per la separazione di una corrente mista di metano e anidride carbonica, da usare per upgrading di biogas attraverso un processo a membrana. L'U.O. ha focalizzato il suo impegno nel testing di alcuni materiali polimerici commerciali che, per le loro caratteristiche di permeabilità e selettività, possono essere utilizzati come membrane nel processo di separazione "tal quali" oppure adeguatamente modificate. In particolare, l'attenzione si è focalizzata su una poliimide commerciale, la Matrimid, su cui si sono condotte prove con gas puri, metano ed anidride carbonica, valutando la selettività ideale CO_2/CH_4 in diverse condizioni operative.

Università di Cosenza – Rende

L'Università di Cosenza – Rende ha effettuato una approfondita analisi sullo stato dell'arte soprattutto per quanto riguarda l'uso di membrane polimeriche; ha fornito gli schemi progettuali per la realizzazione del modulo a membrane piane per effettuare test su membrane polimeriche. Un primo set di prove sperimentali ha riguardato i test di permeazione su membrane inorganiche sia di tipo commerciale sia di tipo non commerciale, relativamente al sequestro e separazione della CO_2. Si è dato particolare rilievo all'uso di membrane composite a base di palladio per il sequestro dell'anidride carbonica da correnti contenenti idrogeno ed altri composti.

Università di Roma "Tor Vergata"

L'Università di Roma "Tor Vergata" ha collaborato con ENEA nella messa a punto di anodi innovativi più resistenti alle impurezze contenute nel biogas. La produzione di anodi innovativi consiste nel depositare su quelli convenzionali strati protetti o strati "trappola" basati essenzialmente su Ceria, Zirconia e Rame. A tal fine l'Università ha studiato e messo a punto diversi tipi di processi di deposizione variando opportunamente i parametri di processo, i trattamenti pre e post deposizione. La stretta cooperazione con ENEA è stata molto importante perché c'è stato un continuo processo di feedback in un circuito che vedeva la produzione di campioni in certe condizioni, l'invio ad ENEA per le caratterizzazioni chimico-fisiche-morfologiche-elettrochimiche, il ritorno da parte di ENEA di indicazioni sul come eventualmente modificare i campioni e di conseguenza il processo.

Università di Perugia

L'Università di Perugia ha collaborato con ENEA nella caratterizzazione elettrochimica dei nuovi anodi effettuando test in monocelle a carbonati fusi in regime di avvelenamento. Ha effettuato circa 4000 ore di test con due differenti monocelle.

Università di Cosenza

L'Università di Cosenza ha in una prima fase condotto un'attività di ricerca bibliografica relativa al processo di gassificazione di biomasse in presenza di acqua in condizioni supercritiche (SCWG). L'obiettivo dello studio della letteratura è stato quello di ricavare un quadro completo circa le tecnologie ed i processi che prevedono la gassificazione di biomassa (o substrati modello) in condizioni supercritiche.
La seconda parte è stata un'attività di ricerca focalizzata alla modellazione termodinamica del processo di gassificazione di biomasse in presenza di acqua in condizioni supercritiche (SCWG). L'obiettivo era quello di ricavare un modello termodinamico semplificato da impiegare per valutare gli effetti della conduzione del processo di gassificazione in condizioni supercritiche.

Università de L'Aquila

L'Università de L'Aquila ha concentrato le sue attività di ricerca su due linee principali:

- lo studio di configurazioni impiantistiche e delle variabili processuali di un impianto di gassificazione di biomasse per massimizzare la produzione di metano.
- lo studio dei processi di purificazione finale della miscela di gas proveniente dal gassificatore essenzialmente costituita da CH_4, CO, CO_2, H_2 e H_2O. Lo studio ha tenuto conto della grande variabilità della taglia degli impianti di gassificazione che comporta, a seconda della biomassa in ingresso al gassificatore, una grande variazione nella portata di gas da trattare.

FN, Nuove Tecnologie e Materiali Avanzati S.p.A.

FN ha contribuito alle attività degli obiettivi:

1) sviluppo di processi e sistemi per l'arricchimento in metano di biogas, al fine di ottenere la composizione richiesta dalla rete.
2) Sistemi di generazione/cogenerazione a biogas o syngas da biomasse: analisi delle tecnologie per specifiche applicazioni; sviluppo di componenti di celle a combustibile ad alta temperatura a minor costo e resistenti agli inquinanti".

Nel primo obiettivo si prevedeva un approfondimento delle problematiche legate ad un'efficiente rimozione dell'anidride carbonica dal gas ottenuto tramite digestione anaerobica di biomasse (Biogas), con la finalità ultima, legata al know how ed alle potenzialità della FN, di individuare tra le varie tecnologie esistenti (consolidate o innovative) quella a più alto valore aggiunto che potesse mettere la stessa FN in condizioni di sviluppare prototipi per la separazione dei gas tramite membrane inorganiche/ceramiche, in alternativa alle polimeriche.

Nel secondo obiettivo si prevedeva per FN la messa a punto della produzione di anodi e catodi per celle a combustibile a carbonati fusi tramite il processo dei estrusione per via plastica in alternativa al processo di colatura su nastro senza dubbio più costoso e meno ecosostenibile per via dei solventi organici in esso utilizzati. Poiché la maggior criticità individuata nel corso dell'annualità precedente consisteva nella corretta esecuzione dei trattamenti termici di evacuazione del legante organico (deceratura) e di sinterizzazione, una prima parte delle attività condotte da FN ha riguardato lo studio di possibili processi di deceratura alternativi ai forni tradizionalmente utilizzati in FN.

Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

(Referente P. Delli Veneri)

Le attività svolte nell'ambito del presente progetto hanno lo scopo di promuovere lo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche innovative in grado di generare vantaggi nel lungo termine per gli utenti del sistema elettrico nazionale. In Italia, infatti, si è osservata una forte crescita della filiera fotovoltaica (FV), favorita sia dal quadro normativo, che incentiva le installazioni di nuovi impianti FV, che dalla presa di coscienza da parte della pubblica opinione del potenziale che l'energia solare rappresenta per la produzione di elettricità. Negli ultimi anni i costi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie all'incremento della produzione e alla riduzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia l'abbassamento dei costi di fabbricazione dei moduli fotovoltaici a valori inferiori a 0,5 €/Wp potrà favorire l'affermarsi di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti adottati.

Le attività di ricerca sono state focalizzate sullo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche a film sottile basate su materiali semiconduttori inorganici e organici. In particolare le linee di ricerca che verranno descritte nel seguito sono state rivolte allo sviluppo di tecnologie avanzate nel campo del fotovoltaico a film sottile di silicio e materiali policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI. Sono stati, inoltre, sviluppati materiali nanostrutturati e polimerici per celle solari di nuova generazione.

Nell'ambito della tematica del FV a film sottile di silicio, le attività hanno avuto lo scopo di sviluppare materiali assorbitori e drogati per celle solari tandem micromorfe, alternativi a quelli generalmente utilizzati. Inoltre sono stati studiati materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo.

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

Per quanto riguarda lo sviluppo di strati assorbitori alternativi a quelli attuali, è stato adeguato il sistema di deposizione per poter crescere film sottili microcristallini di silicio germanio (µc-$Si_{1-x}Ge_x$:H) mediante tecnica VHF PECVD. Sono stati depositati e caratterizzati film di µc-$Si_{1-x}Ge_x$:H a vario contenuto di germanio e effettuati i primi test di fabbricazione di dispositivi. Inoltre sono proseguite le attività sullo studio di materiali nanostrutturati da utilizzare come strati assorbitori innovativi. In particolare è stata eseguita un'approfondita caratterizzazione ottica di nanocristalli di silicio in matrice di nitruro di silicio. E' stato, inoltre, acquisito e installato un banco ottico per la misura dei piccoli assorbimenti (Automated Dual-Lamp Photothermal Deflection Spectrometer) che consente di eseguire una caratterizzazione ottica dei campioni su un ampio intervallo di energie.

L'attività sui film sottili policristallini è stata incentrata sulla realizzazione di celle fotovoltaiche basate sul semiconduttore quaternario Cu_2ZnSnS_4. Questo semiconduttore ha una struttura simile al CIS ma ha il vantaggio di non contenere l'indio che è un metallo raro e costoso. Sono state allestite, almeno nella loro prima versione, tutte le attrezzature sperimentali necessarie al progetto. Per la crescita dei film di Cu_2ZnSnS_4 è stato ripristinato un evaporatore a fascio elettronico con il quale si possono depositare dei precursori composti da un multilayer di ZnS, Sn e Cu che subiscono poi un annealing in presenza di zolfo in un forno di solforizzazione a tubo aperto. La caratterizzazione ottica, elettrica, composizionale e strutturale dei film cresciuti mostra che i campioni ottimizzati non contengono quantità rilevanti di fasi spurie oltre a quella voluta. Per depositare gli altri strati che compongono la cella solare è stato installato un sistema di sputtering da usare per la deposizione di film sottili di molibdeno e altri metalli, di ossidi trasparenti e conduttori e di solfuri metallici. Sono stati, quindi, messi a punto i processi di deposizione per sputtering dei contatti (molibdeno e ZnO drogato) e del buffer layer (inizialmente CdS per Chemical Bath Deposition). In questo modo sono state realizzate diverse celle solari e l'efficienza massima raggiunta è del 2%.

In riferimento alla linea di ricerca sulle celle polimeriche, lavorando sull'ottimizzazione del processo di fabbricazione dei dispositivi è stato possibile migliorarne le prestazioni, ottenendo un valore di efficienza pari a 4,1%, a fronte del 2,9% ottenuto nella precedente annualità.

Inoltre è stata svolta un'attività di sperimentazione sul contatto frontale della cella al fine di semplificare quello attualmente in uso costituito da un doppio strato ITO/PEDOT:PSS. E' stata studiata la possibilità di evitare l'utilizzo dell'ITO, materiale il cui costo incide pesantemente su quello del dispositivo, mediante la messa a punto di film altamente conduttivi di PEDOT:PSS. Utilizzando tale contatto frontale semplificato sono state fabbricate celle solari che hanno raggiunto un'efficienza di conversione massima del 2,5%.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

L'attività punta ad innovare alcune delle attuali tecnologie fotovoltaiche per ottenere dei prodotti che abbiano caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi. L'abbassamento dei costi di fabbricazione dei moduli fotovoltaici a valori inferiori a 1 €/Wp è condizione necessaria affinché questa tecnologia possa affermarsi anche con incentivi molto ridotti e, in prospettiva, senza incentivi. Il fotovoltaico potrà, così, contribuire in misura sostanziale alla quota di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, secondo quanto previsto dal Piano di azione nazionale, elaborato dal Ministero dello Sviluppo Economico, a seguito della direttiva 2009/28/CE, che punta al raggiungimento di 8500 MWp di potenza fotovoltaica installata per il 2020.

L'obiettivo di riduzione dei costi può essere raggiunto nel breve-medio termine attraverso il miglioramento degli attuali moduli a film sottile, mentre per applicazioni speciali, che non richiedano garanzia di funzionamento a lungo termine, si ritiene utile investigare anche soluzioni basate su celle organiche.

Lo sviluppo di celle organiche è la strada da perseguire per arrivare a dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori. La leggerezza e la flessibilità del componente fotovoltaico finale rendono tale tecnologia appetibile per prodotti speciali quali caricabatterie, alimentatori portatili per applicazioni militari, etc.. Di contro è necessario affrontare e superare le difficoltà concernenti la definizione di materiali che possano garantire un'adeguata efficienza di conversione stabile nel tempo. Le attività proposte su tale tema saranno completate durante la prossima annualità con il miglioramento delle efficienze dei dispositivi e con la definizione conclusiva di una roadmap che valuti le potenzialità in termini di prestazioni e di riduzioni dei costi della tecnologia associata. L'obiettivo finale dell'attività di ricerca è la messa a punto di tecnologie avanzate nel campo del fotovoltaico a film sottile con:

- il perfezionamento delle celle solari a film sottile di II generazione a base di silicio e CIS per una applicazione industriale nel breve-medio termine;
- lo sviluppo di nuovi materiali per celle solari di III generazione a base di quantum dot di silicio e polimeri.

Lo sviluppo delle attività nell'arco della durata del presente progetto e per le diverse linee è il seguente:

<u>Fotovoltaico avanzato a base di film sottili di silicio</u>

- Ottimizzazione di celle tandem micromorfe con strati riflettori intermedi e posteriori a base di film di ossido di silicio;
- valutazione di nuove architetture che prevedano materiali alternativi per migliorare dal punto di vista ottico le prestazioni dei dispositivi;
- sviluppo di strati assorbitori alternativi basati su concetti emergenti e innovativi per utilizzo nelle celle tandem;
- sviluppo di moduli prototipali su substrati di vetro con elettrodo frontale a base di ZnO, ed efficienza superiore al 9%.

<u>Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici o ibridi</u>

- Completamento della messa a punto di tecnologie e processi per la realizzazione di celle a base polimerica in atmosfera controllata con efficienze non inferiori al 4%;
- definizione conclusiva di una roadmap per le celle polimeriche che valuti le potenzialità di tale tecnologia sulla base dei risultati conseguiti.

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

- Sviluppo di film sottili di un materiale policristallino Cu_2-II-IV-VI4 con le migliori proprietà optoelettroniche

per la costruzione di celle fotovoltaiche;

- sviluppo di un processo completo per la realizzazione di un dispositivo fotovoltaico a base del materiale policristallino Cu_2-II-IV-VI4 selezionato, con efficienza non inferiore al 5% su piccola area.

Sviluppo e realizzazione di strati assorbitori alternativi e innovativi per celle tandem di silicio

Lo scopo dell'obiettivo è quello di sperimentare materiali assorbitori innovativi che permettano di incrementare le prestazioni delle celle tandem micromorfe, consentendo allo stesso tempo di ridurre i costi di fabbricazione (Figura 73). Infatti, nonostante l'ottima combinazione di gap ottiche dei materiali assorbitori utilizzati nelle celle tandem (silicio amorfo nella cella top e silicio microcristallino nella cella bottom), permangono dei fattori che limitano le prestazioni e/o i costi dei dispositivi. Il silicio amorfo, infatti, presenta il problema del degrado dell'efficienza con l'illuminazione, mentre le proprietà ottiche del silicio microcristallino fanno sì che sia necessario utilizzare spessori di materiale attivo di almeno 2 μm nella cella bottom. E' stato, allora, proposto di sviluppare nuovi materiali che potenzialmente consentano di superare le attuali limitazioni. In particolare sono stati studiati materiali a base di nanoparticelle di silicio in matrici dielettriche da impiegare come strati assorbitori nella cella top, mentre l'utilizzo di film di silicio germanio microcristallino è stato proposto in vista di un loro impiego come strati assorbitori nella cella bottom. Nei prossimi due paragrafi sono riportati i risultati conseguiti.

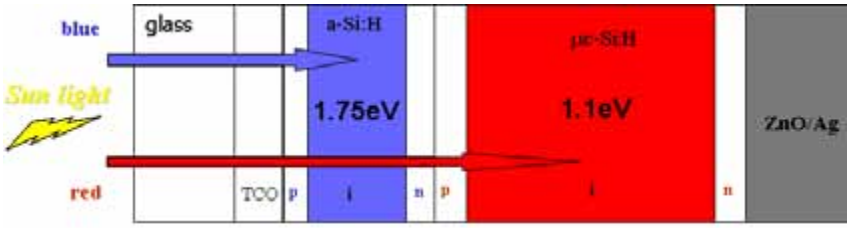


Figura 73. Schema di una cella tandem micromorfa "classica" che utilizza a-Si:H e μc-Si:H come materiali assorbitori rispettivamente nella cella top e bottom

Strati assorbitori innovativi a base di film nanostrutturati di silicio in matrice di nitruro/ossido/carburo di silicio

Il degrado del silicio amorfo con l'illuminazione comporta la necessità di ridurre lo spessore di tale strato utilizzato nella componente top della cella micromorfa con conseguente limitazione della corrente ottenibile dalla cella top. Stiamo quindi indagando la possibilità di sostituire questo materiale con un semiconduttore artificiale a gap simile, realizzato sfruttando le proprietà di confinamento quantistico delle nanostrutture (in particolare la possibilità di modulare la bandgap variando la dimensione delle nanoparticelle). L'idea è quella di fabbricare quantum dot di silicio in una matrice dielettrica sufficientemente ravvicinati di modo che la sovrapposizione delle funzioni d'onda per gli stati permessi formi ampie mini-bande e quindi globalmente venga realizzato un materiale a gap efficace più alta di quella del silicio bulk (1,1 eV). La richiesta sulla elevata densità di dot è tanto più stringente quanto più alta è la barriera offerta dal dielettrico, con la probabilità di tunnel fortemente dipendente dall'altezza della barriera energetica. Questa è tra le motivazioni principali per lo studio di diversi dielettrici, a parte gli aspetti pratici non banali di crescita del materiale.

In questa annualità è stata presa in esame la possibilità di realizzare film nanostrutturati di silicio in diverse matrici a base di silicio (ossido, nitruro e carburo di silicio) attraverso processi di deposizione a bassa temperatura seguiti da eventuali trattamenti termici, laddove necessari. La tecnica di deposizione adottata è stata in ogni caso la PECVD. I film, sia in condizioni as-grown che trattati termicamente, sono stati caratterizzati da un punto di vista ottico elettrico e strutturale.

Nella precedente annualità l'attività si era concentrata sul caso del nitruro di Si, non solo perché più promettente del biossido di Si (ampiamente studiato), data la barriera energetica più bassa imposta al trasporto delle cariche, ma anche in base ad alcuni lavori in letteratura che riportavano la possibilità di realizzare spontaneamente, per PECVD, QD di Si in tale materiale in opportune condizioni, senza dover ricorrere a trattamenti post deposizione ad alta temperatura (in genere necessari per far precipitare in forma di nanoparticelle il silicio in eccesso nei film). Le indagini di Microscopia Elettronica in Trasmissione Filtrata in Energia (EFTEM) su campioni as-grown tuttavia non hanno mostrato presenza di nanoparticelle di Si nei nostri film. I risultati della spettroscopia Raman sembravano comunque compatibili con una parziale separazione di fase, con regioni "silicon-rich" in una matrice meno ricca di silicio. Le attività di caratterizzazione dei materiali sono proseguite in questa annualità per chiarire la struttura del materiale as-grown e per valutare le caratteristiche ottiche del materiale sia prima che dopo i trattamenti termici.

Da analisi XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) il network di legami nel materiale a-SiNx as-grown non è risultato essere una distribuzione statistica di tutti i possibili legami tra Si and N. In particolare, lo spettro

dell'energia di legame del livello di core Si 2p (Figura 74) è riproducibile come convoluzione delle sole componenti Si4+ (atomo di Si legato a 4 atomi di N), corrispondente a Si_3N_4 puro, e Si1+ (atomo di Si legato ad un solo atomo di N). Questo risultato chiarisce che effettivamente la composizione del materiale as-grown non è omogenea. Il silicio in eccesso rispetto alla formula stechiometrica risulta essere agglomerato in regioni ricche di silicio immerse in una matrice di nitruro molto prossimo alla formula stechiometrica. Tali agglomerati, non essendo costituiti da solo Si, non sono comunque visualizzabili con analisi EFTEM. L'inset della Figura 74 mostra invece la morfologia dello stesso campione a seguito di trattamento a 1100 °C per 1 ora in atmosfera di azoto. E' chiara la presenza di nanocristalli di Si, in questo caso con diametro medio di 3,5 nm. La Figura mostra lo Spettro XPS del livello di core Si 2p di un campione di a-SiNx as-grown e sua deconvoluzione con le componenti Si4+ and Si1+ evidenziate con linee tratteggiate (sono riportate anche posizione E e larghezza W dei picchi.

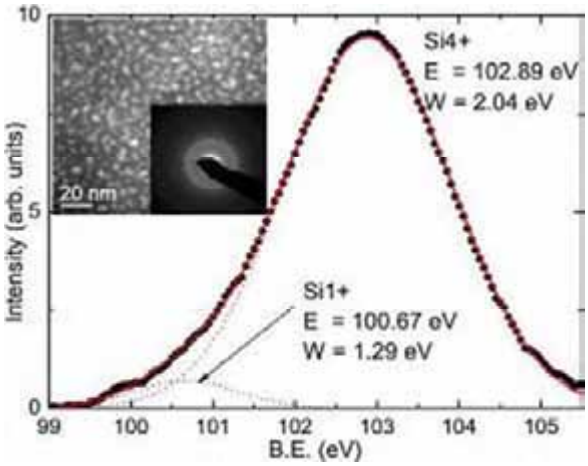


Figura 74. Spettro XPS del livello di core Si 2p di un campione di a-SiNx as-grown

La parziale separazione di fase dei film as-grown ci ha consentito di spiegare le proprietà anomale di fotoluminescenza dei film di a-SiNx, fortemente dipendenti dall'energia di eccitazione. Abbiamo infatti osservato che, eccitando i campioni ad energie più alte della gap di Tauc, il picco di fotoluminescenza si sposta in modo sistematico verso il blu e contemporaneamente si allarga al decrescere del contenuto di silicio nei film (Figura 75a), come atteso per un meccanismo di fotoluminescenza da ricombinazione coda-coda. Eccitando invece i film con energia più bassa della gap, la risposta è piccata ad uno stesso valore di energia (in particolare 1,7 eV) indipendentemente dalla stechiometria del materiale (Figura 75b). Una possibile spiegazione è che, date le fluttuazioni spaziali della gap dovute alla non uniformità del materiale, in questo secondo caso eccitazione ed emissione avvengano selettivamente nei soli domini ricchi in Si.

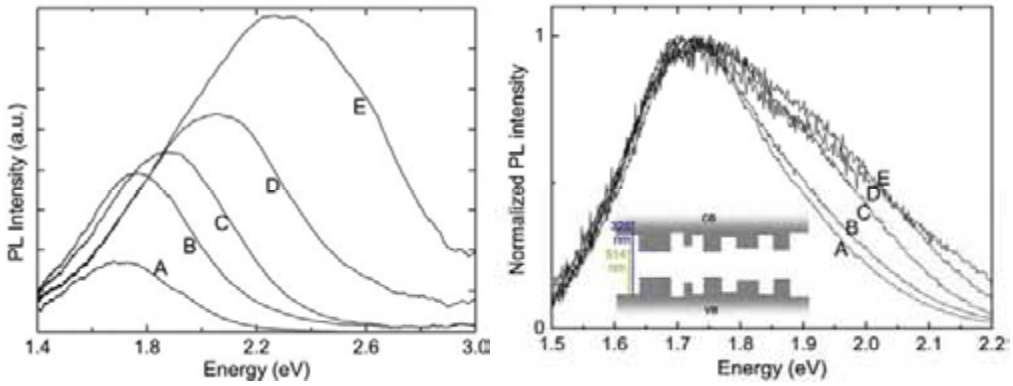


Figura 75. (a) Spettri di fotoluminescenza eccitata a 325 nm per una serie di film di a-SiNx a contenuto di silicio decrescente dal campione A ad E. (b) Spettri normalizzati di fotoluminescenza eccitata a 514 nm per la stessa serie di campioni

Gli effetti dei cambiamenti strutturali indotti da annealing sulle proprietà ottiche di questi materiali compositi meritano un'analisi approfondita sia per un interesse di carattere fondamentale che in prospettiva applicativa. Abbiamo dunque studiato l'evoluzione con l'annealing delle costanti ottiche dei film mediante ellissometria spettroscopica (Figura 76a). Tale tecnica è molto potente in quanto, adottando opportuni modelli, consente di accedere in maniera non distruttiva alle proprietà ottiche non solo del materiale composito nella sua globalità, ma anche delle singole componenti, persino su scala nanometrica. E' stato dunque possibile studiare l'indice di rifrazione complesso delle inclusioni di Si nella matrice di nitruro (sia dei cluster Si-rich che dei nanocristalli di Si). Per i cluster contenuti nei film as-grown si è osservato un comportamento per indice di rifrazione n e coefficiente

di estinzione k analogo a quello del Si amorfo, anche se traslato data la presenza di azoto nei cluster stessi. Per i nanocristalli di Si nei film trattati ad alta temperatura sono stati confermati i risultati riportati in letteratura per materiali a base di ossido di Si. In particolare abbiamo ritrovato lo stesso allargamento della gap, in accordo con le previsioni teoriche di modelli a confinamento quantistico (Figura 76c). Va anche riportato che la forma spettrale di n e k per le inclusioni (Figura 76a), così come della funzione dielettrica (Figura 76b), dipende dalle dimensioni dei nanocristalli, con apparizione di effetti eccitonici per nanocristalli di diametro superiore al raggio dell'eccitone di Bohr (4,9 nm per il Si), come evidente per il campione B-3 in Figura 76b. In particolare, la Figura 76 riporta i risultati da analisi ellissometrica relativi a campioni significativi, as-grown e trattati termicamente, di due stechiometrie depositati con rapporto dei flussi gassosi N_2/SiH_4 di 40 (caso A) e 9 (caso B). I campioni sono chiamati X-1, X-2, and X-3 (con X = A o B) in condizione as-grown e dopo annealing a 800 °C e 1100 °C rispettivamente: (a) Costanti ottiche delle inclusioni a base di Si (clusters ricchi di Si in A-1 e A-2 e nanocristalli di Si (Si-ncs) in A-3 e B-3) confrontati con dati di letteratura per c-Si e a-Si; (b) Funzione dielettrica immaginaria per i nanocristalli di Si nei campioni A-3 e B-3 riferiti a dati di letteraura per c-Si; (c) Bandgap dei nanocristalli di Si in funzione del diametro (la linea continua è la dipendenza teorica da A. Zunger e L. W. Wang in Appl. Surf. Sci. 102 (1996) 350).

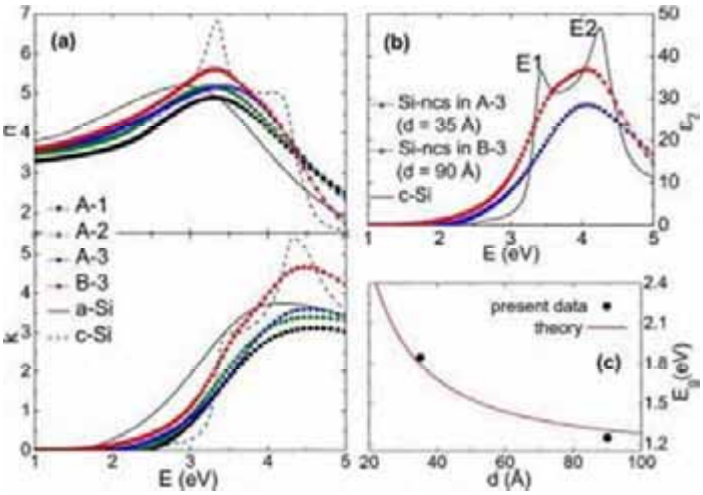


Figura 76. Risultati da analisi ellissometrica

In figura Figura 77 si riporta invece il coefficiente di assorbimento efficace nel range di interesse per il fotovoltaico (fino a 3,5 eV) di alcuni film as-grown e trattati termicamente così come ricavato da ellissometria (linee) e da analisi PDS (photothermal deflection spectroscopy) (simboli pieni). Quest'ultima, consentendo di investigare le regioni di basso assorbimento, ha messo in evidenza ampie code esponenziali sotto 2-2,5 eV, probabilmente dovute alla distribuzione delle dimensioni delle inclusioni a base di Si. E' stato anche ottenuto uno spettro analogo a quello del Si microcristallino (nel caso del film B-3 in Figura 77) e quindi potenzialmente adatto al fotovoltaico.

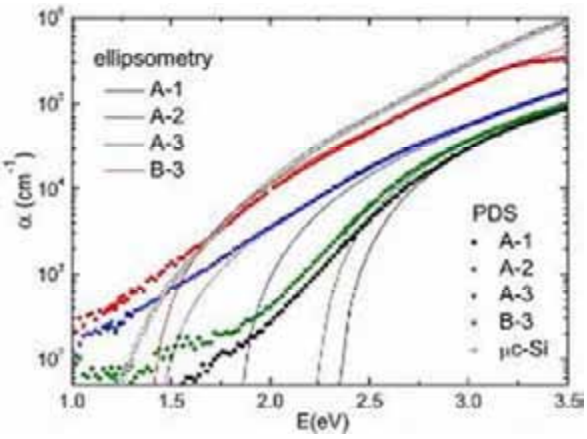


Figura 77. Coefficiente di assorbimento efficace dei film

Accanto allo studio di film di nitruro di silicio, si è testata la possibilità di crescere nanoparticelle di Si in matrice di carburo di silicio, col duplice scopo di investigare la possibilità di ridurre ulteriormente la barriera del materiale dielettrico e di trovare dei regimi di deposizione che consentano la formazione di nanostrutture in-situ. Le condizioni di crescita esplorate al momento hanno però dato luogo a film di SiCx essenzialmente in fase microcristallina, come evidenziato da analisi TEM. Il materiale inoltre è risultato strutturalmente disuniforme,

presentando anche delle regioni di SiCx in fase amorfa con inserzioni di gemme policristalline. Per le regioni amorfe, inoltre, non si è evidenziata separazione di fase con formazione di nanoparticelle di Si.

Risultati molto incoraggianti sono stati invece ottenuti nel caso di matrice di ossido di Si. Questa attività è direttamente legata allo sviluppo di film drogati di ossido di silicio (n-SiOx:H) come strati intermedi e strati drogati alternativi in celle micromorfe, portato avanti nell'obiettivo B. I film realizzati per tale scopo, analizzati via EFTEM, hanno mostrato una struttura a forte separazione di fase con nanocristalli di silicio in una matrice di SiOx che da analisi preliminari di tipo ellissometrico, sembra essere un ossido molto ricco in Si, quindi a gap più bassa del classico biossido di silicio, con conseguente probabile riduzione della barriera energetica tra i dot. Va sottolineato che questo materiale ha il grosso vantaggio di essere realizzato a bassa temperatura (150 °C) senza ulteriori trattamenti termici. Ci proponiamo quindi di approfondire gli studi delle proprietà di questo materiale molto promettente, realizzando in particolare anche film intrinseci da testare poi in celle di tipo p-i-n.

Strati assorbitori alternativi a base di film microcristallini di silicio germanio

Dal punto di vista industriale la necessità di crescere film di µc-Si:H con spessori dell'ordine di qualche micron nella cella bottom pone delle limitazioni alla riduzione dei costi di fabbricazione potenzialmente ottenibile con la tecnologia delle celle tandem micromorfe. Eventuali soluzioni a tale limitazione sono rappresentate dallo sviluppo di processi di deposizione ad alta velocità di crescita (non sempre facilmente scalabili sulla larga area) e/o dall'utilizzo di valide strategie di intrappolamento della radiazione solare (tema trattato nell'obiettivo B). Un'altra possibile soluzione è l'utilizzo di un materiale assorbitore nella cella bottom che abbia un migliore assorbimento della radiazione solare. Aggiungendo atomi di germanio ai film di µc-Si:H, si realizza una lega di silicio germanio microcristallino (µc-$Si_{1-x}Ge_x$-H). Questa lega possiede le potenzialità per ottenere un miglior coefficiente di assorbimento rispetto al silicio microcristallino.

Per poter depositare la lega silicio-germanio è stato necessario eseguire alcune modifiche al sistema di deposizione PECVD/VHF PECVD presente nei laboratori dell'ENEA di Portici che viene utilizzato per crescere i film sottili di silicio. In particolare è stato necessario creare una nuova linea di gas per il germano (GeH_4), gas sorgente necessario alla fabbricazione della lega Si-Ge. Sono stati eseguiti i primi test di deposizione di film di silicio-germanio con tecnica VHF PECVD, partendo dalle condizioni di deposizione messe a punto per i film di silicio microcristallino e aggiungendo alla miscela di gas quantità variabili di GeH_4. Il rapporto GeH_4/SiH_4 è stato variato nell'intervallo 0- 0,3, mantenendo costante il flusso di idrogeno (H_2= 80 Sc^3/min), la pressione (p=500 mtorr) e la temperatura del substrato (T=150 °C). E' stato necessario tenere bassi i flussi di germano utilizzato sia perché esso viene decomposto più efficacemente del silano durante il processo di deposizione, sia perché l'incorporazione di atomi di Ge può indurre la creazione di stati di difetto e stati accettori che possono deteriorare la fase cristallina dei campioni, inficiando le qualità elettroniche del materiale. Lo spettro Raman di alcuni dei campioni realizzati (Figura 78) mostra l'evoluzione strutturale dei film. Il film cresciuto senza germano (GeH_4/SiH_4=0) presenta lo spettro caratteristico del silicio microcristallino con un picco centrato a 520 cm^{-1}, caratteristico del legame Si-Si nella fase cristallina. All'aumentare del rapporto GeH_4/SiH_4 si nota uno shift del picco a 520 cm^{-1} attribuibile alla presenza di atomi di Ge nei domini di silicio cristallino. Compaiono, inoltre, due altri contributi a circa 400 cm^{-1} e 290 cm^{-1}. Il contributo a 400 cm^{-1} è dovuto al legame Si-Ge, mentre il picco a 290 cm^{-1} può essere ascritto al legame Ge-Ge. Questi ultimi due picchi appaiono piuttosto allargati e con una bassa intensità, ciò potrebbe essere sintomatico della presenza di una fase amorfa piuttosto consistente nei film.

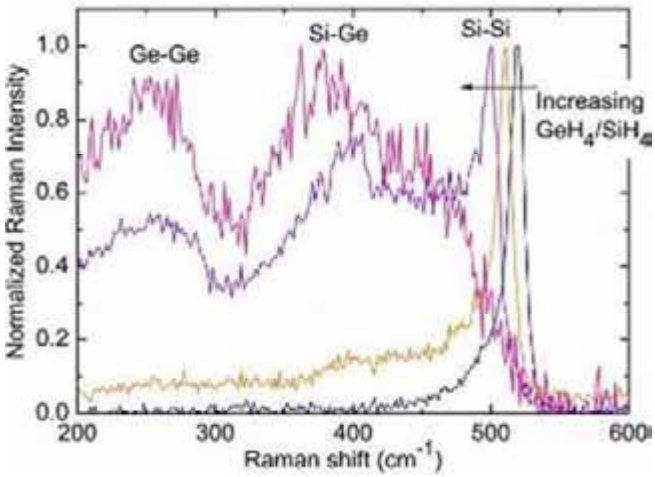


Figura 78. Spettri Raman di alcuni film di silicio-germanio microcristallino

Il coefficiente di assorbimento ottico (α) dei campioni è stato valutato a partire da misure di riflettenza e trasmittanza eseguite utilizzando uno spettrofotometro UV/Vis/Nir. La Figura 79 mostra l'evoluzione di α col rapporto GeH_4/SiH_4. Come ci si aspettava l'aggiunta di atomi di Ge consente di ottenere un aumento del coefficiente di assorbimento e questo rende tali materiali attraenti per l'utilizzo nei dispositivi.

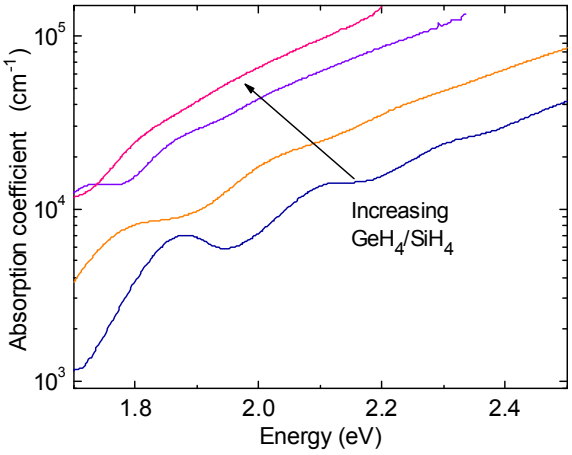


Figura 79. Coefficiente di assorbimento di alcuni film di silicio-germanio microcristallino

Le evidenti potenzialità dal punto di vista delle proprietà ottiche dei film di $\mu c\text{-}Si_{1-x}Ge_x$:H sono state testate nella fabbricazione di singole giunzioni p-i-n microcristalline. Lo spessore dello strato assorbitore intrinseco è stato fissato a 1 µm, mentre gli strati drogati p ed n sono stati cresciuti utilizzando le ricette messe a punto per le celle microcristalline in µc-Si:H. In Figura 80 è mostrato il confronto tra la risposta spettrale (EQE) di una giunzione p-i-n con strato assorbitore in $\mu c\text{-}Si_{1-x}Ge_x$:H e di una giunzione in silicio microcristallino, misurate sia ponendo i dispositivi in condizioni di corto circuito che applicando un voltaggio negativo.

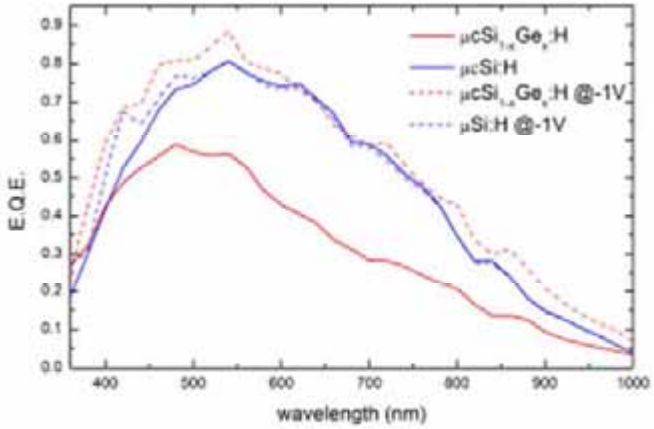


Figura 80. Confronto tra la risposta spettrale misurata su celle p-i-n con strati intrinseci in $\mu c\text{-}Si_{1-x}Ge_x$-H e µc-Si:H

La misura della risposta spettrale consente di avere informazioni sul contributo delle varie parti dello spettro alla raccolta delle cariche fotogenerate. A parità di spessore dello strato intrinseco, nonostante le buone proprietà ottiche valutate sui singoli film di silicio-germanio, la risposta spettrale della cella in $\mu c\text{-}Si_{1-x}Ge_x$:H in condizioni di corto circuito risulta molto peggiore rispetto a quella misurata su una cella convenzionale in silicio microcristallino. Ciò può essere sintomatico di problemi di raccolta nella cella in $\mu c\text{-}Si_{1-x}Ge_x$:H, dovuti alla difettosità del materiale. Questa ipotesi è confermata dalla misura di risposta spettrale ottenuta applicando un voltaggio negativo alle celle (-1V). Un bias elettrico negativo, infatti, consente di aumentare il campo elettrico all'interno della cella riducendo la probabilità di ricombinazione nello strato intrinseco e annullando, se presenti, problemi di raccolta elettrica delle cariche fotogenerate nel dispositivo.

Applicando una tensione negativa alla cella in $\mu c\text{-}Si_{1-x}Ge_x$:H si ottiene un notevole miglioramento della risposta spettrale: i valori di EQE risultano migliori della cella in µc-Si:H per la quale non è stata evidenziata alcuna variazione significativa alla misura quando è stato applicato il bias elettrico. Questo risultato conferma le buone potenzialità dei film di silicio germanio come strati assorbitori per la componente bottom delle celle micromorfe, ma evidenzia la necessità di trovare regimi di deposizione che consentano di ottenere materiali di migliore qualità.

La determinazione della concentrazione degli stati di difetto nei film di silicio-germanio è necessaria al fine di ottenere materiali appropriati per i dispositivi. La tecnica della spettroscopia a deflessione fototermica

(Photothermal Deflection Spectroscopy, PDS) consentirà di determinare correttamente tale concentrazione, in quanto essa permette di valutare in maniera molto sensibile l'assorbimento dei materiali a valori di energia inferiori alla gap. Il sistema PDS, che è stato acquisito e installato molto recentemente, sarà, quindi, un valido strumento nell'ottimizzazione delle proprietà optoelettroniche dei film di silicio-germanio.

Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo a film sottile di silicio

Lo scopo di questa linea di ricerca è stato quello di studiare le possibili strade per la realizzazione di un efficace intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo. Il confinamento ottico della radiazione solare è, infatti, uno degli aspetti di maggiore rilevanza nella ricerca condotta sui dispositivi a film sottile in quanto può determinare un aumento dell'efficienza di conversione senza la necessità di utilizzare spessori elevati per gli strati assorbitori. Ciò avrebbe un grande impatto sul processo di produzione dei moduli, in quanto comporterebbe una riduzione del costo di fabbricazione. Nei paragrafi seguenti vengono riportati i risultati dei diversi approcci analizzati. L'attività si è incentrata sullo sviluppo di:

- strati riflettori intermedi e posteriori per celle tandem;
- sviluppo di elettrodi frontali trasparenti;
- progettazione di riflettori posteriori innovativi costituiti da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici;
- effetti plasmonici su substrati metallo-dielettrici nano strutturati.

Inoltre verranno anche discusse le attività svolta sulla fabbricazione di moduli prototipali.

Sviluppo di strati drogati ossido di silicio come riflettori intermedi e posteriori per celle tandem micromorfe

Nel corso della precedente annualità era stato evidenziato come film sottili di ossido di silicio drogati n (n-Si_xO:H), depositati in opportune condizioni, potevano migliorare le prestazioni dei dispositivi se utilizzati come strati n nelle giunzioni p-i-n di silicio amorfo in alternativa ai film standard di silicio microcristallino di tipo n. In particolare era stato dimostrato che, utilizzando questi strati e completando la giunzione con un semplice film di Ag, era possibile ottenere prestazioni confrontabili o anche migliori di quelle ottenute con il riflettore standard costituito da un doppio strato ZnO/Ag. Questo evidenziava la possibilità di semplificare la struttura della cella con un evidente vantaggio in termini industriali (Figura 81).

Nel corso di questo anno si è cercato di estendere gli importanti risultati raggiunti per le singole giunzioni al caso delle celle tandem micromorfe. Per tale struttura, infatti, il ruolo del contatto posteriore è fondamentale al fine di aumentare la corrente della cella bottom senza dover inspessire troppo lo strato assorbitore di tale cella.

Sono state fabbricate diverse celle tandem micromorfe di area pari a 1 cm^2 su substrati di vetro ricoperti di SnO_2 commerciale (Asahi U-type). In una prima fase della sperimentazione è stato utilizzato un film n di silicio microcristallino standard per la cella top, mentre uno strato di n-SiO_x:H con spessore pari a 35 nm è stato utilizzato nella cella bottom. Tale materiale è depositato in modo da avere le idonee proprietà ottiche ed elettriche definite nella scorsa annualità (σ~ 10^{-4} S/cm, n = 2,5, E_{04} ~ 2,4 eV).

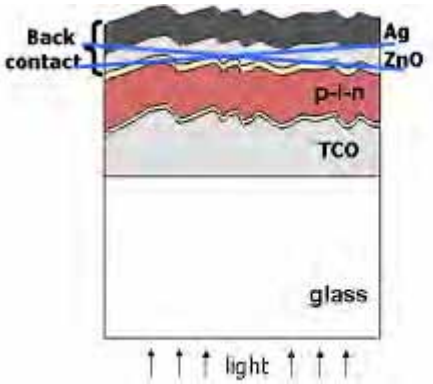


Figura 81. Cella p-i-n con riflettore posteriore semplificato costituito da un semplice strato di Ag

Confrontando le caratteristiche I-V del dispositivo fabbricato utilizzando un film di ossido di silicio nella cella bottom con il suo riferimento (strato n convenzionale per entrambe le giunzioni), sono stati valutati valori simili per il FF (circa 67%) e V_{OC} (circa 1,3 V). Le misure di risposta spettrale, mostrate in figura Figura 82, evidenziano, invece, un comportamento piuttosto differente dei due dispositivi. Tale misura viene eseguita nel caso di celle solari tandem utilizzando opportuni bias ottici, in tal modo è possibile separare il contributo alla corrente delle due

celle componenti. Dalla Figura 82 si nota che, utilizzando un film di ossido di silicio come strato n nella cella bottom, si ottiene in essa un deciso miglioramento della risposta spettrale a lunghezze d'onda maggiori di 650 nm.

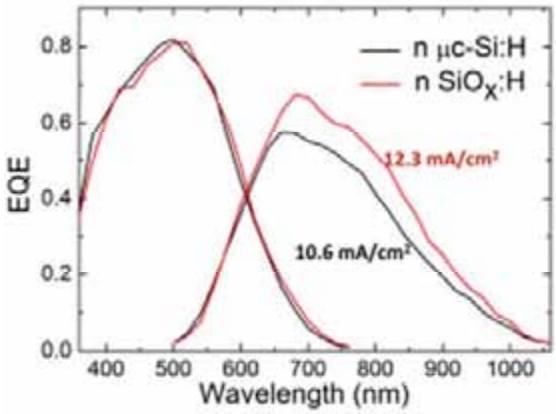


Figura 82. Confronto tra le risposte spettrali di due celle solari micromorfe fabbricate utilizzando nella componente bottom uno strato n in Si_xO:H (linea rossa) o uno strato n convenzionale in μc-Si:H (linea nera)

Di conseguenza la corrente di corto circuito della cella bottom passa dal valore 10,6 mA/cm^2, ottenuto con lo strato n standard, a 12,3 mA/cm^2 misurato nel caso dello strato di n-SiO_x:H. Visto che i dispositivi hanno parametri elettrici simili, si può dedurre che il miglioramento osservato è principalmente dovuto a effetti ottici causati dall'utilizzo di strati n con proprietà differenti. Infatti la gap ottica più elevata del n-Si_xO:H (E_{04} = 2,4 eV) rispetto a quella dei film convenzionali di μc-Si:H (E_{04} = 1,9 eV) può contribuire ad una riduzione delle perdite ottiche nel dispositivo, mentre la discontinuità dell'indice di rifrazione tra lo strato intrinseco (n=3,8) e lo strato n di ossido di silicio (n=2,5) può produrre una riflessione verso lo strato assorbitore della luce all'interfaccia i/n e può ridurre, allo stesso tempo, le perdite per assorbimento plasmonico alla superficie del contatto posteriore metallico realizzato in argento. Si può, dunque, affermare che lo strato alternativo di tipo n realizzato in ossido di silicio consente di semplificare la struttura della cella tandem, in quanto tale film accoppiato ad un semplice film di argento consente di ottenere un buona corrente nella cella bottom.

In una seconda fase si è ipotizzata la possibilità di utilizzare film di n-Si_xO:H anche nella componente top delle celle micromorfe, avendo questo la potenzialità di assolvere al duplice ruolo di strato n e riflettore intermedio per la cella top. Anche in questo caso lo scopo è quello di evitare la necessità di introdurre un riflettore intermedio tra le due celle componenti che comporterebbe uno step aggiuntivo nel processo produttivo. Molti gruppi di ricerca internazionali stanno, infatti, lavorando allo sviluppo di strati riflettori intermedi per celle micromorfe, ma l'analisi dei costi/benefici dell'introduzione di tale strato sulla linea di produzione è un tema molto rilevante e attuale.

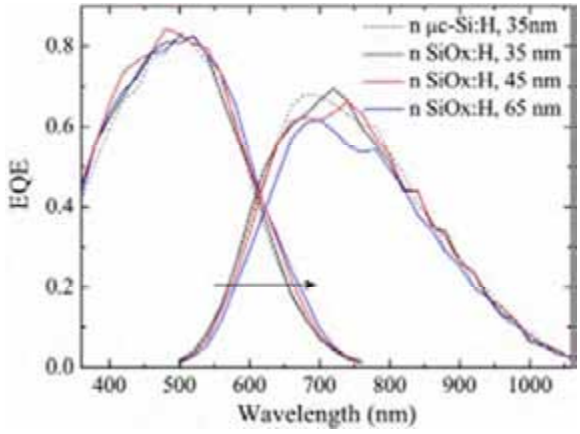


Figura 83. Risposte spettrali misurate su dispositivi tandem che utilizzano strati di n-Si_xO:H sia nella cella top (con diversi spessori) che nella cella bottom

E' stato, quindi, introdotto nella cella top lo strato n di ossido di silicio. In particolare sono stati utilizzati tre diversi spessori (35, 50 e 65 nm), in modo da analizzare gli effetti ottici legati al salto di indice di rifrazione all'interfaccia i/n. La risposta spettrale dei diversi dispositivi è mostrata in Figura 83, in cui è riportata per confronto anche la EQE di un dispositivo realizzato con un n standard di μc-Si:H nella cella top. Utilizzando film di n-Si_xO:H, si ottiene una migliore risposta spettrale nell'intervallo di lunghezza d'onda 550 – 800 nm. Tale miglioramento è appena evidente quando si utilizza uno spessore di n-Si_xO:H pari a 35 nm, ma aumenta all'aumentare dello spessore di tale film. Utilizzando uno strato di n-Si_xO:H di 65 nm si riesce a massimizzare l'effetto di riflessione all'interfaccia i-n

della cella top, ottenendo, così, un incremento della corrente in tale componente di 0,7 mA/cm^2. In questo stesso intervallo si osserva una riduzione della risposta spettrale della cella bottom dovuto alla minore intensità di radiazione che arriva su tale componente. Questi risultati confermano che lo strato di n-Si_xO:H agisce come riflettore per la cella top.

Si può, dunque, affermare che lo strato n di ossido di silicio messo a punto nel corso del progetto ha il duplice scopo di completare la giunzione e agire come riflettore sia per la cella top che per la cella bottom.

Parallelamente al lavoro svolto sui film drogati n, è stata condotta anche un'attività sperimentale sullo strato p con lo scopo di migliorarne le proprietà ottiche ed elettriche. Inizialmente il gas sorgente utilizzato per il drogaggio dei film di silicio era il diborano (B_2H_6). Tale gas è stato sostituito con il trimetilboro (TMB) in quanto quest'ultimo risulta essere più stabile nel tempo e consente di ottenere film più trasparenti grazie alla presenza di atomi di carbonio nella molecola del gas. A conferma dell'ipotesi riportiamo in Figura 84 il confronto tra le risposte spettrali di due celle solari a singola giunzione p-i-n realizzate utilizzando per la deposizione dello strato p il diborano o il TMB. Come si vede la EQE ottenuta utilizzando il TMB è migliore nella regione a basse lunghezze d'onda a causa del più basso coefficiente di assorbimento dello strato p (inserto della figura).

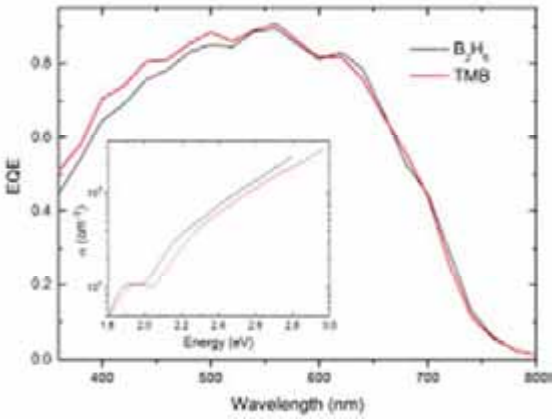


Figura 84. Confronto tra le risposte spettrali misurate su due celle solari a singola giunzione p-i-n fabbricate utilizzando per la deposizione dello strato p diborano (linea nera) o TMB (linea rossa)

Utilizzando le nuove condizioni di deposizione dello strato p e aggiustando gli spessori delle celle componenti in modo da ottenere un buon matching delle correnti, è stato migliorato il fill factor dei dispositivi tandem da 67% a circa 72%.

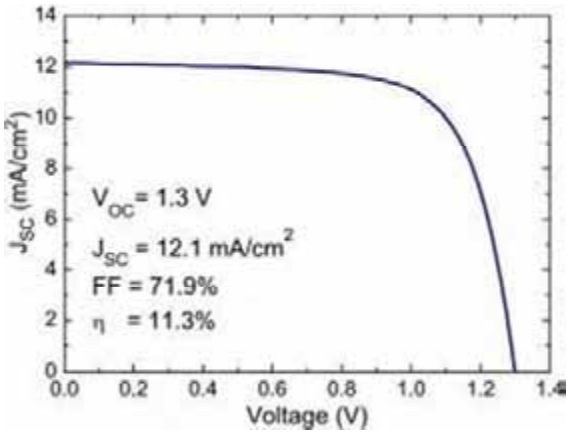


Figura 85. Caratteristica I-V del dispositivo micromorfo semplificato, senzastrati riflettori extra per la cella top e bottom

Il lavoro svolto ha consentito di ottenere una cella tandem micromorfa con un'efficienza pari a 11,3%, senza l'utilizzo di particolari strati riflettori intermedi o posteriori (Figura 85). Lo spessore totale degli strati assorbitori, circa 1,7 µm, è più basso dei valori precedentemente utilizzati (> di 2 µm). Tale risultato conferma che uno dei deliverable ipotizzati per la linea B è stato raggiunto: è stata ottenuta un'efficienza superiore all'11% con spessori assorbitori ridotti che sono garanzia di migliore stabilità del dispositivo.
In conclusione vale la pena di sottolineare ancora una volta l'importanza dei risultati raggiunti grazie allo sviluppo di uno strato drogato n innovativo. E' stato dimostrato che l'utilizzo di film di ossido di silicio di tipo n consente di semplificare il processo di fabbricazione dei dispositivi micromorfi e di utilizzare spessori ridotti per gli strati assorbitori.

Dispositivi micromorfi realizzati su substrato di ZnO

Le condizioni di deposizione definite per la parte attiva del dispositivo discusse nel precedente paragrafo sono state testate utilizzando substrati sviluppati in ENEA messi a punto nella precedente annualità. Tali substrati hanno la potenzialità di ottenere correnti più alte rispetto ai substrati commerciali, grazie ad un migliore confinamento ottico della radiazione solare. Celle solari tandem di tipo micromorfo sono state, quindi, realizzate su substrati con elettrodo frontale di ossido di zinco drogato boro depositato mediante tecnica MOCVD. La morfologia superficiale del film di ZnO:B è stata ottimizzata attraverso trattamenti di etching in plasma gassoso di argon in un apparato per il *Reactive Ion Etching* (RIE), al fine di eliminare asperità superficiali e difetti che potessero compromettere l'interfaccia ZnO/p-aSi:H ed influenzare le proprietà elettriche del dispositivo fotovoltaico. L'ossido di zinco utilizzato aveva una rugosità quadratica media (RMS) di circa 60 nm. Il dispositivo tandem realizzato (area 1 cm^2) è costituito da una cella top di spessore circa 0,5 µm ed una cella bottom di circa 2,5 µm.

In Figura 86a sono confrontate la caratteristica I-V di un dispositivo realizzato su ZnO e di uno realizzato su SnO_2 commerciale (Asahi U-type) la cui rugosità RMS è circa 40 nm. I parametri elettrici (Voc, Jsc, FF ed efficienza) dei due dispositivi sono riportati a confronto. Voc e FF sono abbastanza simili, mentre la corrente di corto circuito (Jsc) per il dispositivo realizzato su ZnO è notevolmente più alta e l'efficienza risultante per questo dispositivo è dell'11.6 %. In Figura 86b sono riportate a confronto anche le curve di efficienza quantica eseguite sulle due celle. Dalla figura si può osservare per la cella realizzata su ZnO un leggero aumento dell'efficienza spettrale della cella top nella regione di lunghezza d'onda tra 450 e 550 nm, mentre un aumento più consistente si ritrova nella cella bottom nella regione tra 750 e 1000 nm. La misura conferma che nel dispositivo realizzato su ZnO c'è un migliore intrappolamento della luce.

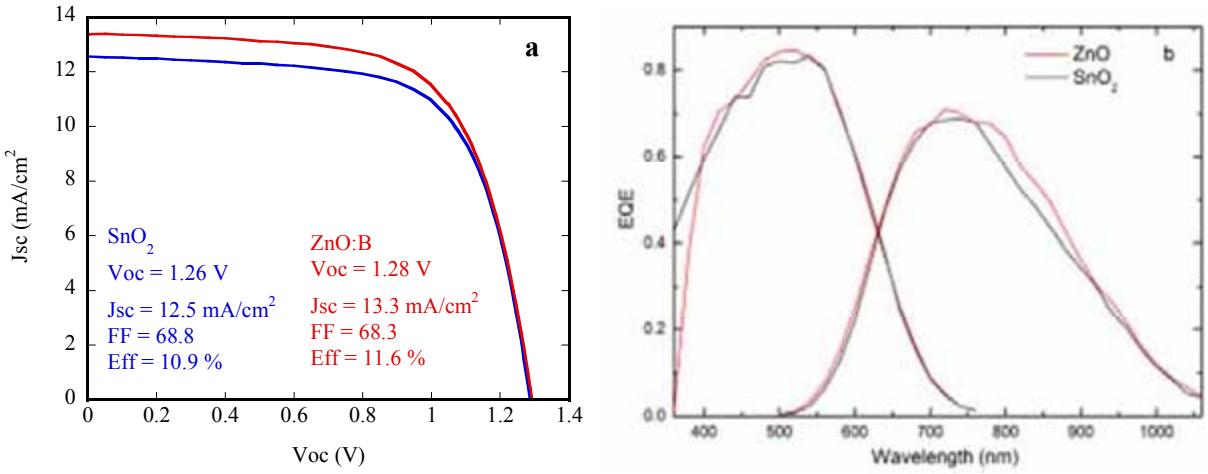


Figura 86. Confronto della caratteristica I-V (a) e della risposta spettrale (b) misurate su celle tandem micromorfe realizzate su substrato con elettrodo frontale di SnO_2 e di ZnO

La sperimentazione condotta evidenzia l'importanza di avere una opportuna struttura del TCO composta di larghi grani il più orientati possibile. Questi grani permettono non solo di ottenere alte mobilità dei portatori, ma anche rugosità superficiali sufficientemente pronunciate da conferire allo ZnO anche un'alta capacità di scattering della luce. Il risultato ottenuto mostra che l'elettrodo frontale a base di ZnO sviluppato nei Laboratori dell'ENEA di Portici è di elevata qualità e che la testurizzazione ottenuta produce un efficiente light-scattering della luce che entra nel dispositivo. Il risultato è in linea con quelli ottenuti da altri laboratori a livello europeo che utilizzano la stessa tecnica di deposizione dello ZnO. Il valore di efficienza (11,6%) misurato sul dispositivo micromorfo depositato su ZnO costituisce un record per il laboratorio di Portici.

Sviluppo di substrati di ZnO a doppia testurizzazione

Le strategie di confinamento ottico intese a migliorare l'elettrodo frontale di TCO consistono in un miglioramento della testurizzazione superficiale in grado di produrre uno scattering della luce abbastanza sostenuto nell'intero spettro d'interesse con conseguente *light trapping* altamente efficiente. Già da qualche anno nella tecnologia delle celle micromorfe si preferisce l'impiego dell'ossido di zinco (ZnO), rispetto ad altri TCO, come elettrodo frontale per la facilità con cui è possibile modificare la sua morfologia superficiale: a) utilizzando appropriate tecniche di deposizione; b) variando le condizioni di deposizione; c) utilizzando processi di post-trattamento. L'obiettivo della presente sperimentazione era quello di sviluppare strati di TCO a base di ZnO, depositati con tecnica MOCVD, caratterizzati da doppia testurizzazione. Tale struttura può agire da diffusore ottico all'interno del dispositivo ed incrementare l'intrappolamento di luce nella regione NIR dello spettro. Sono stati sviluppati film di

ZnO:B a doppio strato mediante MOCVD attraverso le seguenti fasi: 1) deposizione del primo layer di ZnO, 2) attacco in soluzioni diluite di HCl e 3) deposizione del secondo layer di ZnO.

Lo ZnO prodotto per CVD è policristallino, costituito da grani colonnari con superficie a forma piramidale e con rugosità compresa tra 60 e 70 nm. La morfologia superficiale del primo strato, avente uno spessore di ~2 m, è stata sottoposta ad etching chimico. Il processo di etching chimico del cristallo singolo di ZnO è stato ampiamente studiato e compreso laddove risulta tuttora poco chiaro il processo di attacco dello ZnO policristallino, considerata la sua natura più complessa. Studi sperimentali sistematici hanno rivelato che il comportamento dell'etching sui piani cristallini è fortemente dipendente dalla natura chimica della soluzione impiegata.

Una sperimentazione sistematica è stata condotta per determinare i parametri controllanti il processo di etching chimico (effetto della diluizione, del pH delle soluzioni e della durata dell'attacco) con soluzioni di HCl a differenti diluizioni su film sottili di ZnO:B depositati con tecnica MOCVD con l'obiettivo di rendere controllabile la velocità di etching nonché di rendere anisotropico l'attacco sulla struttura cristallina del substrato. Sono state sperimentate soluzioni diluite di acido cloridrico a differenti pH. Si è osservato che per attacchi condotti a pH=4 e pH=2, quindi con soluzioni a forte diluizione, non ci sono variazioni significative della morfologia. In entrambi i casi è possibile notare solo una lieve diminuzione della rugosità di circa 10nm. Utilizzando, invece, soluzioni più concentrate con pH=0,6 è stato possibile ottenere rimozioni significative di materiale, controllando attentamente i tempi di etching. Il tempo di attacco è stato fatto variare tra 5 e 20 secondi, come riportato nella Figura 87 dal quale è possibile notare che esiste una buona riproducibilità tra le varie misure e che la rimozione del materiale è abbastanza lineare con la durata dell'attacco. Film di ZnO con rugosità media di circa 130 nm, ottenuti con etching della durata di 10 sec, si sono rivelati adatti ad indurre la formazione di superstrutture durante la crescita del secondo strato di ZnO. Tra i fattori che maggiormente influenzano la formazione di superstrutture, si possono considerare: 1) i fattori morfologici e strutturali dello strato sottoposto ad etching, come la forma delle punte, la distribuzione dei grani, la rugosità, la dimensione stessa dei grani; 2) i fattori chimici, come ad esempio la polarità del cristallite esposto alla seconda deposizione, la presenza o meno di composti o di adsorbati che fungano da agenti di nucleazione ($Zn(OH)_2$).

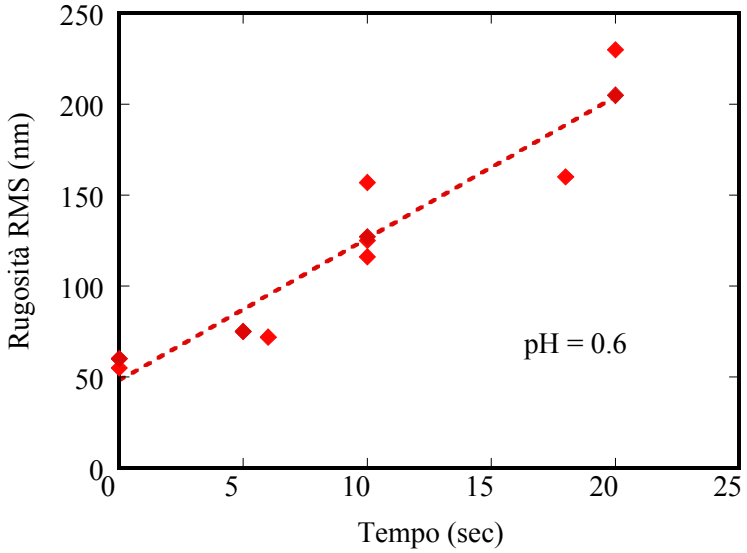


Figura 87. Rugosità delle superfici di ZnO in funzione del tempo di attacco in soluzioni di acido diluite

La rimozione deve essere ad elevata anisotropia in modo da portare alla formazione di strutture verticali ad alto rapporto di aspetto. Durante la deposizione del secondo strato esse agiscono da centro di nucleazione di nuove strutture policristalline che si aprono a ventaglio dando luogo ad agglomerati di grani a forma di "cavolfiore". Di conseguenza, la morfologia superficiale dello ZnO cambia dalla convenzionale tessitura singola di tipo piramidale a quella della doppia tessitura. La rugosità di questa superficie è notevolmente più alta rispetto alla semplice struttura piramidale.

E' stata effettuata la caratterizzazione delle proprietà ottiche ed elettriche dei film a doppio strato e tali proprietà sono state comparate a quelle del singolo strato. Dal punto di vista elettrico non c'è alcuna modifica delle proprietà del materiale (Tabella 31). La trasmittanza è alquanto invariata (~80 %) in un'ampia regione di lunghezza d'onda (400 – 1100 nm).

Tabella 31. Confronto delle proprietà ottiche misurate

Proprietà ottiche ed elettriche	Struttura piramidale	Struttura a doppia testurizzazione
Trasmittanza (%)	80	79
Riflettanza (%)	10	12
Fattore di Haze (%)	21	63
Rugosità (nm)	64	140
Sheet resistance (Ω/sq)	7	7
Resistività (Ω cm)	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$

Il risultato di assoluto rilievo è l'aumento del fattore di Haze nell'intero intervallo spettrale analizzato. Tale fattore consente di valutare la capacità del TCO di diffondere la radiazione ed è definito come il rapporto tra la luce diffusa dal film ad angoli diversi da quello speculare e la luce totale trasmessa. Questo risultato indica che la rugosità ottenuta è efficace a controllare e migliorare le proprietà di scattering ottico dello ZnO non solo nella regione di assorbimento della cella amorfa ma soprattutto nella regione rossa e infrarossa dello spettro solare in cui assorbe la cella microcristallina.
Si può concludere che l'ossido di zinco ottenuto con struttura a doppia testurizzazione ha migliori proprietà di scattering (alto valore di Haze nell'intera regione spettrale di interesse da 400 a 1100nm) rispetto all'ossido con struttura piramidale. Questo innalzamento dell'Haze nell'interospettro dovrebbe produrre un miglioramento dell'effetto di light-trapping con particolare guadagno nella regione IR e, quindi, con effetti positivi soprattutto sulla corrente della cella bottom di μc-Si. Ci si aspetta, quindi, con l'utilizzo di questo materiale come elettrodo frontale, un miglioramento dell'efficienza delle celle tandem micromorfe.

Sviluppo di ossidi trasparenti e conduttivi mediante processo sol-gel

L'attività di ricerca ha riguardato lo studio e l'ottimizzazione delle condizioni di sintesi per l'ottenimento di film omogenei e trasparenti di ZnO puro od opportunamente drogato con B o Al, tramite una innovativa procedura di sintesi Sol-Gel. Infatti, si è riusciti a controllare, in modo efficace ed originale rispetto ai risultati finora esposti in letteratura, l'aspetto chiave della sintesi: il controllo dell'idrolisi del precursore molecolare dello zinco (zinco acetato diidrato) evitando la precipitazione dell'idrossido di zinco. L'utilizzo della tri-etanol-ammina come agente complessante dello ione Zn^{2+} ha consentito sia di eseguire l'intera procedura di sintesi a temperatura ambiente, che di preparare soluzioni di precursore anche molto concentrate, fino a 1,2 M. Ciò ha consentito di ottenere, mediante "dip-coating" in una singola procedura di deposizione, film con uno spessore medio pari a circa 125 nm, un valore di assoluto rilievo nell'ambito della letteratura corrente.

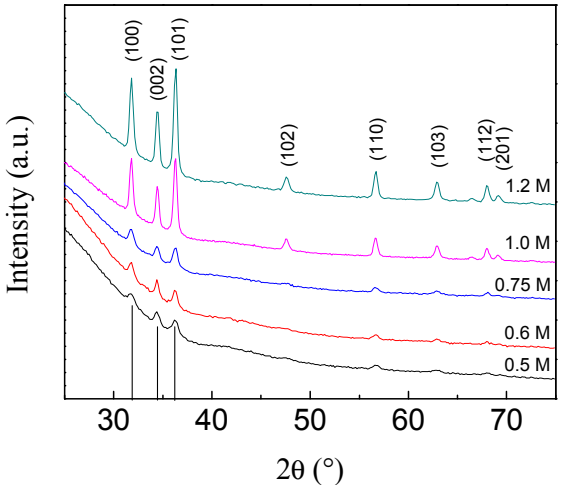


Figura 88. Spettri ai raggi-X dei film, ottenuti da soluzioni del precursore a diverse concentrazioni di Zn^{2+}, sottoposti ad un trattamento termico in aria di 2 ore a 600 °C

In tutti i film ottenuti si osserva la cristallizzazione della fase ZnO, con struttura esagonale tipo wurtzite. L'elaborazione dei dati di Figura 88 ha consentito di evidenziare l'aumento del valor medio della dimensione dei nanocristalli di ZnO all'aumentare della concentrazione della soluzione del precursore, che raggiunge il valore di circa 20 nm per i film ottenuti da soluzioni a concentrazione di Zn^{2+} pari a 1,0 M o superiore. Tutti i film sono

contraddistinti da elevata omogeneità e uniformità e da elevata aderenza al substrato (forza di adesione pari a 150 kg/cm^2). Essi esibiscono una rugosità superficiale pari a circa 6 nm e presentano una elevata trasparenza nell'intero intervallo del visibile, pari ad almeno il 90% come valor medio.

Sono stati esplorati diversi cicli di trattamento termico in differenti atmosfere, aria, azoto o "forming" gas al fine di ottimizzare le condizioni di nucleazione e crescita dei nanocristalli di ZnO. Infatti per i film di ZnO puro questi rappresentano i parametri chiave per il controllo del grado di ordine della struttura cristallina e, quindi, della conducibilità del film. Il valore più basso di resistività ottenuto è stato di 60 Ω cm per un film di ZnO che ha subito un ciclo di trattamento in aria (1/2 ora a 600 °C) seguito da uno in "forming" gas (miscela Ar-H_2 al 2% di H_2) (1/2 h a 250 °C), indicando l'importanza dell'utilizzo di un'atmosfera più riducente e la presenza di un drogaggio intrinseco da vacanze di ossigeno.

Per ottenere valori di resistività più bassi, si è esplorato la possibilità di drogare l'ossido puro sia con alluminio, con percentuali in atomi variabili tra l'1 ed il 4 %, che con boro, con percentuali in atomi variabili tra l'1 ed il 5 %. Il drogaggio con il boro è risultato essere quello più efficiente. I valori di resistività ottenuti per trattamenti in azoto risultano superiori a quelli registrati per trattamenti in "forming gas", a parità di concentrazione dell'atomo drogante. Il valore più basso di resistività finora ottenuto, circa $8 \cdot 10^{-1}$ Ω·cm, si è riscontrato per un film ZnO:B contenete il 5% in atomi di boro. I dati raccolti indicano che anche in presenza di drogaggio, l'utilizzo di un atmosfera riducente sembra essere il parametro chiave per il controllo della resistività. Si è compresa, quindi, la necessità di effettuare trattamenti in un'ambiente più riducente e ad una temperatura più alta di 250 °C.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può concludere che i film di ZnO depositati per sol-gel hanno buona aderenza al substrato, uniformità di spessore, elevatissima trasparenza e, visto il trend positivo dei dati di resistività ed i discreti valori riportati in letteratura per TCO ottenuti con tale tecnica, si può affermare che è necessaria ulteriore sperimentazione per il miglioramento delle proprietà elettriche. Questo risultato renderebbe la tecnica sol-gel adatta a produrre un TCO utilizzabile come elettrodo frontale di celle solari ad un costo sufficientemente basso.

Analisi numerica di cristalli fotonici per il confinamento ottico della radiazione in celle fotovoltaiche a film sottile

Come già detto precedentemente, per ottenere un buon intrappolamento della radiazione solare nello strato assorbitore è necessario realizzare un elettrodo frontale con opportuna morfologia e realizzare un efficace riflettore sulla parte posteriore della cella. In tal modo la luce non assorbita subisce riflessioni multiple nel dispositivo che aumentano la probabilità per essa di essere assorbita nel semiconduttore.

Per quanto riguarda il *back reflector* della cella, la struttura più semplice che si può realizzare consiste nella deposizione di singoli film metallici in alluminio e argento (economici e facili da fabbricare, ma poco funzionali a causa delle perdite intrinseche). Nel tempo sono stati proposti altri approcci che prevedono l'utilizzo di strutture a cristallo fotonico (tipicamente monodimensionali). I cristalli fotonici, ossia strutture caratterizzate da una modulazione periodica dell'indice di rifrazione, rappresentano una delle maggiori rivoluzioni scientifiche nell'ambito della fotonica negli ultimi decenni perché offrono delle possibilità di manipolazione e di controllo della propagazione della luce, sia all'interno che al di fuori del piano di periodicità, non facilmente conseguibili con altre tecniche tradizionali.

In tale contesto scientifico-tecnologico, l'attività di ricerca svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio ha riguardato la progettazione di *back reflectors* innovativi costituiti da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici, finalizzati alla definizione di nuove architetture che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare nelle celle solari a film sottile. Nello specifico, abbiamo cercato di sfruttare la diffrazione introdotta dal cristallo per creare quelle condizioni di *phase-matching* necessarie ad eccitare dei modi fotonici propagativi nel mezzo attivo. In pratica l'obiettivo è quello di convertire la direzione di propagazione della luce incidente, da normale al piano di periodicità del cristallo a parallela allo stesso, evitando i problemi legati alla dimensione ridotta dello spessore della regione attiva. Inoltre, utilizzando nano-strutture metalliche, è possibile aumentare ulteriormente l'assorbimento, favorendo l'eccitazione dei modi plasmonici di superficie all'interfaccia metallo-semicontuttore. E' stata dunque creata un'opportuna piattaforma virtuale per poter studiare numericamente le strutture in oggetto. L'analisi ha previsto anche la discriminazione dei modi fotonici e plasmonici responsabili dei vari picchi di assorbimento, mediante lo studio delle relative mappe di campo.

Si è poi proceduto allo studio dell'influenza dei parametri fisici e geometrici del *back reflector* e dei mezzi circostanti sulle prestazioni del riflettore; sono stati analizzati, tenendo conto anche dei vincoli imposti dalla fabbricazione, gli effetti prodotti da uno spessore di ossido conduttivo (ZnO) posto tra la il *back reflector* e la regione attiva a semiconduttore che determina via via la riduzione dell'influenza dei fenomeni plasmonici sull'assorbimento totale. Infine abbiamo valutato, mediante opportuni test preliminari, la possibilità di realizzare i *back reflector* ibridi metallo-dielettrici con strutture aperiodiche cercando di sfruttare la ricchezza intrinseca del

loro spettro di diffrazione (che facilita il raggiungimento della condizione *di phase-matching* di cui sopra) per migliorare ulteriormente l'assorbimento. Gli studi preliminari hanno riguardato in particolare la definizione di un metodo efficace di analisi numerica per geometrie aperiodiche dato che la mancanza di periodicità spaziale impedisce l'applicazione diretta dei consolidati strumenti e concetti teorici (come il teorema di Bloch) utilizzati nel caso periodico. I risultati ottenuti hanno dimostrato che le fenomenologie di base possono ancora essere comprese studiando una parte sufficientemente grande del reticolo aperiodico, artificialmente terminato con adeguate condizioni al contorno periodiche (approssimazione della supercella). Inoltre, in collaborazione con l'Università della Calabria, sono state realizzate simulazioni numeriche tridimensionali basate sul metodo FDTD (Finite Difference Time Domain) per analizzare l'incremento dell'efficienza in presenza di nanostrutture in silicio composte da nanopillar o da nanohole.

I risultati delle simulazioni hanno mostrato che con strutture di tipo nanopillar è possibile prevedere migliori prestazioni dal punto di vista ottico. Partendo dai risultati ottenuti sono state progettate delle strutture di *back reflector* da testare sperimentalmente in futuro nei dispositivi.

Dispositivi fotovoltaici a film sottile potenziati da plasmoni su substrati metallo-dielettrici nanostrutturati.

Il lavoro svolto è stato orientato ad esplorare le potenzialità e la compatibilità di substrati nanostrutturati metallo-dielettrici realizzati dal dipartimento di fisica dell'Università di Genova come supporti per prototipi di dispositivi fotovoltaici a film sottile realizzati presso i laboratori dell'ENEA di Portici.

L'attività si incentra sui recenti sviluppi della tecnica di sintesi fisica di array di nanofili metallici supportati su substrati dielettrici recentemente messa a punto a Genova. La sintesi auto-organizzata di nanostrutture periodiche su area del cm^2 viene ottenuta tramite irraggiamento ionico defocheggiato (IBS-Ion Beam Sputtering) di un substrato dielettrico o di un film di metallo nobile supportato. Il lavoro svolto a Genova ha permesso di dimostrare che le nanostrutture metalliche cresciute tramite IBS presentano effetti plasmonici nella regione visibile dello spettro che, qualora ottimizzati, hanno la potenzialità di amplificare la resa di conversione fotovoltaica. L'attività di ricerca condotta è stata inoltre volta alla messa a punto di processi di nanostrutturazione del substrato di vetro basati su processi auto-organizzati ad alta resa, che consentissero di implementare "photon harvesting" in dispositivi fotovoltaici a film sottile. Schematicamente i due filoni principali possono essere così riassunti:

Trattamenti bio-mimetici antiriflesso. Sono stati studiati approcci per ridurre la perdita per riflessione all'interfaccia aria-vetro. Per ottenere questo risultato abbiamo studiato la possibilità di replicare il comportamento anti-riflesso di strutture bio-mimetiche (effetto moth-eye). Lo scopo quindi è quello di realizzare mediante processi auto-organizzati una strutturazione superficiale che si comporti come un metamateriale ottico. Nell'approccio esplorato a Genova, la nano strutturazione della superficie di vetro su cui viene successivamente realizzata la cella a film sottile viene ottenuta facendo ricorso all'azione erosiva di un fascio ionico sfruttando una maschera metallica auto-organizzata. I risultati più promettenti sono stati conseguiti in presenza di strutturazioni del vetro con alto rapporto di aspetto, ottenute grazie ad un originale processo di co-deposizione che amplifica l'azione della maschera metallica.

Plasmon enhanced Photon Harvesting. Un altro aspetto che è stato approfondito riguarda la possibilità di sfruttare le proprietà plasmoniche di nanoparticelle metalliche di taglia e forma controllata, in modo da aumentare l'intrappolamento della radiazione entro lo strato attivo del materiale semiconduttore.

Per le applicazioni plasmoniche in campo fotovoltaico è interessante sfruttare l'elevata sezione d'urto di scattering delle nanoparticelle metalliche (quando queste hanno dimensioni intorno al centinaio di nanometri) poiché in queste condizioni le nanoparticelle vengono a comportarsi come delle nano-antenne in grado di riemettere il fotone assorbito entro un ampio lobo dipolare. In queste condizioni il cammino ottico efficace dei fotoni riemessi entro il materiale attivo della cella risulta più lungo, con conseguente aumento della probabilità di assorbimento. Gli esperimenti realizzati sulle prime celle PV a film sottile fornite da ENEA indicano la potenzialità dell'approccio in regioni spettrali limitate, risonanti con il plasmone. Sono necessarie ulteriori significative ottimizzazioni per conseguire un miglioramento effettivo su una porzione rilevante dello spettro. In modo parallelo abbiamo effettuato esperimenti che hanno consentito di dimostrare che le risonanze plasmoniche dei nanofili provocano un forte aumento del campo elettromagnetico in una regione di qualche decina di nanometri rispetto alla superficie delle nanoparticelle metalliche. Gli esperimenti sono stati fatti ricorrendo a spettroscopia SERS utilizzando come sonde del campo locale molecole organiche. Per le applicazioni nel campo PV, l'effetto di amplificazione plasmonica del campo locale potrà essere sfruttato per ottenere un significativo incremento dell'assorbimento ottico nelle vicinanze delle nano-particelle.

Realizzazione di moduli prototipali

Il laser patterning è il processo che viene utilizzato nella tecnologia dei film sottili per integrare monoliticamente celle in pannelli a larga area (> 1 m^2). Attraverso un'incisione selettiva dei vari strati che compongono il dispositivo,

si separano sul substrato delle singole celle che vengono interconnesse tra di loro in serie (Figura 89). In tal modo si riducono le perdite ohmiche tipiche dei dispositivi su larga area. Per l'incisione vengono utilizzate due principali sorgenti laser oscillanti a lunghezze d'onda differenti (infrarosso e visibile) in modo da ottimizzare l'assorbimento della radiazione per i diversi materiali.

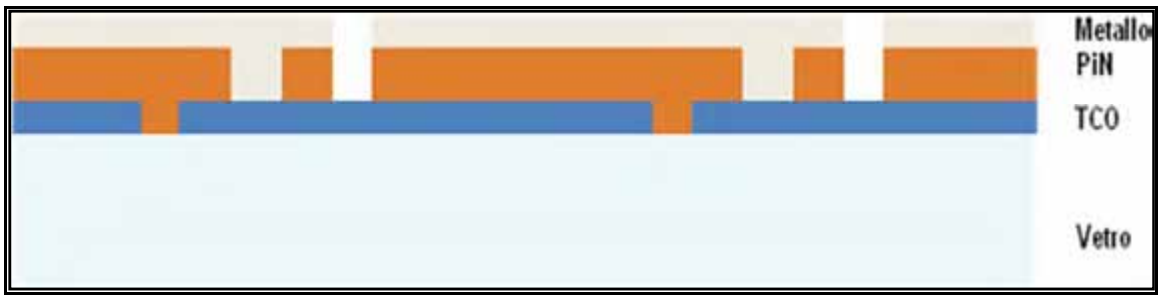


Figura 89. Connessione in serie delle celle attraverso la tecnica del laser scribing

Il banco per il laser scribing presente nei laboratori dell'Enea di Portici è stato oggetto nella scorsa annualità di un upgrade tecnologico che ha consentito di migliorarne alcune caratteristiche prestazionali e predisporlo per una gestione del controllo molto più veloce, accurata, precisa e ripetibile. E' stata sostituita la sorgente laser nel visibile con un Diode Pumped Solid State Q-Switched Laser, con mezzo attivo Nd:YAG ed emissione a 532 nm. Le prestazioni del nuovo laser in termini di qualità e larghezza dell'impulso, di frequenza, di stabilità dell'energia negli impulsi, hanno permesso di ottenere un processo potenzialmente molto veloce, ma allo stesso tempo accurato, preciso e ripetibile. E' stato inoltre sostituito il sistema di movimentazione del substrato (slitte motorizzate ed encoder), rendendolo adeguato a sfruttare le maggiori prestazioni della sorgente laser. La sostituzione del sistema driver e controllo con uno molto versatile e flessibile ha, poi, consentito l'automatizzazione dei tipici processi e l'implementazione di lavorazioni particolari. Allo scopo è stata sviluppata una prima versione di software ad-hoc. Esso è costituito da un modulo cad-compilazione per la definizione di geometrie complesse con la compilazione nel formato interno al sistema di controllo e da un modulo di gestione dei processi coinvolti nella fase di scrittura laser.

Nella prima fase di sperimentazione si è effettuato un allineamento delle ottiche di focheggiamento e si sono ricavate le curve corrente /energia al campione (incluse quindi le perdite ottiche). E' stata, quindi, eseguita un'ottimizzazione dei parametri delle tre incisioni necessarie nel processo di realizzazione del modulo finale (energia, frequenza di ripetizione e posizione del fuoco del fascio laser, velocità degli stage del porta-campioni). Per l'ottimizzazione dei tagli si è utilizzata la microscopia ottica e la profilometria, in modo da valutare la qualità dell'incisione laser (morfologia, aree danneggiate, presenza di materiale di risulta che può essere causa di shunt), ma anche l'uniformità di tali caratteristiche sulle lunghezze richieste.

Le prove di taglio sono state effettuate su dispositivi costituiti sia da singole giunzioni p-i-n che da giunzioni tandem micromorfe. In questa fase si è valutata la qualità e la selettività del singolo taglio, eseguito su una struttura a multistrato (TCO, silicio, metallo), cercando al contempo di minimizzare l'area persa (la regione dei tagli non è utile al processo fotovoltaico) e di evitare che la morfologia e gli effetti di danneggiamento del singolo taglio incidessero sugli altri.

Sono stati realizzati diversi moduli prototipali di area 10 x 10 cm^2, con lo scopo di ottimizzare i parametri di incisione e evidenziare le criticità del processo. Le curve caratteristiche I-V dei minimoduli e delle singole celle componenti, insieme alla valutazione della qualità dei tagli, consentono di avere un riscontro per il processo del laser scribing. I parametri elettrici ricavati dalle curve I-V evidenziano valori delle resistenze di shunt più basse di quelle che ci si aspettava, in considerazione dei valori misurati sulle celle di piccola area. Un'analisi approfondita del sistema unita ad un modello circuitale degli eventuali percorsi di shunt hanno permesso di individuare due principali fonti: la presenza di lamelle e deposito fuso di metallo sulle pareti del taglio e tra i bordi delle stesse incisioni e effetti di shunt prodotti dalla cattiva rimozione di metallo nei punti di congiunzione tra le singole celle e la zona di isolamento trasversale necessaria ad annullare gli effetti di bordo. Mentre la prima causa è stata eliminata attraverso un'ottimizzazione dei parametri di incisione, non è risultato immediato agire sulla cattiva rimozione del metallo. Si è quindi modificato il pattern di fabbricazione dei moduli e a breve sarà testata l'efficacia delle soluzioni ideate.

In Figura 90 è riportata la caratteristica I-V del modulo micromorfo 10x10 cm^2, realizzato a valle dei citati processi di ottimizzazione, sul quale è stata valutata un'efficienza pari a 8,4%. Tale risultato migliora quello ottenuto lo scorso anno (7,7%), ma risulta essere inferiore rispetto all'obiettivo previsto per l'anno in corso (9%). Alcuni accorgimenti, già in parte ipotizzati nel corso delle attività svolte, saranno implementati a breve sul sistema, con probabili effetti benefici sulle caratteristiche del modulo finale. Si prevede, inoltre, di migliorare e semplificare la

procedura di messa in piano dei substrati e di implementare il banco per eseguire una correzione automatica della profondità di fuoco del fascio laser. Sarà quindi implementato il software di gestione e controllo per ridurre al minimo le procedure manuali.

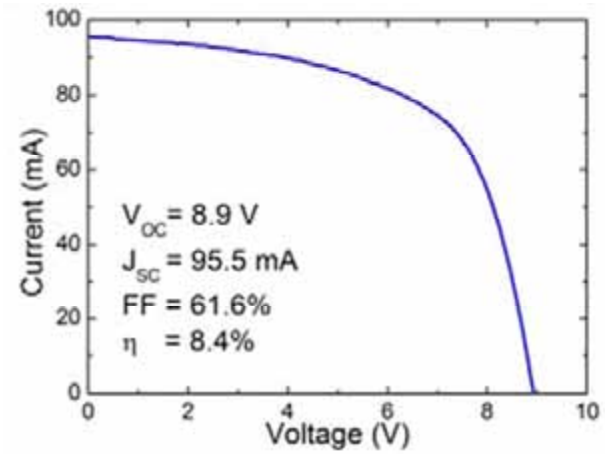


Figura 90. Caratteristica IV modulo micromorfo 10 x 10 cm^2

In conclusione si può affermare che, a parte l'attività sulla realizzazione dei minimoduli dove si è registrato un modesto gap tra l'obiettivo previsto (9%) e quello ottenuto (8,4%), tutti gli altri deliverable della linea di ricerca B sono stati pienamente raggiunti. Si vuole sottolineare che nel corso di questa annualità è stata realizzata una cella tandem micromorfa su ZnO con un'efficienza di 11,6%, valore che costituisce un record per il laboratorio di Portici.

Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici

L'attività sulle celle fotovoltaiche polimeriche aveva lo scopo di migliorare le efficienze di conversione raggiunte in precedenza, soprattutto sfruttando a pieno le potenzialità del laboratorio allestito nel corso dell'annualità precedente e che permette di svolgere tutta la catena di fabbricazione in un'atmosfera con contenuto di ossigeno ed umidità inferiore ad 1 ppm. Inoltre in collaborazione con partner universitari sono stati sintetizzati nuovi materiali potenzialmente idonei a migliorare le prestazioni di tali dispositivi. In particolare l'attenzione è stata rivolta a polimeri semiconduttori e/o fullereni non disponibili in commercio o di nuova progettazione.

Sono state realizzate celle solari, utilizzando materiali già disponibili in commercio e già usati con successo da altri gruppi di ricerca. Sono state affrontate le varie problematiche connesse con la deposizione dei materiali polimerici, il controllo della loro morfologia, la realizzazione dei contatti e la caratterizzazione dei dispositivi.

Ottimizzando gli step di deposizione e conducendo l'intero processo nel nuovo sistema di glove box con evaporatore termico integrato operante in atmosfera inerte con contenuto di H_2O e O_2 minori ad 1 ppm, acquisito ed installato nell'annualità precedente, è stato possibile realizzare una cella fotovoltaica polimerica con efficienza di conversione superiore al 4%. Il prototipo è stato ottenuto partendo da un blend di poly(3-hexylthiophene) (P3HT) e 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(6,6)C61 (PCBM), entrambi commerciali. La struttura del dispositivo è VETRO / ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / Ca / Al con un'area attiva di 0,34 cm^2. La cella presenta picchi di efficienza quantica esterna (a 500 nm) del 75% ed un'efficienza di conversione fotovoltaica del 4,1% (Jsc = 11,8 mA/cm^2, Voc=0,614 V, FF=57%).

E' stata avviata, inoltre, un'ulteriore attività di ricerca volta all'ottenimento di celle fotovoltaiche dove l'anodo costituito dall'ossido misto di indio e stagno è stato sostituito con il poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) opportunamente modificato grazie all'aggiunta del dimetilsolfossido. Sarebbe, infatti, auspicabile sviluppare materiali alternativi all'ITO, in quanto il costo di quest'ultimo incide pesantemente su quello del dispositivo. Partendo dal mescolamento del PEDOT:PSS commerciale con dimetilsolfssido (HC-PEDOT:PSS) si ottengono film trasparenti con valori di trasmittanza di ≈ 90% e con una conduttività di 700 S/cm. Grazie a queste caratteristiche (elevata trasparenza e conducibilità) è stato possibile utilizzare tale materiale come anodo per le celle solari polimeriche.

L'anodo, realizzato per spincoating, è stato asciugato alla temperature di 100 °C per 30 minuti in atmosfera controllata, ottenendo così un film dello spessore di 150 nm. Sono stati ottenuti dispositivi contenenti ancora come strato attivo il blend costituito da P3HT:PCBM per verificare e testare la reale possibilità di sostituzione dell'ITO con il HC-PEDOT:PSS. Da prove preliminari sono stati ottenuti dei dispositivi fotovoltaici che possono essere così schematizzati: VETRO / HC-PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / Ca /Al.

Le celle presentano un'efficienza di conversione fotovoltaica del 2,5 % (FF=44%, J_{sc} = 9,7 mA/cm^2, V_{oc}=575 mV).

L'attività di ricerca ha riguardato la preparazione dei copolimeri PolyF e PolyHPolyS. Per ottenere questi copolimeri è stato utilizzato l'accoppiamento di Stille tra un comonomero stannilato e un comonomero bromurato in presenza di un catalizzatore al palladio. Tra tutte queste molecole, quelle che hanno rappresentato la sfida sintetica maggiore sono state quelle contenenti le unità tienotiofenica, che hanno dato problemi relativamente alla resa di alcuni passaggi e di stabilità. I prodotti ottenuti sono stati caratterizzati tramite ^{1}H e ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance (NMR) mono e bidimensionale e, nel caso dei polimeri, Gel Permeation Chromatography (GPC), Spettroscopia Infrarossa (IR), Spettroscopia UV-Visibile.

Sono stati sintetizzati 2 derivati del C_{60}, comunemente denominati PCBM. Questi materiali sono stati preparati per cercare di influenzare il livello del LUMO dell'accettore di elettroni PCBM introducendo nella sua struttura dei gruppi elettrondonatori (metossili). Infatti è ben noto che un innalzamento del LUMO entro certi limiti può portare ad un incremento della tensione di circuito aperto delle corrispondenti celle solari polimeriche. Inoltre si stanno mettendo a punto sintesi che permettono di ottenere molecole bis-PCBM con un minor numero di isomeri per ridurre il disordine molecolare ed evitare trappole elettroniche nei blend polimero-fullerene. Per questo motivo sono stati sintetizzati addotti "tethered". Sono stati anche preparati materiali basati su nanotubi a parete multipla e nanohorns funzionalizati mediante cicloaddizione 1,3 dipolare per renderli piu facilmente utilizzabili e solubili.

E' stata condotta una ricerca su un nuovo film nanocomposito basato sulla combinazione di quantum dot (QD) di tipo InP/ZnS con nanotubi di carbonio a parete multipla (MWCNT) con lo scopo di migliorare le prestazioni delle celle polimeriche di tipo P3HT/PCBM. L'intenzione è quella di usare questo tipo di materiale per estendere lo spettro d'assorbimento della cella polimerica, aumentando l'assorbimento nella parte rossa dello spettro solare. Aggiungendo i nanotubi di carbonio insieme con i quantum dot si cerca di favorire il trasporto di carica nei film senza dover aumentare troppo la concentrazione dei quantum dot. Per iniziare lo sviluppo di questo nuovo tipo di nanocomposito si è deciso di inglobare i QD e MWCNT in una matrice polimerica isolante, costituita dal polimero PMMA. Tramite spin-coating, i cui parametri di deposizione sono stati ottimizzati nella ricerca, sono stati depositati diversi film su due tipi di substrati, vetro e silicio cristallino. Sono stati realizzati campioni con solo PMMA, come riferimento, con 3 differenti concentrazioni di nanotubi a parete multipla ed infine campioni con QD e MWCNT. E' stata, quindi, variata la concentrazione dei nanotubi di carbonio, mentre la concentrazione dei QD di InP/ZnS è stata mantenuta costante ad un valore di 5% in peso.

Caratterizzando la morfologia dei film con la microscopia SEM, si osserva che con l'aumento della concentrazione dei nanotubi, aumenta anche la loro disomogeneità nella distribuzione. Nei campioni con alta concentrazione di CNT sono stati osservati, solo nel caso della copresenza di quantum dot, dei nanotubi arrotolati in forma sferica. Anche le immagini di fotoluminescenza confermano la relativa disomogeneità della distribuzione delle nanoparticelle nei film sottili. Per completare il quadro delle proprietà ottiche, sono stati misurati gli spettri di trasmittanza ottica nell'intervallo 400 – 800 nm. I film con bassa concentrazione di CNT mostrano un aumento della trasmittanza ottica a causa di un effetto antiriflesso dello strato, mentre per film ad alta concentrazione di nanotubi la trasmittanza decresce di ca. 30%. Nel caso dei nanocompositi realizzati con QD e CNT, la decrescita della transmittanza è meno accentuata. Ciò conferma che la presenza dei QD modifica la distribuzione dei CNT in modo sostanziale. Sono state inoltre preparate delle strutture per misurare l'influenza della presenza dei nanotubi di carbonio sulla conducibilità laterale e verticale dei film. In entrambi i casi è stato evidenziato un incremento della conducibilità con l'aumento della concentrazione dei nanotubi.

In conclusione dobbiamo rimarcare che gli obiettivi previsti sono stati pienamente raggiunti. Ottimizzando il processo di fabbricazione delle celle polimeriche, è stata ottenuta un'efficienza del 4,1%. Inoltre sono stati sintetizzati nuovi materiali potenzialmente idonei ad essere testati nei dispositivi.

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

L'obiettivo generale della linea di ricerca è lo sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI. Tuttavia, vista la complessità delle problematiche incontrate nel lavoro, anche quest'anno l'attività è stata incentrata solo sul materiale più promettente e cioè il Cu_2ZnSnS_4 (CZTS), rimandando le esplorazioni di altri candidati simili ad una fase successiva.

Nel corso della prima annualità erano state definite le specifiche tecniche per un apparato di deposizione per sputtering ed era stata svolta la relativa gara per il suo acquisto. E' stato scelto un sistema con tre sorgenti magnetron sputtering per target da 4 pollici montate in configurazione confocale e cioè puntate tutte e tre verso un portacampioni rotante capace di ospitare substrati da 10 cm × 10 cm^2. Con questa configurazione è possibile depositare i metalli e gli ossidi trasparenti e conduttori necessari per completare il processo di fabbricazione delle celle fotovoltaiche.

Il sistema di sputtering della Oerlikon Leybold Vacuum GMBH è stato installato nei laboratori ENEA Casaccia alla fine dello scorso anno. Esso ha mostrato buone caratteristiche per quanto riguarda l'omogeneità della deposizione

e il controllo della temperatura del substrato e si può ritenere perfettamente adatto alla deposizione di strati metallici. Si sono presentati invece molti problemi quando si è cercato di utilizzarlo per la deposizione di ossidi: due target di ZnO e ITO si sono spaccati ed uno di TiO_2 si è scollato dalla sua *back plate* di rame, segno evidente di un riscaldamento eccessivo dei target anche a potenze non particolarmente alte. Le ragioni di questi problemi sono ancora poco chiare e sono in corso gli esperimenti necessari per individuare gli accorgimenti tecnici e le condizioni di deposizione migliori per evitare ulteriori inconvenienti. Purtroppo la perdita di questi target ci ha costretto a completare le celle fotovoltaiche depositando lo ZnO all'Università di Trento. Questo ha notevolmente diminuito la velocità di produzione dei dispositivi fotovoltaici completi e probabilmente anche la loro efficienza ne ha risentito in maniera negativa visto che nel lungo intervallo tra la deposizione del CdS e quella dello ZnO (dovuto alla spedizione dei campioni) si verifica sicuramente una certa contaminazione/ossidazione dell'interfaccia.

A valle di una analisi delle varie tecniche di crescita del CZTS, si è anche deciso di effettuare il previsto upgrade di questo sistema in maniera da poter depositare dei precursori per co-sputtering. Infatti il processo attuale (che parte da precursori composti da più layer diversi sovrapposti) presenta sia problemi di adesione che di segregazione di fasi spurie di ZnS e, a volte, di Cu_xS. Tali problemi potrebbero essere molto ridotti depositando contemporaneamente per sputtering i tre materiali (p.es. ZnS, Cu e SnS) del precursore. Purtroppo i problemi tecnici dell'impianto di sputtering ed i ritardi della Oerlikon nel rispondere alle nostre richieste di una offerta economica hanno impedito che si potessero acquisire le relative attrezzature nell'anno in corso.

Nonostante i problemi tecnici incontrati con lo sputtering, nel corso dell'anno si è riusciti a mettere a punto il processo completo per la realizzazione delle celle fotovoltaiche in CZTS. Lo strato di molibdeno (Mo) utilizzato per il contatto sul retro è stato depositato per RF-magnetron sputtering su un substrato di vetro soda lime. Il processo di deposizione è stato ottimizzato per ottenere una buona adesione, sia tra Mo e substrato che tra CZTS e Mo, e per avere, allo stesso tempo, un layer metallico con una resistenza di strato sufficientemente bassa in modo da garantire una buona qualità del contatto elettrico. E' noto che i film di Mo depositati a bassa pressione presentano una bassa resistività, che si avvicina al valore di bulk a temperatura ambiente ($\rho = 5{,}4 \times 10^{-6}\ \Omega$ cm), mentre per alte pressioni di deposizione si ottengono film con una resistività maggiore, anche fino a 100 volte quella di bulk. Ciò è dovuto al fatto che a bassa pressione si ottengono film con stress compressivo e molto compatti, mentre a pressioni più alte i film presentano uno stress tensile con una elevata porosità, responsabile della bassa conducibilità elettrica, ma anche in grado di dare una migliore adesione.

Il processo di crescita utilizza tre step di deposizione: un primo step di circa 20 minuti ad alta pressione ($P \sim 2 \times 10^{-2}$ mbar), per garantire una buona adesione tra vetro e molibdeno, uno step intermedio di 35 minuti a pressione più bassa ($P \sim 2 \times 10^{-3}$ mbar), per ottenere un film con elevata conducibilità, ed infine un ultimo step di 10 minuti, nuovamente a bassa pressione ($P \sim 2 \times 10^{-2}$ mbar), per ottenere una superficie più porosa che favorisca l'adesione tra molibdeno e il CZTS. Con questo processo si ottengono film di circa 0,5 μm, con valori tipici della sheet resistance di circa 0,5 Ω/sq.

Si passa poi a depositare sul Mo, per evaporazione e-beam, un multistrato ZnS, Sn e Cu. Per avere uno spessore sufficiente ed un migliore mescolamento degli elementi abbiamo scelto di ripetere la struttura ZnS/Sn/Cu due volte. Tipicamente lo spessore totale degli strati dei tre materiali è 440 nm per lo ZnS, 230 nm per lo Sn e 200 nm per il Cu. Usando questi valori, le proporzioni stechiometriche sono Cu/Zn/Sn = 2/1.31/1, che corrispondono quindi a precursori ricchi in zinco. È stato infatti più volte riportato in letteratura che film di CZTS ricchi in Zn danno luogo a celle fotovoltaiche con caratteristiche migliori. La deposizione avviene a 150 °C e le misure di XRD mostrano che già a questa temperatura Cu e Sn formano delle leghe mentre lo ZnS non reagisce e cresce nella sua fase cubica.

I precursori vengono poi trasformati in CZTS tramite il processo di solforizzazione effettuato in un forno a tubo. Essi vengono inseriti in una piccola camera di reazione di vetro, non sigillata, insieme a dello zolfo puro in polvere, fortemente in eccesso rispetto alla quantità necessaria per ottenere un film di CZTS stechiometrico. La cameretta con il suo contenuto vengono posizionati al centro del forno a tubo in flusso di azoto. La solforizzazione avviene innalzando la temperatura di 10 °C/min fino ad arrivare a 550 °C, temperatura che viene mantenuta per 1 ora. La temperatura di solforizzazione è stata variata nell'intervallo 520 – 560 °C. A basse temperature di solforizzazione il film mostra una scarsa adesione sui substrati di Mo e ciò rende impossibile la fabbricazione di dispositivi fotovoltaici, mentre ad alte temperature di solforizzazione i film hanno una ottima adesione, ma caratteristiche fotovoltaiche inferiori. Per il momento quindi 550 °C sembra il compromesso migliore.

La deposizione del precursore e la solforizzazione sono la parte cruciale del processo. I valori riportati sopra sono solo il risultato di una prima ottimizzazione del processo di crescita del CZTS. Sarà proprio cambiando quantità e distribuzione dei vari elementi nel precursore e studiando l'influenza dei vari parametri del processo di solforizzazione (temperatura massima, velocità e forma della rampa di salita in temperatura, volume di solforizzazione, flusso di azoto e quindi contenuto di ossigeno ed altre impurezze gassose nel gas di reazione) che

si potranno ottenere miglioramenti sui dispositivi. Questo lavoro è in corso ed è guidato anche dalle varie tecniche di caratterizzazione disponibili grazie alle collaborazioni con FN (per le misure di composizione tramite EDS), Università di Roma "La Sapienza" (caratterizzazioni ottiche e Raman) ed Università di Trento (X-Ray Diffraction). Avendo compreso i limiti dell' XRD e del Raman nell'individuazione di fasi spurie, è stata anche avviata da poco una caratterizzazione dei materiali con la tecnica Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS), sempre grazie alla collaborazione con l'Università di Trento.

Il passo successivo del processo di fabbricazione del dispositivo è la deposizione del buffer layer di CdS che in queste eterogiunzioni ha diverse funzioni: ottimizzare l'allineamento delle bande tra CZTS e ZnO, realizzare una interfaccia con pochi difetti in modo da allungare la vita dei portatori fotogenerati, proteggere la superficie dell'assorbitore durante lo sputtering dello ZnO e forse anche produrre una sorta di giunzione n-p tramite un drogaggio da parte del Cd della regione di CZTS adiacente all'interfaccia. Per la deposizione dello strato di CdS è stata messa a punto la tecnica della Chemical Bath Deposition (CBD) che è quella che dà i risultati migliori. Nella CBD del CdS viene sfruttata l'idrolisi della tiourea ($(NH_2)_2CS$), utilizzata come sorgente di zolfo, in una soluzione acquosa contenente un sale di cadmio (per esempio $CdSO_4$ o CdI_2) e dell' ammoniaca come stabilizzatore di pH. La tiourea va perciò aggiunta per ultima nella soluzione contenente gli altri componenti ed il campione e mantenuta alla temperatura di deposizione voluta (circa 70 °C) e sottoposta a continua agitazione. La nucleazione e la crescita del CdS parte dopo un ritardo che diminuisce all'aumentare della temperatura e che a 70 °C è di un paio di minuti. Le caratteristiche fisiche (morfologia, proprietà ottiche ed elettriche) del film dipendono dalle condizioni di deposizione (pH della soluzione, temperatura, agitazione e tempo di deposizione). In effetti le prime prove, effettuate replicando alcune ricette di letteratura, hanno dato risultati deludenti con la crescita di film disomogenei e con bassa adesione. Si è perciò dovuto ottimizzare il processo empiricamente, riducendo concentrazioni e temperatura in maniera da ottenere una crescita più lenta. In questo modo siamo riusciti ad ottenere in 15 minuti dei film omogenei, lucidi, con buona adesione e con spessore di circa 70-80 nm.

Sopra lo strato di CdS va poi depositato il contatto semitrasparente realizzato con un film drogato di ZnO. Si è visto che si può aumentare la resistenza di shunt della giunzione interponendo tra questi due strati un film di ZnO intrinseco spesso circa 100 nm. Anche noi abbiamo seguito la stessa procedura montando nello sputtering Oerlikon un target di ZnO non drogato ed uno drogato al 2% con alluminio. Purtroppo l'ottimizzazione della deposizione dello ZnO drogato è stata interrotta a causa della rottura del target dopo pochissime deposizioni che avevano permesso di ottenere film di qualità accettabile: spessore di circa 1 µm, ρ_{sheet} di 40 Ω/sq (e quindi una resistività dell'ordine di 4 x 10^{-3} Ωcm) e mobilità degli elettroni ottenuta da misure di effetto Hall di circa 10 $cm^2/(Vs)$. Le celle vengono poi completate con l'evaporazione di una semplice griglia di raccolta in alluminio e dalla definizione dell'area del dispositivo per scribing meccanico.

Le celle prodotte sono state sottoposte ad una caratterizzazione completa (I-V al buio e sotto illuminazione con spettro solare standard AM1.5, Risposta spettrale, "Suns-Voc") ed hanno mostrato un'efficienza massima del 2% (Figura 91).

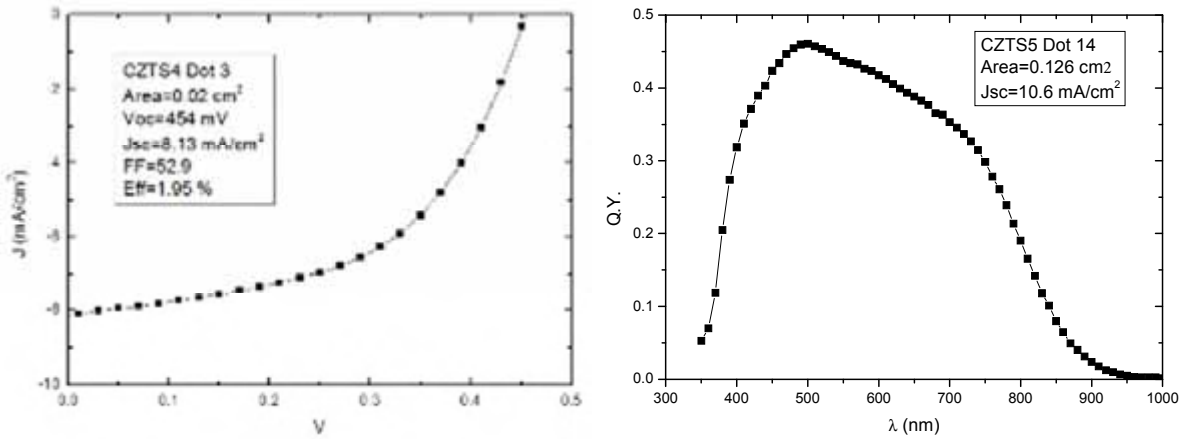


Figura 91. Risposta spettrale e caratteristica I-V della cella a base di CZTS

Avendo notato che molte celle presentano un basso Fill Factor, è stato avviato uno studio dettagliato del contatto sul retro. Durante la solforizzazione del precursore si forma sul molibdeno uno strato di solfuro di molibdeno (MoS_2) che ha una profonda influenza sulle caratteristiche elettriche del contatto e sulla adesione del CZTS al substrato. Le sue proprietà morfologiche e strutturali sono state studiate tramite SEM ed XRD ad angolo radente. E' risultato che i problemi non dipendono dall'orientazione cristallografica del MoS_2 che risulta essere quella ottimale. Una possibile spiegazione potrebbe risiedere in una carenza di zolfo nello strato di MoS_2 che potrebbe diventare di tipo n ed introdurre una giunzione indesiderata sul retro della cella. Un altro fenomeno che potrebbe

contribuire a dare questi problemi potrebbe essere la segregazione di uno strato ricco in zinco (o addirittura di uno strato sottile di ZnS) sempre vicino all'interfaccia CZTS/Molibdeno. La presenza di un eccesso di zinco nella regione in questione è stata confermata da misure preliminari di SIMS e sono in corso una serie di esperimenti per cercare di ridurre questo fenomeno.

Infine, è stata avviato uno studio per trovare dei metodi affidabili per la determinazione della gap e delle costanti ottiche del CZTS. Riuscire ad affiancare una buona caratterizzazione ottica basata su semplici misure spettrofotometriche a quella basata sullo scattering Raman è infatti importante nello studio dei problemi causati da incorretta stechiometria, dalla segregazione di fasi spurie e dal polimorfismo e disordine del materiale.

Principali soggetti esterni coinvolti

Nell'ambito delle attività previste dal tema di ricerca sono stati affidati 10 accordi di collaborazione con i previsti cobeneficiari, di cui 9 a Università e 1 a FN S.p.A. Nel seguito sono riportate le Università, il titolo del tema svolto e una breve sintesi delle attività.

Università degli Studi "Federico II" di Napoli

L'attività ha riguardato lo studio e l'ottimizzazione delle condizioni di sintesi per l'ottenimento di film omogenei e trasparenti di ZnO puro od opportunamente drogato con B o Al, tramite un'innovativa procedura di sintesi Sol-Gel. i film di ZnO depositati per sol-gel hanno mostrato buona aderenza al substrato, uniformità di spessore, elevatissima trasparenza. Con opportuni drogaggi, seguiti da appropriati trattamenti, è stato possibile ridurre la resistività degli strati. Tuttavia ulteriore sperimentazione è necessaria per migliorare le proprietà elettriche e rendere la tecnica sol-gel adatta a produrre TCO utilizzabile come elettrodo frontale di celle solari ad un costo sufficientemente basso.

Università degli Studi di Genova

Il lavoro svolto è stato orientato ad esplorare le potenzialità e la compatibilità di substrati nanostrutturati metallo-dielettrici come supporti per dispositivi fotovoltaici a film sottile. Il lavoro svolto ha permesso di dimostrare che le nanostrutture metalliche cresciute tramite irraggiamento ionico defocheggiato (IBS-Ion Beam Sputtering) presentano effetti plasmonici nella regione visibile dello spettro che, qualora ottimizzati, hanno la potenzialità di amplificare l'efficienza di conversione fotovoltaica. Sono state, inoltre, messe a punto tecniche di nanostrutturazione del substrato di vetro basate su processi auto-organizzati ad alta resa, con lo scopo di implementare "*photon harvesting*" in dispositivi fotovoltaici a film sottile.

Università degli Studi del Sannio

L'attività di ricerca ha riguardato la progettazione di *back reflectors* innovativi costituiti da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici, finalizzati alla definizione di nuove architetture che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare nelle celle solari a film sottile. E' stata dunque creata un'opportuna piattaforma virtuale per poter studiare numericamente le strutture in oggetto. E' stata valutata la possibilità di realizzare i *back reflector* ibridi metallo-dielettrici con strutture aperiodiche cercando di sfruttare la ricchezza intrinseca del loro spettro di diffrazione per migliorare ulteriormente l'assorbimento.

Università degli Studi della Calabria

Lo studio ha riguardato l'utilizzo dei cristalli fotonici per l'intrappolamento della luce nelle celle solari a film sottile. Utilizzando delle simulazioni numeriche tridimensionali basate sul metodo FDTD (Finite Difference Time Domain), è stato analizzato l'incremento dell'efficienza in presenza di nanostrutture in silicio composte da nanopillar o da nanohole. I risultati delle simulazioni hanno mostrato che con strutture di tipo nanopillar è possibile prevedere migliori prestazioni dal punto di vista ottico.

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Il lavoro svolto ha riguardato la sintesi di nuovi polimeri da testare in dispositivi fotovoltaici. Tali materiali sono stati caratterizzati mediante Risonanza Magnetica Nucleare, Gel Permeation Chromatography (GPC), Spettroscopia Infrarossa (IR), Spettroscopia UV-Visibile.

Università degli Studi di Trieste

Il lavoro svolto ha riguardato la sintesi di materiali accettori di elettroni (fullereni e nano tubi di carbonio). Sono stati sintetizzati 2 derivati del C60, comunemente denominati PCBM. Inoltre si è stata avviata il processo di sintesi

di molecole bis-PCBM con un minor numero di isomeri per ridurre il disordine molecolare ed evitare trappole elettroniche nei blend polimero-fullerene. Sono stati anche preparati materiali basati su nanotubi a parete multipla e nanohorns funzionalizzati per renderli più facilmente utilizzabili e solubili.

Università degli Studi di Salerno

L'attività è stata finalizzata allo sviluppo di un materiale nanocomposito basato sulla combinazione di quantum dot di tipo InP/ZnS con nanotubi di carbonio a parete multipla. Lo scopo è quello di migliorare le prestazioni delle celle polimeriche di tipo P3HT/PCBM, aumentando l'assorbimento nella parte rossa dello spettro solare. I quantum dot e i nanotubi sono stati inglobati in una matrice polimerica isolante, costituita dal polimero PMMA. Sono stati realizzati film con diverse concentrazioni di nanotubi di carbonio. Tali materiali sono stati caratterizzati dal punto di vista ottico, elettrico e morfologico.

Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

Il lavoro, già avviato nella scorsa annualità, ha riguardato la caratterizzazione ottica e strutturale dei film di Cu_2ZnSnS_4 con lo scopo di ottimizzare il processo di crescita dei materiali. Lo studio della soglia di assorbimento visibile nelle misure spettrofotometriche ha dato informazioni interessanti circa possibili fenomeni di disordine nel materiale che andranno approfonditi per valutare il loro effetto sulle prestazioni dei dispositivi fotovoltaici. La spettroscopia Raman ha continuato a fornire informazioni preziose e complementari a quelle date dalla diffrattometria X per determinare le fasi presenti nei campioni anche se si sono evidenziati alcuni limiti nella sensibilità per le fasi spurie a gap alta che dovranno essere superati usando sorgenti di eccitazione a lunghezze d'onda inferiori.

Università degli studi di Trento

L'attività si è sviluppata seguendo le seguenti linee:

- messa a punto della tecnica della "*Chemical Bath Deposition*" (CBD) per la deposizione di strati *buffer* di CdS. Il passaggio a materiali che non contengano elementi tossici è ancora agli inizi, essendo state fatte solo alcune prove di deposizione di Zn(S,O) sempre per CBD.
- Caratterizzazione tramite diffrazione a raggi X dei diversi strati che costituiscono la cella. In particolare è stato effettuato uno studio approfondito del contatto posteriore. Sono stati sono esaminati orientazione e tessitura dei film di molibdeno depositati per sputtering in diverse condizioni ed è stato rivelato e studiato tramite XRD ad angolo radente il sottile strato di MoS_2 che si forma all'interfaccia CZTS/Mo durante il processo di fabbricazione della cella.
- Studio dei fenomeni di segregazione dello Zinco nella parte posteriore della cella tramite misure di EDS e di SIMS.

FN S.p.A.

FN S.p.A. ha eseguito una serie di analisi di Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) su campioni di Cu_2ZnSnS_4 cresciuti nei laboratori ENEA Casaccia. Tali misure sono di notevole importanza in quanto permettono di controllare la stechiometria dei materiali, consentendo, quindi, il processo di ottimizzazione dei materiali.

Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine

(Referente G. Sannino)

Il settore delle energie rinnovabili sta sempre più estendendo i suoi interessi nel campo marino, valutando quanto sia vantaggioso estrarre energia elettrica sia dalle correnti di marea sia dalle onde. Il possibile sfruttamento di questa potenzialità, tuttavia, è strettamente legato a una conoscenza dettagliata delle grandezze fisiche connesse (velocità della corrente, altezza delle onde, intensità delle maree).

Le mappe che descrivono le correnti marine attualmente disponibili per il Mar Mediterraneo, e i mari italiani in particolare, sono state realizzate interpolando spazialmente i dati sperimentali ottenuti dalle decine di campagne oceanografiche che si sono succedute negli ultimi quaranta anni. Nonostante la grossa mole di dati utilizzati, il risultato finale non può essere considerato ancora sufficiente ai fini della valutazione del potenziale energetico delle correnti di marea, anche a causa della disomogeneità spaziale e della discontinuità temporale dei dati raccolti.

Per quanto riguarda i dati di onda, la quasi totalità delle informazioni si basa sui dati registrati dalle 15 boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON). Queste boe, nonostante costituiscano una fonte insostituibile di informazioni, non forniscono una copertura spaziale adeguata per l'individuazione dei siti costieri per l'estrazione dell'energia ondosa. Di contro, gli attuali modelli numerici hanno raggiunto un elevato livello di complessità, tale da renderli lo strumento più idoneo alla descrizione dettagliata della circolazione marina e del moto ondoso.

Uno dei vantaggi più evidenti legati allo sviluppo di modelli numerici per la simulazione delle correnti marine e il moto ondoso è rappresentato dalla possibilità di valutare in anticipo, e con un discreto grado di affidabilità, l'energia teorica disponibile nel sito in cui si è deciso di installare un dispositivo di conversione. La possibilità di valutare l'energia teorica disponibile nel sito anche per il prossimo futuro, secondo gli scenari climatici suggeriti dall'IPCC, costituisce un ulteriore vantaggio.

In conseguenza di quanto sopra detto, l'attività di ricerca del presente progetto consisteva principalmente nel quantificare il potenziale energetico delle correnti marine e del moto ondoso in prossimità delle aree costiere italiane attraverso l'uso di strumenti innovativi di modellistica numerica oceanografica, meteo-marina, e climatica. L'attività era inoltre tesa ad analizzare le attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Il progetto ha l'obiettivo di fornire un innovativo e particolareggiato contributo informativo per il supporto alle attività di estrazione dell'energia dal mare. Tale obiettivo sarà raggiunto attraverso lo sviluppo di un sistema informativo integrato che fornirà parametri meteo-marini direttamente legati alle tecnologie di estrazione dell'energia (turbine, etc) con un elevato dettaglio spaziale per la caratterizzazione dei siti più adatti. L'integrazione in un sistema GIS fornirà dettagli sulle infrastrutture potenzialmente interessate (porti, reti energetiche etc) e su parametri ambientali di interesse (vincoli, turismo etc).

Alla base di questo sistema vi sarà la messa a punto di modelli numerici oceanografici e meteo-marini per la previsione del moto ondoso e della circolazione marina nel bacino del Mediterraneo, e lo studio delle tecnologie attualmente sviluppate per l'estrazione dell'energia marina.

In particolare, le attività di ricerca sono state indirizzate al conseguimento di tre obiettivi: il primo ha riguardato lo sviluppo degli strumenti numerici, il secondo è stato dedicato alla produzione delle mappe del potenziale energetico, infine il terzo ha riguardato l'analisi delle tecnologie di conversione della energia marina.

Di seguito si descriveranno i principali risultati conseguiti relativi ai singoli obiettivi.

Sviluppo del modello numerico per la simulazione della circolazione marina e del modello del moto ondoso per il bacino Mediterraneo

Questo obiettivo è stato dedicato interamente allo sviluppo e implementazione di cinque modelli numerici: atmosferico, oceanografico, climatico, correnti di marea, onde. Nello specifico, sono stati sviluppati i seguenti modelli numerici:

- Modello di onde implementato per l'intero bacino mediterraneo a 7 km di risoluzione;
- Modello di circolazione implementato per l'intero bacino mediterraneo a 7 km di risoluzione;
- Modello di circolazione implementato per la regione delle Bocche di Bonifacio 90 m di risoluzione;

- Modello atmosferico a 30 km di risoluzione implementato per l'area euro-mediterranea;
- Modello climatico accoppiato atmosfera (30 km di risoluzione) e oceano (15 km di risoluzione) implementato per l'area euro-mediterranea.

Sia il modello di onde che di circolazione marina sono strumenti che risolvono numericamente un sistema di equazioni differenziali non lineari alle condizioni iniziali e al contorno. Una volta conosciute le condizioni iniziali, i modelli necessitano durante la loro integrazione delle condizioni al contorno. Per quanto riguarda i modelli marini, le condizioni al contorno sono essenzialmente quelle che si stabiliscono all'interfaccia aria-mare: campi di vento, flussi di acqua e calore. Questi dati, tuttavia, non sono disponibili alla risoluzione ottimale per questo studio. I dati disponibili sono a una risoluzione spaziale inadeguata (centinaia di km). Serve quindi un *downscaling* (raffinamento) dei dati. Una delle procedure di *downscaling* più utilizzate in letteratura è quella definita 'dinamica', ossia i dati atmosferici sono rielaborati da un modello atmosferico a più alta risoluzione.

Durante la prima fase è stato implementato un modello atmosferico per il *downscaling* dinamico dei dati atmosferici di clima globale sull'area Euro-Mediterranea. Il modello implementato è stato il RegCM, uno dei modelli di circolazione atmosferica regionale più utilizzato dalla comunità scientifica internazionale. La fase di implementazione di RegCM sull'area Euro-Mediterranea ha visto anche lo sviluppo di componenti aggiuntive che sono state sviluppate per migliorare l'accuratezza del modello nella descrizione dei processi fisici caratteristici dell'area Euro-Mediterranea (principalmente le interazioni aria-mare). In particolare sono stati implementati uno schema numerico per la rappresentazione della temperatura pellicolare della superficie del mare, e uno schema numerico per la simulazione della portata dei fiumi.

Al fine di valutare la migliore configurazione possibile per l'area Euro-Mediterranea, sono state implementate due diverse configurazioni: EuroMed_small e EuroMed_large. Entrambe le configurazioni sono caratterizzate dalla medesima risoluzione verticale. Differiscono nella risoluzione orizzontale e nelle dimensioni del dominio, che comporta a sua volta un diverso tempo di calcolo e una differente dimensione dei file di uscita prodotti dal modello. Per la configurazione Euro_Med_small il dominio è costituito da una griglia 150x160 con una risoluzione orizzontale di 30 km proiettata secondo la proiezione conforme di Lambert. Il passo temporale con cui vengono risolte le equazioni della dinamica e della fisica è di 75 s. Per la configurazione Euro_Med_large il dominio è costituito da una griglia 192x240 con una risoluzione orizzontale di 25 km proiettata anche in questo caso secondo la proiezione conforme di Lambert. Lo step temporale con cui sono risolte le equazioni della dinamica e della fisica è di 75 s. Sono state programmate diverse simulazioni regionali che si differenziano per il periodo in esame e per il tipo di condizioni al contorno utilizzate. La configurazione del modello in termini di schemi e parametrizzazioni rimane inalterata.

<u>Simulazione ERA40</u>: Le condizioni al contorno laterali (temperatura, umidità, vento) sono ottenute dalla rianalisi globale ERA40, sviluppata presso l'ECMWF per il periodo di 43 anni 1958-2000. La rianalisi globale ERA40 è prodotta assimilando differenti tipi di dati meteo-climatici (satellite, navi, aerei, stazioni meteorologiche) in un modello di circolazione globale. I dati, con una risoluzione temporale di 6 ore, sono resi pubblici su un grigliato regolare di passo pari a 2,5° su 23 livelli di pressione anche se il modello operativo ha una risoluzione più elevata. Le temperature della superficie marina sono ottenute dall'archivio Global Ice and Sea Surface Temperature (GISST) prodotto dalla UKMO.

<u>Simulazione ERA-Interim</u>: Le condizioni al contorno laterali (temperatura, umidità, vento) sono ottenute dalla rianalisi globale di recente produzione ERA-Interim sviluppata presso l'ECMWF che copre il periodo dal 1989 al tempo presente. I principali progressi nelle rianalisi dei dati di ERA-Interim rispetto a ERA-40 sono: schemi di assimilazioni ottimizzati, una maggiore risoluzione orizzontale, una nuova analisi dell'umidità, la fisica del modello è stata migliorata. Inoltre sono stati presi in considerazione nuovi dati osservativi. Nella rianalisi ERA-Interim i dati, con una risoluzione temporale di 6 ore, sono resi pubblici su un grigliato regolare di passo pari a 0,75° su 37 livelli di pressione. Le temperature della superficie marina sono anche in questo caso ottenute dall'archivio Global Ice and Sea Surface Temperature (GISST) prodotto dalla UKMO.

<u>Simulazione EH5OM-20C3M</u>: Le condizioni al contorno laterale per l'atmosfera per il periodo 1951-2000 sono ottenute dalla simulazione globale accoppiata ECHAM5-MPIOM 20c3m (run3) inclusa nel Quarto Rapporto IPCC. Le concentrazioni di anidride carbonica sono quelle di riferimento per il XX secolo. I dati, con una risoluzione temporale di 6 ore, sono resi pubblici su un grigliato regolare di passo pari a 2,5° su 31 livelli verticali di pressione.

<u>Simulazione EH5OM-A1B</u>: Le condizioni al contorno laterale per l'atmosfera per il periodo 2001-2050 sono ottenute dalla simulazione globale accoppiata ECHAM5-MPIOM SRES A1B (run3) inclusa nel Quarto Rapporto IPCC. Le concentrazioni di anidride carbonica sono quelle di riferimento per lo scenario di sviluppo A1B. I dati, con una risoluzione temporale di 6 ore, sono resi pubblici su un grigliato regolare di passo pari a 2,5° su 31 livelli verticali di pressione.

Dal confronto delle simulazioni ottenute con Euro_Med_small e Euro_Med_large è emerso che non ci sono differenze sostanziali nei risultati ottenuti sul Mediterraneo, per cui, visto anche l'enorme mole di dati immagazzinati, è stato preferito come dominio di integrazione la configurazione Euro_Med_small. I dati delle simulazioni Euro_Med_small sono stati poi utilizzati per produrre le simulazioni del clima presente delle correnti marine.

Come ulteriore passo in avanti, per descrivere tutti i complessi fenomeni di interazione tra l'aria e il mare per il clima futuro, è stato sviluppato un modello regionale in cui la componente atmosferica, già descritta in precedenza, è stata convenientemente accoppiata ad un modello oceanico. Il sistema così ottenuto è stato chiamato PROTHEUS.

Nel sistema PROTHEUS sono stati accoppiati il modello atmosferico RegCM3 e il modello oceanico MITgcm. Entrambi i modelli sono ben testati e sono stati ampiamente utilizzati in diverse regioni del mondo per una varietà di applicazioni. La componente oceanica è caratterizzata da una risoluzione spaziale di 1/8°x1/8°, che corrisponde ad una risoluzione non uniforme di 14 km x (9÷12) km.

L'accoppiamento dei due modelli RegCM3 e MITgcm è stato eseguito mediante il modulo OASIS. Oltre alla sincronizzazione dei due modelli, il compito principale di OASIS è stato quello di interpolare i campi scambiati tra i due modelli dalla griglia originaria a una di destinazione, dato che i due modelli sono caratterizzati da risoluzioni spaziali diverse.

In questa configurazione, MITgcm invia la temperatura superficiale al RegCM3 mentre il RegCM3 invia al MITgcm le componenti del vettore del vento, il flusso di calore sensibile, il flusso di calore latente, la radiazione superficiale incidente d'onda lunga e corta.

OASIS (*Ocean Atmosphere Sea Ice Soil*) è un accoppiatore di codici particolarmente diffuso all'interno della comunità climatica, il cui sviluppo ha avuto luogo a partire dal progetto europeo PRISM (*Program for Integraded Earth System Modeling*) finanziato dalla Commissione Europea con la partecipazione di 22 istituzioni europee. Nel corso del seguente obiettivo è stato implementato OASIS4, l'ultima versione disponibile del software OASIS.

Terminata la fase di implementazione, il modello è stato girato in configurazione clima presente e futuro. Per il clima presente i risultati sono stati validati confrontando i dati atmosferici osservati e simulati per la regione mediterranea per il periodo della simulazione. Le simulazioni effettuate per il clima futuro hanno riguardato in particolare il periodo 2001-2050. I dati ottenuti dalla simulazione del clima futuro sono stati salvati sul sistema di *storage.*

Negli ultimi venti anni i modelli di simulazione del moto ondoso sono diventati degli strumenti indispensabili per le previsioni operative dello stato del mare sia in ambito scientifico che ingegneristico. Tra i modelli disponibili, il WAM (*WAve prediction Model*) è il più diffuso. Un altro modello molto diffuso per la simulazione del moto ondoso è lo SWAN (*Simulating WAves Nearshore*). Al fine di verificare quale modello si prestasse meglio allo scopo della valutazione del potenziale energetico del moto ondoso, sono stati implementati in configurazione mediterranea entrambi i modelli. Relativamente ai tempi di calcolo, WAM è risultato il modello migliore. Tuttavia la scelta di un modello è dettata principalmente dalla capacità che questo ha nel riprodurre i dati osservati. Per questo motivo sono stati condotti dei test per verificare i risultati ottenuti con SWAN e WAM. Dal confronto è emerso che entrambi I modelli mostrano un ottimo accordo con i dati osservati. A parità di risultati, si è deciso quindi di utilizzare il modello WAM che ha mostrato le migliori prestazioni computazionali.

Il modello d'onda è stato implementato utilizzando la versione 4.5.3 di WAM su di una griglia uniforme in coordinate sferiche. Al fine di tenere correttamente in considerazione il contributo dei campi d'onda dovuto allo *swell*, cioè alla trasmissione del moto ondoso da zone lontane dall'area di studio, il dominio di calcolo è stato esteso all'intero bacino del Mar Mediterraneo da 5.50° W a 36.125° E di longitudine e da 30.2° N a 45.825° N di latitudine. La dimensione delle celle è stata selezionata tenendo conto tempi di calcolo, della risoluzione dei campi di vento utilizzati come condizioni al contorno superficiali, della necessità di simulare correttamente la geometria dei limiti costieri e di rappresentare le numerose isole presenti nel bacino del Mediterraneo. E' stata pertanto utilizzata una dimensione delle celle pari a 1/16°, tale risoluzione corrisponde in termini di distanze lineari a circa 5-7 km per un totale di 667 x 251 nodi di calcolo.

La batimetria applicata alla griglia di calcolo è stata estratta dal dataset GEBCO_08 che contiene il rilievo della superficie del globo terrestre compilato utilizzando numerose fonti alla risoluzione di 30 arco-secondi di grado. La batimetria finale utilizzata per le simulazioni del moto ondoso è presentata nella Figura 92.

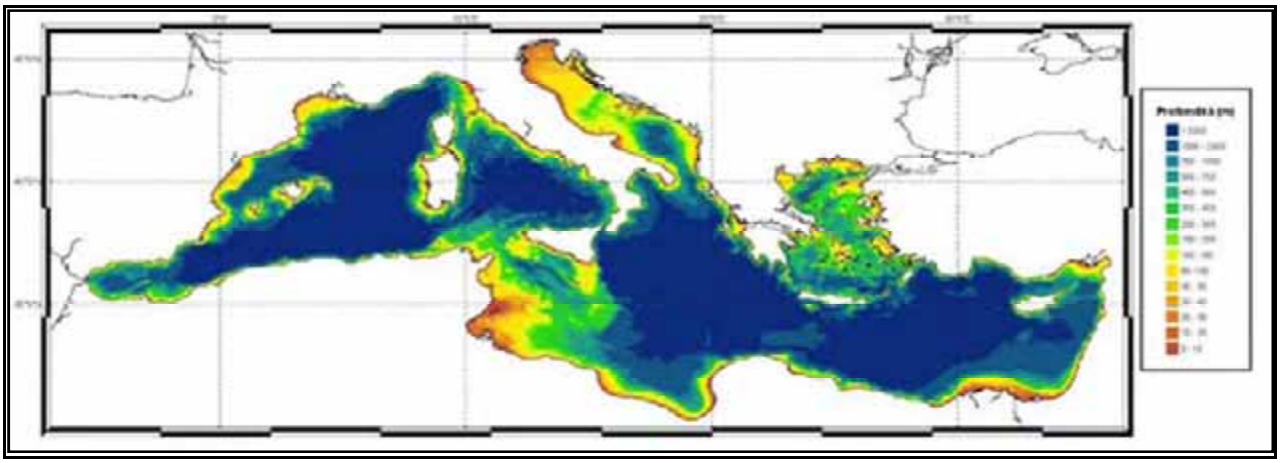


Figura 92. Batimetria finale della regione mediterranea utilizzata dal modello WAM

Il modello scelto per lo studio delle correnti di marea nel Mediterraneo è stato il MITgcm, uno dei più utilizzati dalla comunità scientifica internazionale. Il MITgcm attualmente è considerato come lo stato dell'arte dei modelli oceanografici. Il MITgcm è un modello numerico di circolazione generale, sviluppato presso i laboratori del *Massachusetts Institute of Technology* di Boston, è stato ideato per lo studio di processi dinamici che vanno dalla scala del processo convettivo alla scala globale.

Per risolvere adeguatamente le maree del Mediterraneo, è stata adottata una configurazione del MITgcm particolarmente avanzata. La griglia computazionale del modello è costituita da una griglia curvilinea ortogonale che si adatta alla linea di costa, modificando in questo modo la risoluzione spaziale in alcune regioni. Nel nostro caso la griglia computazionale ha seguito la linea di costa nella regione adiacente allo Stretto di Gibilterra, garantendo in questo modo un incremento notevole della risoluzione spaziale nello Stretto. Il modello copre tutta l'area del Mediterraneo con una risoluzione orizzontale di 1/16° x 1/16° che equivale a celle di dimensioni variabili con la latitudine. In particolare la risoluzione meridionale è di circa 7 km e quella zonale va da circa 4,5 km nella parte nord del dominio a circa 6 km in quella meridionale. Nella regione adiacente Gibilterra, la risoluzione comincia ad aumentare, fino a raggiungere circa 1/200° nello Stretto.

La batimetria applicata alla griglia di calcolo è stata estratta dal dataset GEBCO_08 La batimetria è stata generata escludendo preventivamente dal dominio di calcolo tutti i nodi per i quali il punto del dataset GEBCO più vicino si trova sulla terraferma. La batimetria dei nodi rimanenti è stata ottenuta eseguendo una media aritmetica dei valori di elevazione GEBCO ricadenti nell'intervallo di griglia centrato sul nodo, escludendo dal calcolo i punti di terraferma. La batimetria è stata poi opportunamente corretta apportando una serie di modifiche puntuali sia per semplificare la rappresentazione della linea di costa laddove avesse un andamento troppo frastagliato sia per migliorare la rappresentazione delle isole (Figura 93 e Figura 94). Il modello considera 72 livelli zeta sulla verticale con risoluzione variabile da 3 metri in superficie a 300 metri nella parte più profonda del bacino, e una risoluzione intermedia di 70 meri nella zona intorno ai 200-700 m.

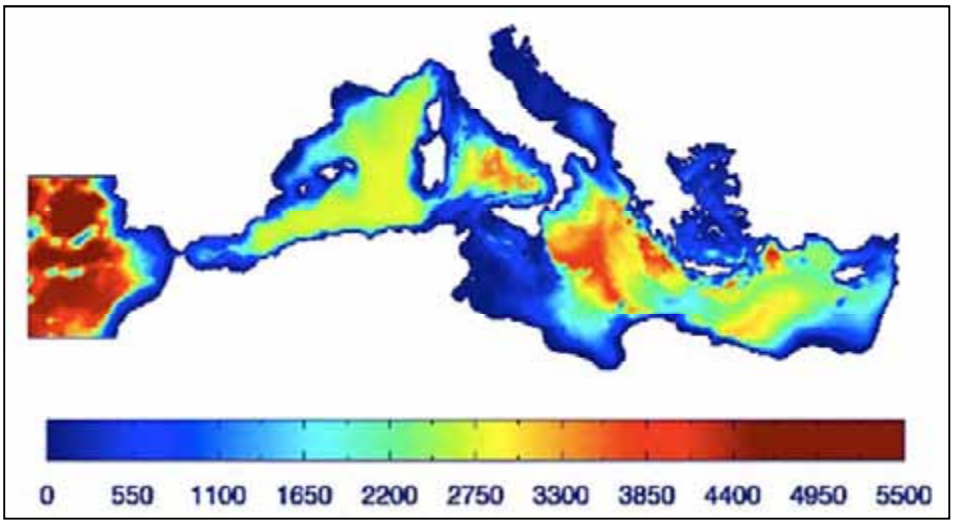


Figura 93. Batimetria utilizzata dal modello di circolazione marina del Mediterraneo

Le condizioni iniziali sono state derivate dai dati climatologici MEDATLAS (MEDAR Group (2002)). Una simulazione iniziale con flussi superficiali derivati dall'anno 1958 del *dataset* ERA40 è stata realizzata rilassando le temperature e le salinità in tre dimensioni. Questa fase di inizializzazione è stata protratta fino a quando l'energia cinetica ha raggiunto un equilibrio sull'intero dominio. La simulazione è stata realizzata utilizzando come forzanti i dati provenienti dalla simulazione atmosferica per il clima presente.

Visto il tipo particolare di marea presente nel Mediterraneo, sono stati introdotti nel modello due forzanti distinti: uno interno (marea di equilibrio), e uno esterno (marea laterale). La componente interna è discretizzata nel modello come una forza di volume agente direttamente sull'equazione della tendenza della velocità. La componente laterale è stata invece introdotta come condizione al contorno sul bordo ovest del modello.

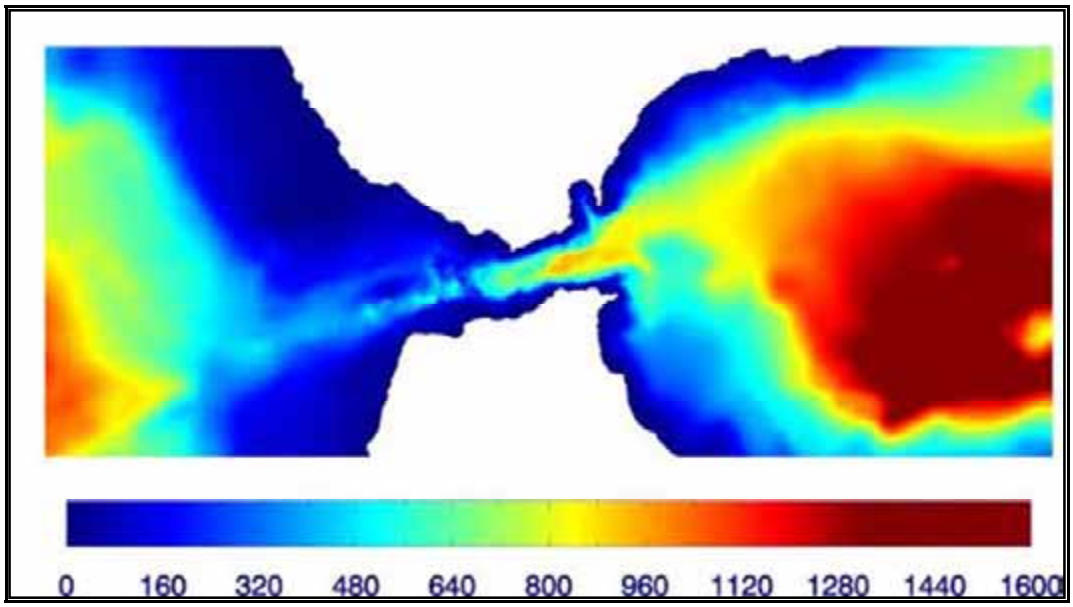


Figura 94. Dettaglio della batimetria utilizzata dal modello di circolazione marina del Mediterraneo per la regione dello Stretto di Gibilterra

Diverse simulazioni sono state realizzate allo scopo di verificare la capacità del modello di simulare le correnti di marea del Mediterraneo. Dall'analisi dei risultati è emerso che il modello è in grado di simulare in maniera più che soddisfacente le maree.

L'ultimo modello sviluppato è stato quello relativo al Canale di Bonifacio. Questo modello è stato sviluppato per calcolare il potenziale energetico del tratto di mare compreso tra Sardegna e Corsica. A differenza del modello mediterraneo, il modello di Bonifacio utilizza una risoluzione spaziale elevatissima. La simulazione numerica dei campi idrodinamici è stata condotta mediante il modello oceanico POM, con riferimento all'intervallo temporale Gennaio-Novembre 2009. Il POM è un modello previsionale tridimensionale, che integra le equazioni di bilancio della meccanica dei fluidi. La superficie d'interfaccia acqua-aria è libera, mentre le coordinate verticali sono di tipo sigma.

Il dominio d'integrazione ha una sezione orizzontale di forma rettangolare di dimensioni 17,91x11,25 km^2 (rettangolo giallo più grande riportato nella Figura 95). La necessità di dover cogliere col maggiore dettaglio possibile l'andamento delle correnti anche in corrispondenza di bracci di mare larghi anche meno di un chilometro, ha comportato l'adozione di una risoluzione spaziale molto elevata, sia lungo il piano orizzontale sia lungo la verticale. In particolare, il dominio è stato discretizzato mediante un grigliato regolare 200x126 secondo le coordinate longitudine-latitudine (Figura 96). La distanza tra i nodi è pari a circa 90 m. La batimetria è stata ricavata sulla base di carte nautiche ad elevato dettaglio. La massima profondità nel dominio di calcolo è circa 50 m, con ampie zone in cui il fondale non supera i 30 m. Come per l'orizzontale, anche lungo la verticale è stata adottata una risoluzione molto elevata utilizzando 21 livelli sigma. Nello spazio fisico, ciò corrisponde a nodi distanti tra loro al più pochi metri nelle zone in cui la profondità è più elevata, e pochi centimetri in prossimità delle linee di costa, ove le profondità sono ancora più modeste. La circolazione è stata forzata sulla base dei dati ottenuti dalla simulazione del clima presente eseguita con il MITgcm. L'interpolazione dei dati è stata eseguita interattivamente attraverso l'uso del modulo del nesting sviluppato nel corso del progetto.

Figura 95. L'Arcipelago della Maddalena. I rettangoli gialli indicano le aree analizzate nelle simulazioni

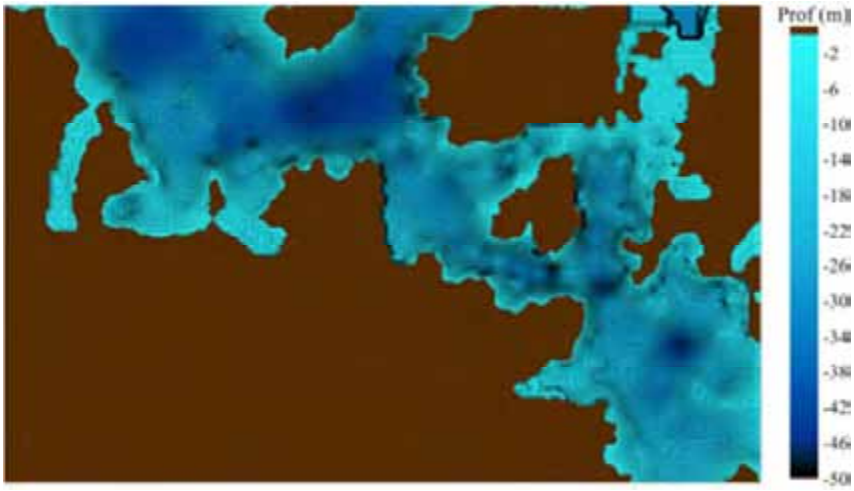


Figura 96. Discretizzazione del dominio di calcolo

Produzione delle mappe degli indicatori del potenziale energetico relative alle simulazioni sul bacino del Mediterraneo

Nel corso di questa attività le condizioni al contorno realizzate nell'obiettivo precedente sono state utilizzate per forzare il modello di onda e i modelli di correnti.

Nello specifico, sono state effettuate simulazioni dello stato del mare utilizzando il modello WAM (Wave prediction Model) per la previsione delle onde. Sono state realizzate sia simulazioni per il clima attuale che simulazioni forzate a partire dai risultati ottenuti con il modello accoppiato oceano-atmosfera PROTHEUS.

Una prima simulazione è stata forzata con i venti ogni sei ore provenienti dalle analisi realizzate in maniera operativa dal Centro Europeo per le previsioni a medio termine (ECMWF), disponibili su griglia regolare di 0,25°x0,25°. I dati utilizzati coprono il periodo dal 1 Gennaio 2001 al 31 Dicembre 2010 e i risultati sono stati validati tramite il confronto statistico con tutti i dati disponibili delle boe ondametriche della rete RON (Rete Ondametrica Nazionale gestita dal Servizio Mareografico dell'ISPRA) (Figura 97). I dati delle boe evidenziate in rosso sono stati utilizzati nel presente studio, mentre quelle in grigio non sono state considerate perché l'estensione temporale delle serie non è sufficientemente lunga. Un confronto è stato effettuato anche rispetto alla simulazione operativa prodotta, in un'altra configurazione del codice WAM, dallo stesso ECMWF. Il risultato dei confronti ha mostrato un'ottima correlazione tra valori simulati e osservati di ampiezza dell'onda. I risultati ottenuti mostrano una leggera sottostima (bias) rispetto ai valori delle boe RON; in particolare per i due siti di maggiore interesse ai fini dello sfruttamento del potenziale energetico (Alghero e Mazara del Vallo) l'errore percentuale è inferiore al 3%. Infine è da sottolineare che la climatologia del moto ondoso ottenuta rappresenta un miglioramento notevole rispetto ai dati disponibili presso il Centro Europeo ECMWF, nonostante quest'ultima faccia anche uso di dati assimilati.

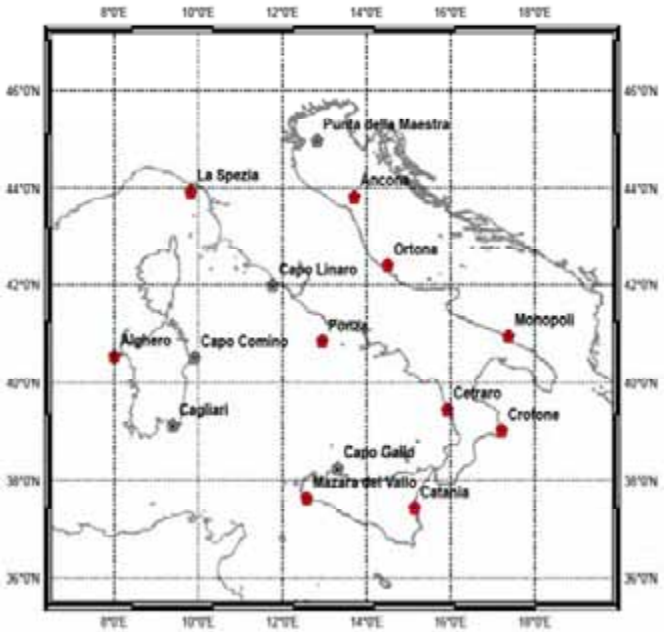


Figura 97. Posizione delle boe della Rete Ondamentrica Nazionale (RON)

Sono state prodotte mappe stagionali di ampiezza dell'onda su tutto il bacino Mediterraneo. Il moto ondoso risulta particolarmente intenso durante la stagione invernale e autunnale, con i valori più elevati presenti nel Mediterraneo occidentale, in particolare nel golfo del Leone e nella zona compresa tra le isole Baleari e la Sardegna, dove viene raggiunto un valore medio di 1,8 m. Un'altra regione interessata da valori elevati di altezza significativa, nelle stesse stagioni dell'anno, è quella del Canale di Sicilia e del Mar Ionio (Figura 98).

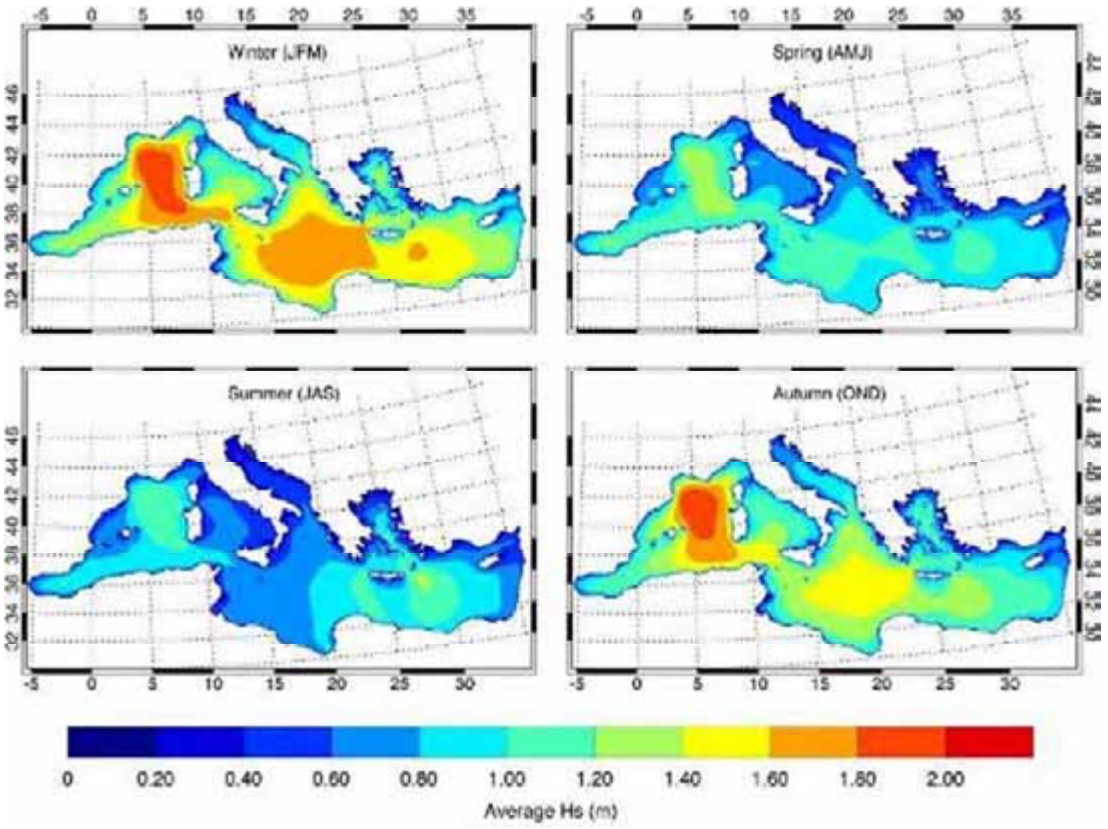


Figura 98. Mappe di altezza significativa (Hs) in metri simulata dal modello WAM

Mappe stagionali climatologiche (periodo 2001-2010) di potenziale energetico medio ricavato dalle onde sono state quindi prodotte per il bacino mediterraneo (Figura 99).

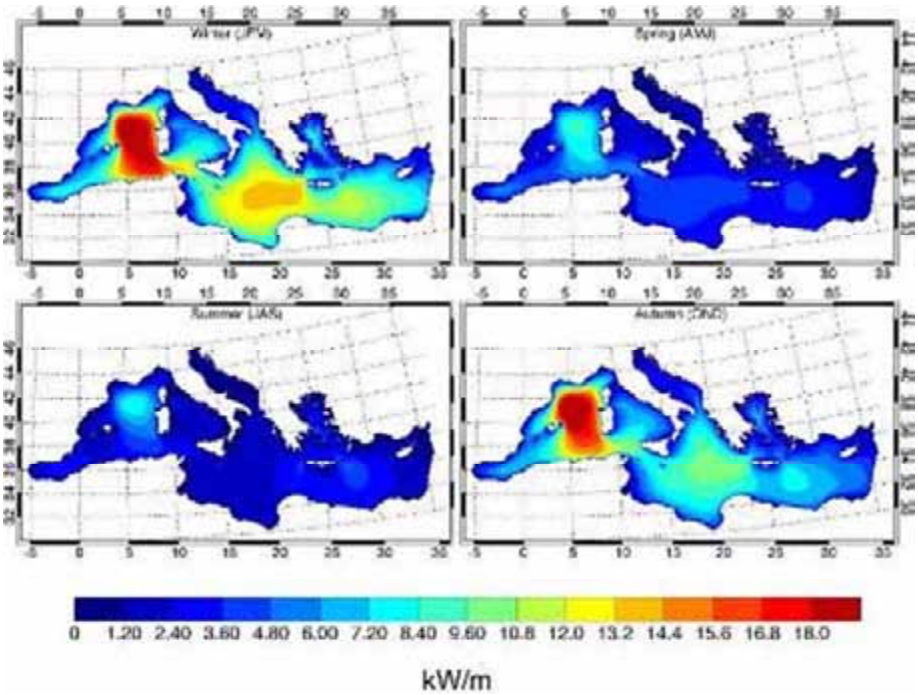


Figura 99. Potenziale energetico medio stagionale calcolato dal moto ondoso

Per evidenziare i risultati per la costa italiana, i valori del potenziale energetico sono stati estratti lungo la fascia costiera italiana, a circa 12 km dalla costa, Figura 100. I valori più elevati si trovano nella zona nord-ovest della Sardegna con massimi invernali di circa 10 kW/m e sulla punta sud-ovest della Sicilia con valori tra 4 e 5 kW/m.

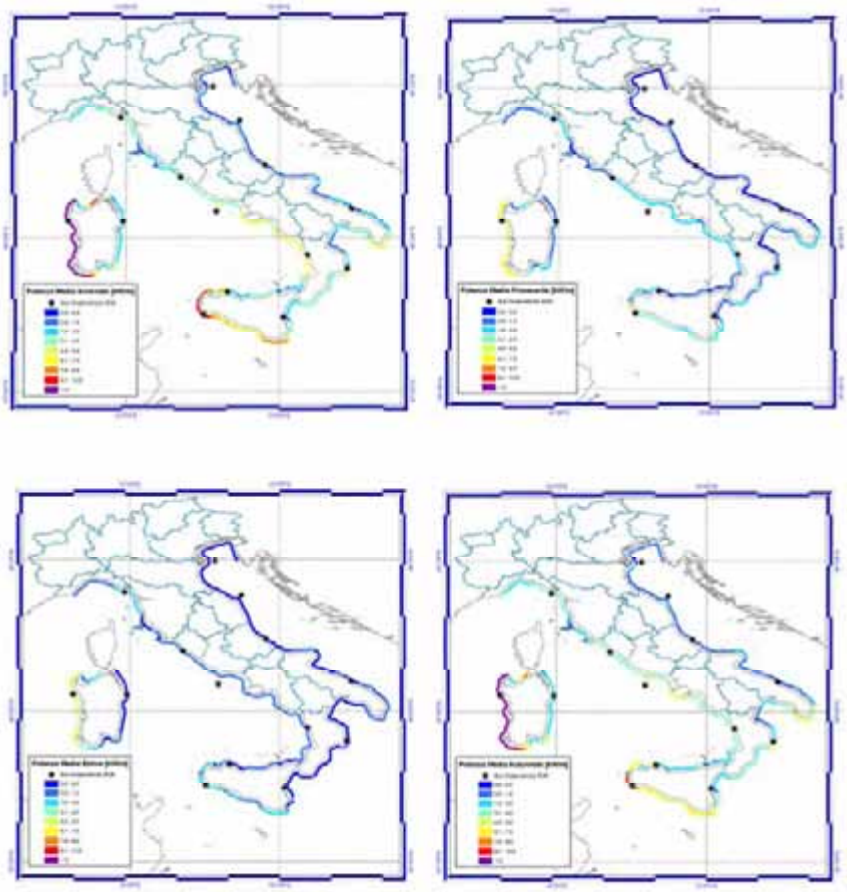


Figura 100. Potenziale energetico medio stagionale calcolato dal moto ondoso

I risultati del potenziale energetico lungo le coste italiane sono stati anche riportati all'interno di un sistema GIS che consente la gestione e visualizzazione di carte tematiche. In questo caso i dati di potenziale sono rappresentati insieme alle aree marine protette ed ai valori batimetrici. L'accesso e la consultazione interattiva delle mappe tematiche prodotte è inoltre stato reso possibile tramite un sito WebGIS realizzato appositamente (Figura 101).

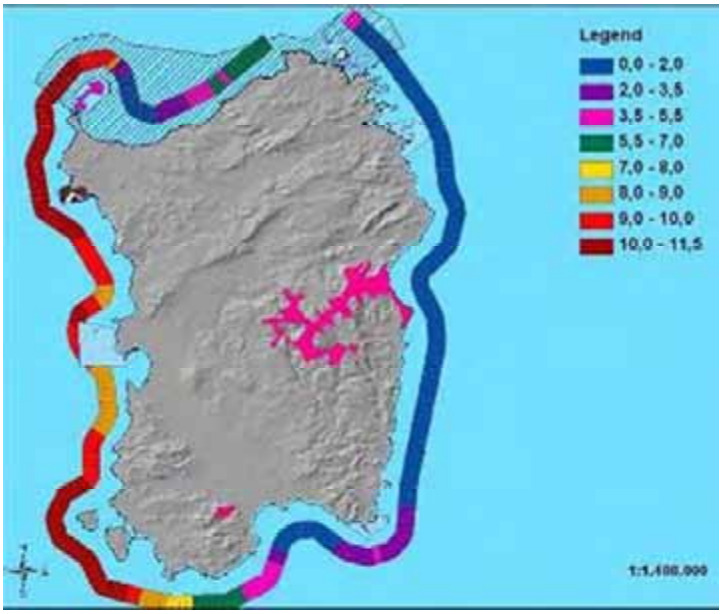


Figura 101. Rappresentazione GIS: particolare della Sardegna con le aree protette terrestri e marine

Il modello WAM è stato utilizzato anche per ottenere informazioni sulla variazione dello stato del mare in un futuro prossimo. In questo caso i dati del vento sono stati ricavati dalla simulazione con il modello PROTHEUS per il periodo 2001-2010 ed il periodo 2041-2050. Tramite l'analisi statistica, condotta per mezzo delle *Empirical Orthogonal Functions* (EOF), sulle altezze delle onde calcolate per i due decenni, si è verificato che i valori restano sostanzialmente invariati nei due periodi considerati.

La circolazione nel mar Mediterraneo è stata simulata usando come forzanti superficiali i dati ricavati dalla simulazione ERA_Interim prodotta con il modello RegCM per il periodo 1989-2010. L'energia cinetica media mostra valori massimi dell'ordine di 200-250 $cm^2\ s^{-2}$, nella stagione invernale, lungo la costa algerina e in prossimità della costa tunisina e siciliana, nella corrente liguro-provenzale e nella corrente costiera levantina. Un altro massimo all'incirca della stessa intensità è anche presente lungo la costa del Marocco, in prossimità del jet di origine atlantica.

I valori della corrente sono stati utilizzati per calcolare la potenza teorica massima. Nel periodo autunnale-invernale al largo delle coste tunisine sono stati ottenuti massimi di circa 90 W m^{-2} e intorno a 70 W m^{-2}, nel periodo estivo, nelle Egadi.

Una simulazione per il clima futuro è stata realizzata utilizzando i campi del modello accoppiato PROTHEUS. Una prima analisi effettuata comparando l'energia cinetica contenuta nei primi 30 m dalla superficie del mare, con quella ottenuta per il clima presente non ha mostrato differenze significative.

In conclusione i valori di potenza teorica calcolati con il modello MITgcm risultano piuttosto bassi. Tuttavia, all'interno del Mediterraneo la configurazione utilizzata dal modello non è in grado di rappresentare le correnti di marea lungo gli stretti di piccole dimensioni presenti nel bacino. I risultati ottenuti sono però fondamentali come condizioni al contorno per simulazioni a più alta risoluzione.

Nel corso dell'attività è stato sviluppato un modulo specifico di *nesting* per il codice MITgcm che permette di annidare all'interno di un codice "padre" uno o più codici "figlio". In particolare è stato realizzato un *two-way nesting*, cioè il codice figlio ha come condizioni al contorno campi interpolati dal codice padre mentre campi calcolati dinamicamente dal figlio vengono sostituiti nei punti di sovrapposizione del codice padre. Utilizzando questo modulo di *nesting,* è stato messo a punto un modello specifico basato sull'uso del codice POM, ad alta risoluzione, per il Canale di Bonifacio.

La risoluzione orizzontale è stata spinta fino a circa 90 m, utilizzando 21 livelli verticali sigma su una profondità massima di 50 m; in questo caso, data la ridotta profondità, è stata utilizzata una approssimazione barotropica. E' stata calcolata la media mensile della potenza della corrente, integrata lungo la colonna d'acqua (kW m^{-1}), per il

periodo Gennaio-Novembre 2009. Nel calcolo sono stati esclusi gli strati più superficiali, ritenuti non significativi in quanto le turbine sottomarine non possono in genere essere posizionate in prossimità della superficie libera. In tutti i mesi analizzati la regione del massimo interessa il tratto compreso tra Punta Sardegna e Capo D'Orso, con particolare riferimento alla regione localizzata a sud dell'isola di S. Stefano.

Lo studio numerico, basato sull'utilizzo del modello oceanico POM, ha consentito la caratterizzazione della circolazione idrodinamica in corrispondenza dell'Arcipelago della Maddalena. L'analisi ha preso in considerazione un periodo di tempo lungo circa 11 mesi, dal Gennaio al Novembre del 2009. Per buona parte dell'anno la velocità della corrente e la corrispondente potenza raggiungono valori di un certo interesse nell'ambito di una possibile messa in opera di impianti di produzione di energia elettrica dalle correnti marine mediante turbine sommerse.

Analisi dettagliata delle tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina

L'attività svolta all'interno di questo obiettivo ha riguardato la descrizione delle tecnologie esistenti per lo sfruttamento dell'energia da onda e corrente, approfondendo gli aspetti progettuali e realizzativi delle installazioni in mare.

Energia dal moto ondoso

Per il caso dell'energia da onda sono state considerate in particolare le tecnologie che meglio potrebbero adattarsi alle caratteristiche del moto ondoso dei mari italiani. Si è proceduto con una prima valutazione a livello globale dello stato dello sfruttamento dell'energia ondosa e sviluppo tecnologico connesso. A livello globale diversi dispositivi di conversione dell'energia da onda sono attualmente in attività (un lista esaustiva si trova nel sito del progetto Equimar: http://www.equimar.org/equimar-project-deliverables.html). Molti di questi dispositivi hanno dimostrato la loro applicabilità anche in difficili condizioni operative, come mareggiate oceaniche. La loro distribuzione è internazionale essendo installati in diversi Paesi, sia in Europa che in altri continenti come ad esempio in Australia e Asia. Tuttavia non si è ancora alla fase di commercializzazione di tali dispositivi di conversione dell'energia da onda, infatti mentre diversi dispositivi sono nella loro fase finale di studio della fattibilità, solo uno (PELAMIS in Portogallo) risulta pronto alla commercializzazione.

I dispositivi in grado di generare energia elettrica sfruttando il moto ondoso vengono comunemente denominati *Wave Energy Converters* (WECs), ed utilizzano uno specifico sistema di *power take off* (di estrazione dell'energia).In generale i WECs devono possedere i seguenti requisiti:

- essere "a prova di tempesta", cioè poter sopportare le condizioni climatiche peggiori che si possono presentare, quindi anche altezze d'onda molto elevate;
- non essere troppo impattanti per l'ecosistema ed il territorio circostante;
- non essere troppo pesanti, poiché con l'aumento del peso aumentano anche i costi di produzione e di esercizio;
- richiedere la minore manutenzione possibile;
- essere basati su tecnologie sottoposte a prova più volte, in modo da assicurare delle installazioni stabili e durature nel tempo.

Successivamente i convertitori sono stati classificati per tipologia in base alla posizione del dispositivo rispetto alla linea di costa, oppure in funzione del posizionamento rispetto alla direzione dominante del fronte d'onda incidente e infine rispetto al principio di funzionamento.

Relativamente alla posizione rispetto alla linea di costa abbiamo dispositivi:

- *Shore-line; q*uesti dispositivi sono sulla costa o con una propria fondazione o incassati in strutture frangiflutti portuali.
- *Near-shore; q*uesti dispositivi normalmente sono installati in una fascia di transizione tra la riva e la zona di acque profonde, tipicamente su fondali di 20–30 m e ad una distanza dalla riva dell'ordine di 500 m.
- *Off-shore; q*uesti dispositivi sono installati in acque profonde (> 40 m) dove le onde si propagano quasi senza risentire del fondale e quindi con minima dissipazione di energia.

Una seconda tipologia di classificazione dei dispositivi dei WECs è basata sulla loro capacità di catturare energia in funzione della capacità di intercettare l'onda, e quindi in funzione del loro posizionamento rispetto alla direzione dominante del fronte d'onda incidente. Secondo questa classificazione i vari dispositivi si dividono in tre categorie principali:

1. Assorbitori Puntuali (point absorbers) - non ricevono energia da una direzione d'onda principale e sono in grado di catturare energia dalle onde in arrivo da ogni direzione.

2. Attenuatori (attenuators) - sono strutture galleggianti, orientate parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda; nel caso di onda incidente la costa perpendicolarmente, il dispositivo è quindi perpendicolare alla linea di costa.
3. Terminatori (terminators) - questi dispositivi sono collocati parallelamente al fronte d'onda; considerando un'onda incidente la costa perpendicolarmente, il dispositivo è questa volta parallelo alla linea di costa.

Un ulteriore modo di classificare i WECs si basa sul loro principio di funzionamento:

1- *Dispositivi a tracimazione (Overtopping Device, OTD), g*alleggianti o fissati a riva, che si basano sull'azione dell'onda che spinge l'acqua su una rampa, dalla quale si riversa in un bacino.
2- *Dispositivi a colonna d'acqua oscillante (Oscillating Water Column, OWC),* sicuramente la categoria di dispositivi più diffusa, che si basano sull'azione di una colonna d'acqua oscillante all'interno di un contenitore chiuso.
3- *Zattere articolate (Wave Activated Bodies, WAB),* in cui le onde attivano movimenti di oscillazione relativi o tra i componenti modulari del sistema oppure tra una parte del sistema ed un riferimento fissato.

I WECs sono installati in un ambiente aggressivo, ove si richiede il loro corretto funzionamento per un lungo periodo di tempo, possibilmente senza necessità di interventi di manutenzione. Quindi i materiali strutturali impiegati per la fabbricazione devono essere valutati con accuratezza al fine della sopravvivenza dell'intero impianto nell'ambiente marino. Sono stati quindi analizzati in dettaglio i materiali per i componenti strutturali principali dei dispositivi di conversione, con particolare attenzione alla loro sopravvivenza in ambiente marino, che significa resistenza alla corrosione, fratture e crescita marina. I materiali analizzati sono stati l'acciaio, il calcestruzzo e le plastiche rinforzate e gomme. Per ciascun materiale sono stati evidenziati pregi e difetti sia nella fase di costruzione dei WECs che in quella di manutenzione. Per la realizzazione di un impianto di WECs, occorre considerare l'intero ciclo di vita di tali dispositivi, e dunque procedere secondo le seguenti fasi:

- Selezione del sito
- Valutazione delle Risorse Locali
- Problematiche di connessione alla rete elettrica di distribuzione
- Produzione dei dispositivi
- Messa in funzione e prove in mare
- Installazione, Funzionamento e Manutenzione
- Dismissione

In modo analogo a quanto avviene per gli altri progetti di produzione di elettricità da fonte rinnovabile, prima che un convertitore di energia da onda (o più convertitori riuniti in parco) sia installato e fornisca elettricità alla rete, è necessario identificare e attrezzare un sito idoneo. Il processo di selezione del sito appropriato per l'installazione dei WECs deve basarsi su alcune specifiche valutazioni: la stima della risorsa energetica, la conoscenza dettagliata della batimetria del sito, la pianificazione delle strutture di supporto per l'installazione e manutenzione e la definizione dei percorsi dei cavi sottomarini per la connessione alla rete elettrica.

La valutazione delle risorse locali consiste nella stima del clima meteo-marino effettuata mediante analisi di dati provenienti da serie storiche, oppure mediante modelli numerici. Oltre alla valutazione del clima tipico è necessario valutare la statistica delle onde estreme per stabilire i carichi massimi che le strutture dovranno sopportare. Per descrivere le fasi di produzione, installazione, messa in esercizio e manutenzione di un *WEC* del tipo *WAB (Wave Absorber)*, è stato preso in considerazione il dispositivo Pelamis (Figura 102), dal momento che, giunto alla commercializzazione, ha maturato un'esperienza più vasta in queste fasi rispetto agli altri convertitori. La produzione dei WECs Pelamis avviene in 3 fasi significative:

1. fabbricazione, riempimento e messa in funzione dei moduli di conversione;
2. fabbricazione, riempimento e messa in funzione dei tubi e del componente frontale (naso);
3. assemblaggio finale e messa in funzione pre-installazione.

Una volta assemblate, le macchine sono sottoposte a messa in esercizio e prove in mare, prima di essere installate in un parco.

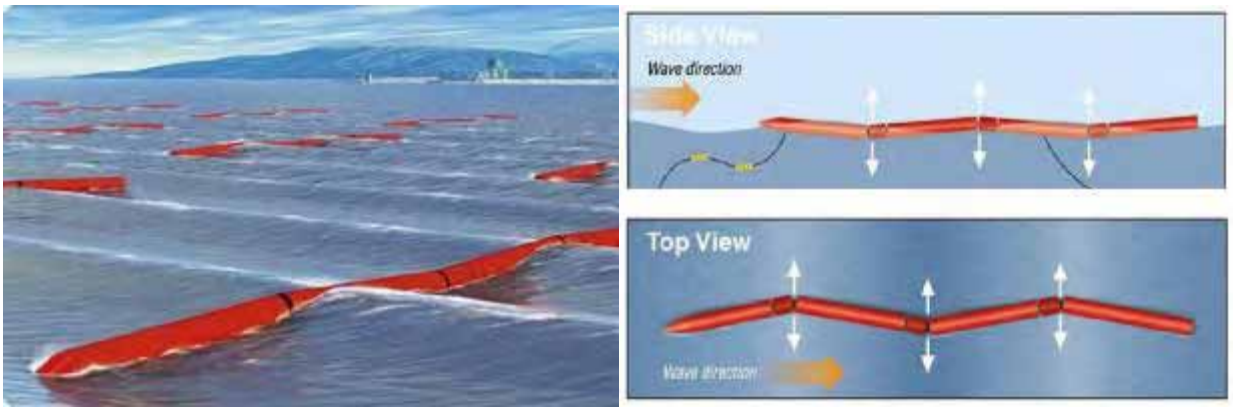


Figura 102. Esempio di dispositivo attenuatore: PELAMIS

Durante la vita utile del progetto, è richiesto un lavoro di ispezione programmata e di manutenzione alle macchine mediante una idonea attrezzatura. Questo lavoro dovrebbe essere condotto durante il periodo stagionale di minore energia ondosa, e dovrebbe, in funzione del numero di macchine, richiedere soltanto la rimozione dal sito di una macchina alla volta.

Nel caso di Pelamis, il sistema di supporto per la manutenzione comprende:

- una banchina strutturalmente solida di lunghezza sufficiente;
- uno spazio di manovra idoneo per ancoraggio e disancoraggio;
- un'area riparata da condizioni meteorologiche ostili;
- la disposizione di un piano di accesso per i veicoli;
- condizioni della banchina idonee per l'impiego di gru mobili;
- la disposizione di uno spazio adiacente per lo stoccaggio e il supporto dell'attrezzatura;
- una rotta di navigazione sicura da e per il sito offshore;
- una rotta di navigazione sicura da e per il sito di fabbricazione.

Nel progettare un impianto WEC, non si può non predisporre una dettagliata valutazione di impatto ambientale (VIA), che allo stato attuale non è stato ancora standardizzata e dunque viene delineata sulla base dei dati disponibili e della esperienza acquisita. Il processo di VIA si compone delle seguenti fasi sequenziali:

- la descrizione delle attività del progetto e delle caratteristiche ambientali del sito prescelto;
- la identificazione delle possibili interazioni ambientali e la scala dei potenziali impatti;
- la identificazione delle misure di gestione e mitigazione e la stima degli impatti residui;
- la definizione degli impegni da assumere nell'ambito del progetto.

E' stata affrontata nel dettaglio la metodologia per predisporre la valutazione d'impatto ambientale tenendo conto dell'intero ciclo di vita del convertitore. Nello specifico si è considerata la procedura di valutazione e stesura del documento di VIA, le principali problematiche per la VIA di un WEC, vale a dire: l'impatto visivo, acustico, impatto sugli habitat costieri e marini, cambiamenti locali dei processi di trasporto solido, rilasci tossici, e conflitti d'uso del mare.

Un'altra tematica affrontata è stata quella degli ancoraggi, che costituiscono uno degli aspetti progettuali di maggiore interesse – data la scarsa affidabilità e/o elevato costo dei progetti sinora messi a punto - nel caso di installazione di convertitori galleggianti.

Esistono ad oggi uno svariato numero di brevetti relativi a convertitori per la produzione di energia da onda, dei quali però sostanzialmente solo uno, il Pelamis, ha raggiunto lo stadio commerciale ed è stato installato al largo del Portogallo nella prima *wave farm*.

La impossibilità di raggiungere lo stadio della commercializzazione è essenzialmente dovuto alla immaturità della tecnologia, ed in particolare:

- alla modesta efficienza di conversione ottenibile dai sistemi di generazione,
- alla scarsa affidabilità dei sistemi di ancoraggio,
- alle problematiche non ancora efficientemente risolte dello stoccaggio di energia in situ e/o del trasferimento a terra della energia prodotta.

Il punto di maggior criticità per la buona riuscita di un sistema WEC è sicuramente l'ottimizzazione dei suoi costi rispetto alla stabilità, alle performance idrauliche e al rendimento energetico del dispositivo. Nelle prospettive

future risulta sicuramente promettente l'installazione di WEC in parchi riducendo così i costi di connessione alla rete e aumentando l'affidabilità della produzione energetica.
Nel corso del progetto sono stati presentati tre dispositivi di conversione (DEXA, LEANCON e SSG) che, per motivi diversi (impatto visivo, impatto ambientale, durabilità, tipologia di conversione della energia ondosa), potrebbero risultare particolarmente idonei ad installazione nei mari Italiani e per i quali sono disponibili risultati di qualità direttamente verificata in merito alla *performance*. Il DEXA è un convertitore di energia ondosa di tipo "Wave Activated Body" (WAB) o "zattera articolata (schema di un prototipo in Figura 103). Il dispositivo è caratterizzato da una struttura semplice: due pontoni incernierati in mezzeria, ove è presente un sistema di estrazione dell'energia o Power Take-Off (PTO), basato su una tecnologia di trasmissione della potenza a bassa pressione (denominata "Aquagear").

Figura 103. Rappresentazione del convertitore di energia ondosa di tipo WAB DEXA

Il Leancon (Figura 104), sviluppato dal gruppo LEANCON Wave Energy, è un dispositivo galleggiante di tipologia MAWEC (Multi Absorbing Wave Energy Converter), OWC (Oscillating Water Column). Il sistema SSG sviluppato dalla WaveEnergy AS (Stavanger, Norvegia) consiste in una struttura in calcestruzzo composta da una rampa lato-mare ed uno o più serbatoi posizionati uno sull'altro (schema in Figura 105). La produzione media annua di energia di un singolo dispositivo in scala 1:1 è E_a = 155 MWh/anno, che coprirebbe il fabbisogno di circa 50 famiglie, supponendo un fabbisogno giornaliero pari a 8 kWh/giorno. Prove in laboratorio sono state compiute anche sul modello in scala 1:40 del dispositivo LEANCON rispetto alle dimensioni reali (larghezza 240 m e lunghezza 117 m), ancorato in punta e immerso di 2,8 m; d Dalle prove si è desunto che l'energia media annua estraibile da un singolo Leancon a Cagliari è di 1,55 GWh/anno.

Figura 104. Immagine del Leancon in scala 1:10 dinanzi al fiordo di Aalborg

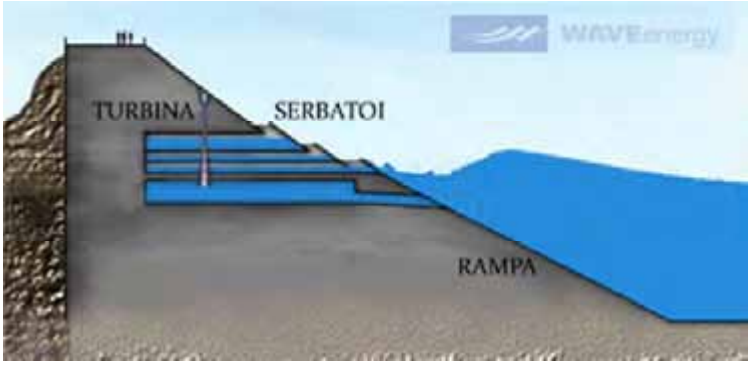


Figura 105. Schema del sistema Seawave Slot-Cone Generator (SSG)

Per quanto riguarda il dispositivo SSG, le analisi sono state condotte sulla base dei risultati ottenuti con un modello in scala 1:30 rispetto al prototipo. Il modello è stato sistemato in un canale di 25 m di lunghezza, 1,5 m di larghezza, e 1 m di profondità, che consente una profondità di acqua massima di circa 75 cm. Il canale è attrezzato, ad un estremità, con una pala di tipo a pistone, avente una corsa di approssimativamente 70 cm, in grado di generare onde 2D. All'altra estremità del canale, invece, è stata realizzata una spiaggia in ciottoli, così da dissipare l'energia generata a tergo della struttura.

Dall'analisi degli esperimenti in vasca è risultato che con un singolo modulo di SGG, di larghezza 15 m a scala reale, si ha una produzione di energia media annua pari a 0,21 GWh/anno se progettata a due serbatoi e di 0,25 GWh/anno nel caso di tre serbatoi. Dimensionando SSG e relativa turbina multistadio per condizioni non estreme, ad esempio lo stato ondoso W8, si ottiene una produzione di potenza annua non inferiore al 70% di quella totale ottenibile dimensionando il dispositivo per sfruttare anche le onde estreme. Considerando dunque la possibilità di integrare vari moduli (40) di SSG a tre serbatoi nel mantenimento di un tratto di 600 m dei moli foranei, si otterrebbe una produzione media annuale di energia E_a = 10 GWh/anno.

In conclusione, il confronto della produzione energetica media annua –valutata per omogeneità solo in termini di potenza idraulica e quindi prescindendo dalle perdite meccaniche e nei cavi di allacciamento alla corrente - fornisce, sulla base di un fabbisogno stimato di 8 kWh/giorno/famiglia:

- 0,25 GWh/anno – fabbisogno di circa 86 famiglie per 1 modulo SSG a tre serbatoi, largo 15 m e installato a riva;
- 0,15 GWh/anno – fabbisogno di circa 51 famiglie per 1 modulo di DEXA, largo 18 m e installato su un fondale di 11 m;
- 1,55 GWh/anno – fabbisogno di circa 530 famiglie per 1 modulo di LEANCON, largo 240 m e installato su un fondale di 30 m.

Considerate le dimensioni molto diverse dei dispositivi, è bene ragionare per metro lineare, e dunque si ottiene:

- 16,67 MWh/anno/m –SSG a tre serbatoi, installato a riva;
- 8,82 MWh/anno/m –DEXA, installato su un fondale di 11 m;
- 6,48 MWh/anno/m –LEANCON, installato su un fondale di 30 m.

Al fine di combinare la conversione di energia con altri usi dei dispositivi e renderli pertanto economicamente realizzabili, si consiglia l'integrazione del SSG nei moli portuali anche durante operazioni di manutenzione e/o adeguamento del porto, l'installazione del DEXA in parchi per la protezione della costa e del LEANCON in prossimità di una piattaforma (per estrazione idrocarburi, per itticoltura o altro) esistente o in costruzione al largo per sopperire a parte del fabbisogno energetico della stessa.

Un elemento fondamentale da considerare nella scelta è lo spazio marino occupato, stanti i numerosi conflitti d'uso del mare (turismo, rotte commerciali, altre installazioni per itticoltura, estrazione gas, etc.). Supponendo una produzione energetica annua di target di 15 GWh/installazione/anno (corrispondente al fabbisogno di oltre 5100 famiglie), possiamo confrontare gli spazi necessari alle diverse installazioni:

- integrazione di n. 60 moduli dell'SSG in 900 m dei moli portuali;
- posizionamento di n. 100 dispositivi di tipo DEXA allineati su 4 file, a fronte di uno spazio necessario per installare il parco di circa 1 km lungo costa e 0,3 km perpendicolarmente alla costa (sulla base dei dati sperimentali, si considera una distanza mutua pari alla larghezza di 1,5 dispositivi lungo costa e alla lunghezza di 1,0 dispositivo perpendicolarmente alla costa);
- posizionamento di n. 9 dispositivi di tipo LEANCON su 3 file, a fronte di uno spazio necessario per installare il parco di circa 1,2 km lungo costa e 0,6 km perpendicolarmente alla costa (sulla base dei dati sperimentali, si considera una distanza mutua pari alla larghezza di un dispositivo lungo costa e alla lunghezza di un dispositivo perpendicolarmente alla costa). L'installazione, confrontabile come occupazione di spazio a quella del parco dei DEXA, tuttavia ha una producibilità di energia elettrica che non arriva a 15 GWh/anno.

Energia dalle correnti marine

Di seguito riportiamo una sintesi dell'analisi delle tecnologie di conversione delle correnti marine. La potenza di una corrente idrica di velocità v, densità ρ, incidente su un'area A normale ad essa è esprimibile come:

$$P = \frac{1}{2}\iint_A \rho\, \mathrm{v}^3\, dA = \frac{1}{2}\alpha\, \rho\, V^3 A$$

essendo α il coefficiente di Coriolis, rapporto tra la media cubica della velocità ed il cubo della media lineare V sulla sezione, ed è pari ad uno nel caso di corrente uniforme e lievemente maggiore di uno negli altri casi. Poiché la densità dell'acqua è circa 800 volte quella dell'aria le macchine destinate ad intercettare tali potenze, derivate

dai generatori eolici, possono, a parità di altre condizioni, avere dimensioni più contenute rispetto a questi: ad esempio una corrente idrica di solo 1 m s^{-1} possiede una potenza di circa 500 W m^{-2}. Le correnti marine o fluviali sono inoltre, nelle quasi totalità dei casi, unidirezionali o bidirezionali e pertanto non sono richiesti i complessi dispositivi di allineamento dell'angolo di imbardata tipici dei generatori eolici.

L'evoluzione nel tempo di tali correnti è facilmente prevedibile ed il fenomeno è addirittura deterministico nel caso delle correnti dovute alle maree astronomiche. L'utilizzo dell'energia prodotta sarà pertanto facilmente gestibile nell'ambito della produzione di base della rete elettrica integrata nazionale. Nel caso invece di reti elettriche locali isolate, quali quelle delle isole per le correnti marine o delle comunità montane per quelle fluviali, occorrerà predisporre un sistema di accumulo di energia per adeguare il diagramma di produzione a quello del carico richiesto. In entrambi i casi, data la grande disponibilità di acqua sembrerebbe opportuno ricorrere per l'accumulo a piccole centrali idroelettriche reversibili, o ad accumulatori elettrochimici nei casi di piccole potenze. Nei casi poi di sistemi isolati in cui fosse economico produrre più energia di quella richiesta, si potrebbe pensare ad esportarla sotto altre forme, come ad esempio producendo idrogeno. Fino a pochi anni fa, gli sforzi per ricavare energia dalle maree si sono concentrati sui sistemi che usano impianti a sbarramento di marea, dei quali il più importante è stato l'impianto da 240 MW installato a La Rance, vicino St. Malo, in Francia. La costruzione di questo impianto durò 7 anni e fu completata nel 1967. Nella diga sono istallate 24 turbine a bulbo, ciascuna di 5,4 m di diametro e 10 MW di potenza. Un impianto simile più piccolo (20 MW) fu attivato nel 1984 ad Annapolis Royal, sulla baia di Fundy, in Canada. I principali dispositivi di conversione dell'energia di una corrente fluida in energia meccanica e quindi in elettrica, attualmente in uso, possono essere classificati in base al principio di funzionamento in:

- Turbine ad asse orizzontale
- Turbine ad asse verticale
- Dispositivi ad ala oscillante
- Dispositivi ad effetto Venturi
- Zattere articolate instabili
- Dispositivi magnetofluidodinamici

Altre classificazioni potranno essere condotte in base ad altri criteri quali i sistemi di ancoraggio o di fissaggio al fondo, il diverso impatto ambientale o l'essere di maggiore o minore intralcio ad altre attività marittime o fluviali quali la navigazione o la pesca, il tipo di macchina elettrica utilizzata ed il conseguente tipo di corrente elettrica prodotta.

Le **turbine ad asse orizzontale** sono i dispositivi che utilizzano tecnologie più tradizionali, derivate sia dalle conoscenze sui generatori eolici sia dalla ben più lunga conoscenza sui propulsori marini. Hanno un basso impatto ambientale potendo, in linea di principio, risultare completamente sommersi ad una profondità tale da non costituire intralcio alla navigazione, anche se nei principali prototipi finora costruiti vi è sempre una parte affiorante per renderne facile sia l'istallazione che la manutenzione. I principali dispositivi finora costruiti utilizzanti turbine ad asse orizzontale hanno rendimenti complessivi intorno al 15 – 20% e vengono qui di seguito mostrati solo alcuni prototipi.

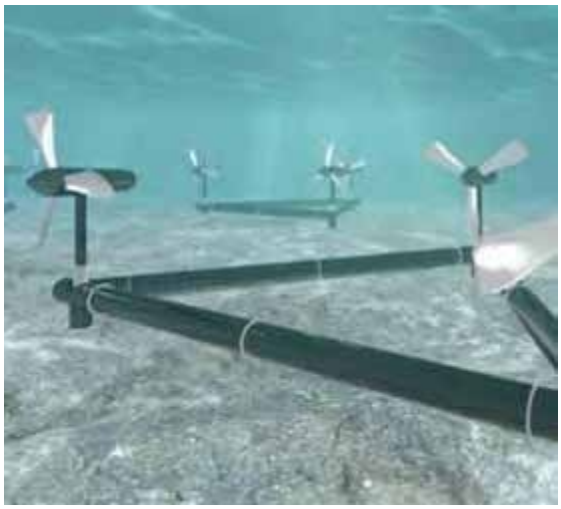


Figura 106. Impianto DeltaStream

Figura 107. Seagen

Le **turbine ad asse verticale**, o lievemente inclinato nei dispositivi galleggianti, sono derivate dalle turbine eoliche Darreius e presentano alcuni vantaggi rispetto a quelle ad asse orizzontale quali un miglior rendimento, la omnidirezionalità sul piano orizzontale, la possibilità di avere parte dei dispositivi quali ad esempio il

moltiplicatore di giri e la parte elettrica fuori dall'acqua, ed una maggiore semplicità di montaggio e manutenzione. Per contro hanno alcuni difetti quali una coppia non costante durante l'intero ciclo il che comporta la presenza di vibrazioni e talvolta l'avviamento alla rotazione non è spontaneo. In genere poi avendo cospicue parti emerse hanno un maggiore impatto visivo ed ambientale.

Figura 108. Free Flow Turbine

Figura 109. Turbina Open-Hydro

Tra le turbine ad asse verticale quella già operativa è l'italiana Kobold della società italiana Ponte di Archimede, che è stata progettata presso il Dipartimento di Progettazione Aeronautica (DPA) dell'Università "Federico II" di Napoli, ed è attualmente la prima di quelle ad asse verticale ad essere istallata per lo sfruttamento delle correnti di marea (Figura 110). La turbina Kobold ha un rotore dotato di tre pale disegnate con un profilo ad hoc esente da cavitazione e dotate di un originale sistema di contrappesi che assicuri automaticamente il miglior angolo di incidenza durante l'intero ciclo e che permetta l'avviamento spontaneo della rotazione.

Figura 110. Il generatore a corrente di marea sullo stretto di Messina

Allo stato attuale il sistema ha un'efficienza globale pari a circa il 23%: tale grado di efficienza è comparabile, se non addirittura superiore, a quello delle turbine eoliche che hanno avuto uno sviluppo applicativo più che trentennale. Un tale risultato è estremamente incoraggiante ai fini di un ulteriore approfondimento della ricerca. Sono in corso test migliorativi riguardanti i componenti per la trasmissione meccanica e la connessione con il generatore elettrico. I dispositivi oscillanti sono dotati di alette che si muovono avanti e indietro in un piano perpendicolare alla corrente di marea, al posto delle pale rotanti. Uno di questi dispositivi utilizza dei pistoni per alimentare un circuito idraulico, che fa girare un motore idraulico e un generatore di energia.
Nei dispositivi ad effetto venturi il flusso di marea viene convogliato in un condotto convergente che ne determina un aumento di velocità ed una diminuzione di pressione. Tale differenza di pressione può essere sfruttata in un circuito secondario mediante una turbina. L'efficienza del sistema è decisamente bassa, ma ha l'innegabile

vantaggio che buna parte del sistema può essere istallata a terra garantendo così un accesso relativamente semplice a tutte le parti in movimento ed all'attrezzatura elettrica.

Nei dispositivi magnetofluidodinamici la conversione diretta di energia idrodinamica in elettrica è realizzata senza parti meccaniche in movimento. Tali dispositivi sono costituiti da un circuito elettrico che opera come lo statore di una dinamo, mentre il rotore è costituito dalla stessa acqua marina. Lo studio di tali dispositivi è al momento puramente teorico e condotto nell'ambito del progetto EMEC Neptune in Olanda.

I dispositivi di conversione dell'energia dovuta alle correnti marine in energia elettrica sono per lo più prototipi per i quali non si ha una sufficiente documentazione tecnica ed un congruo periodo di sperimentazione trattandosi di macchine istallate in tempi recenti. Di nessuno di questi dispositivi, pur dovendo operare in ambiente decisamente ostile, se ne conosce ad esempio il grado di affidabilità. La tecnologia più matura è senza dubbio quella delle turbine ad asse orizzontale, tecnologia derivante da quella dei generatori eolici e che si avvale delle estese conoscenze circa i propulsori navali, che operano già da tempo nello stesso ambiente marino. Tuttavia l'impiego di turbine ad asse verticale sembrano le più promettenti per Il Mediterraneo grazie ai loro maggiori rendimenti con correnti di bassa entità, maggiore semplicità di montaggio e manutenzione, e minore usura potendo risultare emerse sia la parte elettrica che gran parte di quella meccanica. Sotto tale profilo il più avanzato e quello di cui si dispone di ampia documentazione è il progetto Kobold della società italiana Ponte di Archimede.

Principali soggetti esterni coinvolti

I soggetti esterni coinvolti nel seguente progetto di ricerca sono stati:

- **CASPUR**: Consorzio interuniversitario per le Applicazioni di Supercalcolo per Università e Ricerca
- **DICEA**: Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Roma "La Sapienza"
- **DICAM:** Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna "Alma Mater Studiorum".

Consorzio interuniversitario per le Applicazioni di Supercalcolo per Università e Ricerca

Le attività svolte da **CASPUR** queste hanno riguardato:

- L'implementazione del modulo OASIS4 per l'accoppiamento interattivo del modello atmosferico e oceanografico.
- Il "Porting" dei codici numerici per la simulazione del moto ondoso sulla macchina di calcolo ENEA CRESCO.
- L'Implementazione del modulo "GRID-REFINEMENT" per il modello oceanografico MITgcm.

Università di Roma "La Sapienza"

Le attività svolte da **DICEA** hanno riguardato :

- La post elaborazione degli output prodotti dal modello di moto ondoso per la valutazione del potenziale energetico totale associato alle onde.
- La valutazione del potenziale energetico utilizzabile da dispositivi atti alla conversione in energia elettrica.
- La valutazione dell'impatto determinato dall'alta risoluzione orizzontale sulla valutazione del potenziale energetico utilizzabile da turbine sottomarine.

Università di Bologna "Alma Mater Studiorum"

Le attività svolte da **DICAM** hanno riguardato l'analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento dell'energia ondosa dei mari italiani.

Utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO_2

(Referente A. Calabrò)

E' unanime, nel mondo scientifico ed impiantistico-energetico, l'opinione che sarà impossibile sostituire, almeno per qualche decennio, quote significative di combustibili fossili con fonti alternative a basse o nulle emissioni di CO_2, e che quindi è sempre più necessaria l'adozione di soluzioni che limitino gli impatti conseguenti al loro utilizzo, e siano compatibili con gli obiettivi di contenere le alterazioni climatiche.

Queste considerazioni valgono in particolare per il carbone che è il principale combustibile impiegato a livello mondiale per la produzione di energia elettrica (genera circa il 30% dell'elettricità dell'UE, il 50% in USA, il 75% in Cina) e allo stesso tempo quello a maggiore intensità di carbonio. In Italia il livello globale di emissioni di CO_2 è dell'ordine di circa 600 Mt annue, di cui 150 imputabili al settore generazione elettrica.

Il ricorso al carbone per la generazione elettrica, necessario per soddisfare la domanda sempre maggiore di energia, risulta condizionato oltre che dall'impiego di tecnologie pulite sempre più efficaci nella riduzione delle emissioni di macro e micro inquinanti, dall'introduzione di soluzioni in grado di abbattere radicalmente le emissioni di anidride carbonica. Occorre puntare pertanto da un lato al miglioramento delle efficienze energetiche, legate all'innovazione dei cicli termodinamici e all'utilizzo di materiali innovativi, dall'altro allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie di cattura e confinamento della CO_2 (tecnologie CCS).

L'utilizzo di tecnologie CCS può ridurre dell'80-90% le emissioni di CO_2 causate dagli impianti di potenza, con una riduzione di efficienza energetica pari a circa 8-12 punti percentuali. Secondo la IEA, la CCS applicata alla generazione elettrica e alla produzione industriale può contribuire per il 20-28% alla riduzione delle emissioni globali entro il 2050. Molte delle tecnologie CCS sono già disponibili (ad esempio la produzione di ossigeno, i reattori di shift, i processi di estrazione di gas acidi da miscele di gas) ma hanno bisogno di essere integrate opportunamente con l'impiantistica di produzione per minimizzare le perdite energetiche ed i costi aggiuntivi ad esse associate.

Le tecnologie CCS vanno rapidamente acquisendo un ruolo essenziale a livello internazionale ed europeo, tanto da essere ormai considerate ai fini del sistema di "emission trading". La UE si appresta a varare direttive che impongono l'adozione di tali tecnologie negli impianti da realizzare dopo il 2020, e a tal fine promuove, nell'ambito di FP7, la realizzazione di 10-12 impianti dimostrativi in Europa entro il 2015.

A livello internazionale sono in corso numerose iniziative volte ad intensificare la collaborazione fra i diversi Paesi per lo sviluppo e dimostrazione delle tecnologie CCS, e per la definizione di accordi politici sui limiti delle emissioni di CO_2. L'Italia è presente nel Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), nella piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), nei gruppi di lavoro della IEA.

In linea con gli indirizzi europei, una adeguata attività di R&S svolta dall'ENEA e dal sistema della ricerca pubblica, consentirà di conseguire i due macro-obiettivi di interesse strategico che si concretizzano nel contribuire efficacemente alla riduzione delle emissioni italiane di CO_2 e nel consentire al nostro sistema nazionale di limitare i costi della produzione di energia elettrica nel prossimo futuro.

Tutte le tecnologie proposte sono attualmente a differenti stadi di maturazione.

La cattura effettuata a monte della combustione - in sistemi alimentati a carbone e a gas, attuata rispettivamente nei processi di gassificazione del carbone e di reforming del metano, seguiti dalla reazione di CO-shift e della cattura della CO_2 di solito praticata per assorbimento fisico - è attualmente una opzione molto promettente, che potrebbe essere impiegata in sistemi integrati con la gassificazione del carbone (IGCC) o in cicli combinati a gas (NGCC).

L'opzione cattura a valle della combustione implica invece l'utilizzo di sistemi di assorbimento chimico della CO_2 dai gas esausti provenienti da impianti operanti con cicli a vapore in condizioni super-critiche alimentati a polverino di carbone (SC/PCC) o da impianti a ciclo combinato alimentati a gas (NGCC).

Un'ulteriore opzione è quella data dalla ossi-combustione di combustibili fossili, che impiega ossigeno puro come comburente e produce gas esausti con un'altissima percentuale di CO_2, che può essere facilmente separata.

Le maggiori barriere allo sviluppo e alla diffusione di queste tecnologie sono rappresentate principalmente dal costo su larga scala dei progetti dimostrativi (dell'ordine delle centinaia di M€/impianto), dai costi di gestione, dalla necessità che lo stoccaggio sia permanente e sicuro e dalla scarsa implementazione di normative specifiche per il momento assenti o disomogenee a livello internazionale.

Nel settore della Ricerca e Sviluppo delle tecnologie di cattura e sequestro della CO_2 (CCS), vi è un forte impegno internazionale rivolto da una parte alle problematiche di ottimizzazione impiantistica, ai fini di una applicazione immediata delle CCS nei prossimi dimostrativi in fase di progetto, dall'altra alla messa a punto di tecnologie completamente nuove che consentano di ottenere risultati prestazionali, in termini di efficienza e di costo, confrontabili con quelli delle tecnologie convenzionali attuali.

Il primo aspetto, legato all'applicazione immediata nei dimostrativi, tende principalmente a rendere più efficiente possibile l'integrazione tra l'impiantistica energetica esistente ed i processi per la cattura ed il sequestro della CO_2 ad essa applicati. Ciò si ottiene rivolgendo gli sforzi al miglioramento delle attuali tecnologie di gassificazione e di combustione dei combustibili fossili, ed in particolare del carbone, alla messa a punto di processi di cattura della CO_2 meno penalizzanti dal punto di vista energetico, ed infine all'ottimizzazione del sistema integrato. Una possibilità, che è da considerarsi molto interessante in relazione alla decrescente disponibilità di petrolio, è quella che prevede la trasformazione del carbone in combustibile liquido ("coal to liquid", CTL): questo processo si presta ad essere convenientemente integrato con le tecnologie CCS, in particolare con la filiera delle tecnologie pre-combustion, in quanto viene a tal fine utilizzato sia il syngas uscente dai sistemi di gassificazione e di trattamento, sia parte della CO_2 separata a valle dei sistemi di cattura. Le tecnologie di base dei sistemi CTL sono già state sviluppate, ma si richiedono innovazioni specialmente in relazione alle tipologie e differenti caratteristiche delle materie prime impiegate ed alla integrazione con i sistemi pre-combustion sopra accennati.

Il secondo aspetto della ricerca, legato invece alle tecnologie avanzate di nuova concezione, presuppone, per quanto riguarda la filiera delle tecnologie pre-combustion, la messa a punto di processi caratterizzati da temperature di cattura più elevate di quelle convenzionali (dell'ordine dei 500-600 °C) e da una più elevata integrazione tra i processi di gassificazione, pulizia e decarbonizzazione del syngas, ricorrendo anche a sistemi particolarmente compatti che realizzano tali processi in uno stesso componente.

Per quanto riguarda la filiera tecnologica dell'ossi-combustione, le ricerche più avanzate tendono alla messa a punto di processi che, sfruttando particolari condizioni di combustione "senza fiamma" (mild-combustion) ottenute mediante opportuna diluizione con miscele di vapore e CO_2, in concomitanza con cicli termodinamici innovativi di tipo gas-gas e gas-vapore e umidificato, sono caratterizzati da un elevato grado sia di pulizia dei prodotti gassosi che di efficienze di conversione energetica.

Per quanto riguarda infine la filiera post-combustion, l'obiettivo delle ricerche più avanzate è la riduzione delle penalizzazioni energetiche introdotte dalla tecnica, agendo sia sulla messa a punto di solventi o sorbenti innovativi, che presentano valori di energia e/o di temperatura di rigenerazione più bassi, sia anche in questo caso sulla ottimizzazione impiantistica.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Il progetto è costituito da una serie di attività finalizzate allo sviluppo ed alla dimostrazione di tecnologie basate sull'impiego del carbone sia per la produzione di elettricità, con bassissime emissioni di gas serra, sia per la produzione di combustibili liquidi o gassosi e che prevedano contestualmente la separazione della CO_2 ed il suo stoccaggio.

In linea con quanto sopra detto, l'obiettivo finale del progetto è quello di favorire lo sviluppo di tecnologie avanzate per un utilizzo pulito dei combustibili fossili e del carbone in particolare, per poter supportare la realizzazione di impianti dimostrativi e per superare le principali problematiche legate alla penalizzazione, in termini di costo e di rendimento, che lo stato attuale delle tecnologie CCS implicano nelle applicazioni energetiche.

Le attività sono state sviluppate nell'ambito delle due importanti infrastrutture di ricerca denominate COHYEXCE e ZECOMIX, dislocate rispettivamente nei siti di Sotacarbo in Sardegna e della Casaccia.

I risultati al termine dell'attività sono riassumibili nei punti seguenti:

- miglioramento delle tecnologie di gassificazione del carbone, con particolare riferimento a carboni difficili come quello del Sulcis;
- messa a punto di sistemi di produzione di syngas e di combustibili liquidi da carbone del Sulcis;
- sviluppo di bruciatori idonei al loro impiego in sistemi turbo-gas ad alta efficienza e basse emissioni;
- messa a punto delle migliori tecnologie per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione;
- messa a punto di sistemi di cattura della CO_2 e di pulizia gas ad elevato rendimento energetico;
- analisi dei sistemi di stoccaggio ed individuazione del sito più adatto (nella zona del Sulcis);
- studio di fattibilità di un impianto dimostrativo completo, munito di sistema di sequestro geologico, da realizzarsi nella zona del Sulcis.

Gli obiettivi sono riassumibili nelle seguenti 3 linee di attività:

1. Produzione e trattamento combustibili gassosi e liquidi da carbone;
2. Aumento dell'efficienza delle tecnologie di cattura della CO_2 con produzione di elettricità "zero emission";
3. Tecnologie di sequestro e utilizzo della CO_2 e progettazione di un impianto dimostrativo.

Produzione e trattamento combustibili gassosi e liquidi da carbone

Tale attività si articola in tre linee:

- **Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione**; l'attività è finalizzata alla messa a punto ed ottimizzazione di processi ed apparecchiature per la gassificazione del carbone a letto fisso, nonché di sensoristica innovativa, attraverso attività sperimentali condotte negli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo e presso il C.R. Casaccia, operando con diversi agenti gassificanti ed in diverse condizioni di funzionamento.
- **Studi e test su processi avanzati di gassificazione/pirolisi e pulizia syngas integrati**, per l'utilizzo di carboni ad alto contenuto di tar e zolfo; si prevede di approfondire le conoscenze sui processi di devolatilizzazione e pirolisi applicati a tipologie di carbone di difficile utilizzo con le attuali tecnologie a causa dell'elevato contenuto di tar e zolfo, al fine di mettere a punto un processo innovativo di produzione di syngas pulito e di char a basso contenuto di zolfo.
- **Analisi del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone *(Coal To Liquid)***; trattasi di attività di studio e definizione della configurazione impiantistica più idonea di un processo integrato di produzione di combustibili liquidi (Coal To Liquid) e gassosi (idrogeno) con cattura della CO_2.

Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

Una parte delle attività di sperimentazione è stata svolta presso il Centro di Ricerche ENEA di Casaccia, dove è ubicato il mini impianto gassificatore updraft denominato GESSICA (**GE**neratore **S**perimentale di **SI**ngas da CArbone), dotato di sensoristica industriale e di un sistema di acquisizione e controllo capace di operare sia in maniera automatica che manuale sui principali parametri di processo. Oltre ai test veri e propri di gassificazione sono state effettuate anche due prove sperimentali in cui il reattore è stato impiegato come combustore al fine di testare il processo di assorbimento dell'anidride carbonica dai fumi.

L'obiettivo delle attività sperimentali condotte sul mini impianto è stato quello di testare le modalità di esercizio per il miglioramento del processo di produzione di syngas, nonché di testare strumentazione e sensoristica atta al controllo del processo. Per questo sono state condotte prove e test relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature.

Al fine di approfondire le conoscenze e di migliorare le prestazioni del processo di gassificazione impiegato nell'impianto pilota Sotacarbo, sono invece state effettuate diverse sperimentazioni in cui è stato possibile testare il processo in diverse condizioni operative. Gli impianti su cui sono state effettuate le sperimentazioni comprendono una sezione di gassificazione e due linee di trattamento del syngas per la produzione di idrogeno ed energia elettrica.

Attraverso l'attività di sperimentazione si è caratterizzato il processo e si sono definite le modalità e i principali parametri con cui operare per il raggiungimento delle condizioni di esercizio ottimali e stazionarie; si sono inoltre valutati i tempi e le modalità di risposta del sistema al variare dei parametri di ingresso quali la tipologia di agenti gassificanti e la tipologia di carbone utilizzato.

In merito all'attività di cleaning del syngas ottenuto dalla gassificazione si sono svolte attività di monitoraggio del contenuto in polveri del syngas durante l'esercizio degli impianti presso le infrastrutture Sotacarbo ed ENEA al fine di raccogliere informazioni utili alla conduzione delle apparecchiature impiegate nel clean up del gas.

In generale gli impianti di produzione di gas di sintesi da carbone sono dotati di diversi sistemi di pulizia del gas e di un abbattimento delle emissioni. Infatti nel gas grezzo proveniente dal gassificatore vengono trascinate particelle sia solide che liquide costituite da acqua, tar, ceneri e carbone non reagito. Risultano altresì presenti in concentrazione non trascurabile tutta una serie di composti dello zolfo tra cui H_2S e COS oltre ad altri inquinanti. Per questo motivo gli impianti sono dotati di componenti e sistemi di clean up. Diventa infatti essenziale per il corretto funzionamento degli impianti stessi e per salvaguardare l'ambiente l'utilizzo di sistemi di pulizia ed abbattimento delle emissioni.

Le attività svolte hanno riguardato la sperimentazione di alcuni sistemi di trattamento del syngas da carbone. In particolare sono state svolte delle analisi qualitative volte a caratterizzare l'efficacia dei sistemi di cleanup con misure dello sporcamento effettuate a monte e a valle dei componenti che adempiono alla funzione di pulire il gas. Uno dei metodi qualitativi per valutare la presenza di polveri e particelle sospese è quella di misurare l'opacità del gas. Pertanto lo strumento utilizzato nell'attività svolta per i rilievi dell'opacità del syngas e dei fumi di

combustione è stato l'opacimetro che ha fornito una misura di "sporcamento" del syngas campionato espressa tramite l'indice di Bacharach. L'attività ha riguardato test effettuati durante il normale esercizio dell'impianto.

Al fine di effettuare una misura quantitativa del contenuto in particolato e poter correlare tale informazione a quelle provenienti dall'utilizzo dell'opacimetro si è allestito un sistema di campionamento polveri operante in continuo costituito da un filtro e pompa di aspirazione ed una metodologia che fornisse informazioni ponderali sul contenuto in polveri del gas. Tale attività ha permesso di fornire informazioni utili al funzionamento delle apparecchiature adibite al clean-up in differenti condizioni di esercizio.

Altre attività hanno riguardato lo studio della desolforazione del syngas attraverso l'utilizzo di sorbenti a base di ZnO. Presso i laboratori ENEA, avvalendosi della disponibilità di impianti, sezioni di prova e laboratori dotati di strumentazione e diagnostica avanzata e dell'esperienza del personale addetto, si sono svolte sperimentazioni su reattoristica in media scala finalizzate a valutare e a caratterizzare il processo di desolforazione del syngas a caldo su sorbenti commerciali a base di ZnO. A tale scopo si è realizzato un setup sperimentale con cui si sono effettuati test di rimozione dell'H_2S su sorbenti di natura commerciale per andare a testare il loro funzionamento in differenti condizioni operative, ossia a differenti valori di temperatura, ed i tempi di breakthrough.

I test sperimentali sulla piattaforma pilota sono stati quasi tutti eseguiti con carbone sudafricano, a basso tenore di zolfo, miscelato in alcuni test con carbone Sulcis, ad alto tenore di zolfo, o pellet di legno. Tali combustibili, nonché le miscele degli stessi, sono stati caratterizzati nei laboratori Sotacarbo. In particolare, di tali combustibili è stata effettuata l'analisi immediata (mediante termogravimetro), l'analisi elementare (mediante il determinatore CHN/S) e l'analisi calorimetrica per la determinazione del potere calorifico superiore.

Sono state effettuate prove di gassificazione con carbone di granulometrie differenti e controllate mediante vagliatura, in particolare comprese tra 5 e 8 mm e tra 8 e 12 mm. Come atteso, una riduzione delle dimensioni medie delle particelle di combustibile comporta, in generale un aumento della potenzialità del reattore (che passa da 6,6 kg/h nel caso della classe granulometrica 8-12 mm a 7,2 nel caso della classe 5-8 mm) e un conseguente aumento della portata di syngas prodotto (da 35,8 a 38,5 kg/h) anche se spesso si manifestano problemi dovuti a occlusioni e hot spot nel letto. Nel complesso, il syngas prodotto impiegando la granulometria minore è caratterizzato da un maggiore potere calorifico inferiore (4,56 contro 3,87 MJ/kg) e da un più elevato contenuto di idrogeno (16,12 contro 15,22%, in volume) e soprattutto di monossido di carbonio (22,15 contro 17,83%).

E' stato valutato anche l'effetto del surriscaldamento degli agenti gassificanti. Per ovviare all'elevato tasso di condensa del vapore di processo causato dal miscelamento con l'aria ambiente alimentata al processo, è stato introdotto un sistema che consente il riscaldamento della miscela aria/vapore a valori di 300 °C e oltre. Il preriscaldamento della miscela aria/vapore consente di avere un syngas notevolmente più ricco in idrogeno e conseguentemente caratterizzato da un maggiore potere calorifico inferiore (6,46 MJ/kg contro 3,96 MJ/kg). È importante inoltre osservare che, nel corso delle prove sperimentali successive all'introduzione del riscaldatore, è stata riscontrata una maggiore stabilità del processo di gassificazione e una minor concentrazione di ossigeno nel syngas (grazie a una maggiore reattività degli agenti gassificanti). L'effetto dell'introduzione del carbone Sulcis nella miscela combustibile è stato valutato nel corso della campagna sperimentale. Sono state effettuate due prove durante le quali sono state impiegate miscele di carbone sudafricano e carbone Sulcis. Nel primo caso la miscela conteneva il 10% in volume di carbone Sulcis, mentre nel secondo la percentuale è stata ridotta al 5%.

Altresì è stata testata la co-gassificazione di carbone e biomasse. Nel corso della campagna sperimentale sono state effettuate due prove impieganti come combustibile una miscela di carbone sudafricano e biomasse (pellet di legno). In particolare, entrambe le prove sono state effettuate utilizzando carbone sudafricano con granulometria compresa tra 8 e 12 mm miscelato con un 10% (in volume, corrispondente al 7% circa in peso) dello stesso pellet di legno comunemente impiegato per la fase di avviamento del gassificatore. Le prove sperimentali sono state caratterizzate da un'elevata stabilità del processo, con la produzione di un syngas di composizione pressoché costante. In particolare la concentrazione volumetrica media di idrogeno è stata del 22,17%, mentre quelle riscontrate per CO e CO_2 ammontano al 18,67 e 10,52%, rispettivamente. Il consumo di miscela combustibile è stato mediamente pari a 11,5 kg/h (con una portata d'aria gassificante di circa 41 kg/h), che ha consentito la produzione di circa 54 Nm^3/h di syngas grezzo, con un rendimento di gas freddo dell'ordine del 92%.

Il funzionamento in continuo è stato testato in una prova di gassificazione di lunga durata. Tale prova, della durata di circa 32 ore è stata effettuata impiegando una miscela di carbone sudafricano (95% in volume) e carbone Sulcis (5% in volume) a granulometria controllata (5-8 mm). In termini generali, nel corso della prova è stata impiegata mediamente una portata di vapore pari a 8,15 kg/h e una portata d'aria di 42,80 kg/h. La prova sperimentale è stata caratterizzata da una forte instabilità del processo e durante la fase di maggiore stabilità è stata riscontrata una concentrazione media di H_2, CO e CO_2 pari rispettivamente al 20,4% vol, al 16,5% vol e al 11,7% vol .

Altri test hanno riguardato la gassificazione con CO_2 e O_2 come agenti gassificanti. Al fine di valutare le prestazioni del processo di gassificazione alimentato con miscele di ossigeno e anidride carbonica è stato effettuato un particolare test sperimentale, dove è stato gassificato carbone sudafricano a granulometria controllata (8-12 mm) e, come agente gassificante, è stata utilizzata una miscela di CO_2 e O_2 caratterizzata da una concentrazione di ossigeno del 20% in volume. Nel corso di tale prova non è stato inviato vapore al fine di inibire la reazione di water-gas shift massimizzando così la concentrazione di monossido di carbonio nel syngas grezzo. Durante la prova sperimentale, è stato possibile rilevare un'elevata stabilità del processo, in cui il syngas è stato caratterizzato da una concentrazione volumetrica di idrogeno (6-7%, con valore medio pari al 6,83%) molto più bassa rispetto a quella dei test convenzionali (per effetto del mancato apporto di vapore) e con CO e CO_2 caratterizzati da concentrazioni medie del 30,51% e del 46,14%, rispettivamente. Dallo svolgimento del test è emerso che il riscaldamento del reattore di gassificazione, dovuto all'adiabaticità del reattore stesso, avviene in maniera più lenta rispetto a quanto si verifica nelle normali condizioni di funzionamento (con aria e vapore come agenti gassificanti); ciò è dovuto principalmente al fatto che l'elevata concentrazione di anidride carbonica all'interno del reattore favorisce la reazione di Boudouard che, essendo endotermica, funge essa stessa da parziale moderatore della temperatura. È interessante sottolineare che il consumo di carbone, nel corso della fase di prova in cui il reattore è stato alimentato con la miscela di CO_2 e O_2, è stato pari a circa 7,7 kg/h.

Sono poi stati effettuati dei test di gassificazione con aria arricchita in ossigeno. Nel corso delle sperimentazioni è stato effettuato un test per verificare le prestazioni del gassificatore utilizzando aria arricchita in ossigeno e impiegando carbone sudafricano di granulometria controllata (8-12 mm). Nella prima fase di prova con aria arricchita al 30% in volume (durata circa cinque ore) la concentrazione media di H_2 è risultata pari a circa il 30%, quella di CO pari a circa il 24% e quella di CO_2 pari a circa 6,2% (sempre in volume). In termini generali, è emerso che un aumento del tenore di ossigeno nella miscela gassificante porta a un aumento delle temperature interne al gassificatore. Ciò è dovuto probabilmente a un incremento dell'incidenza delle reazioni esotermiche di combustione rispetto a quelle endotermiche di pirolisi e gassificazione. È interessante sottolineare che il consumo di carbone, nel corso delle tre fasi di prova in cui il reattore è stato alimentato con aria arricchita in ossigeno, è stato pari mediamente a circa 8-10 kg/h.

Per quanto riguarda la sperimentazione dei sistemi di lavaggio e dei sistemi di depolverazione elettrostatica sono stati eseguiti dei test sui sistemi di depolverazione elettrostatica, ed è stata programmata una serie di tre prove sperimentali (per un totale di circa 10 ore di sperimentazione). Le sezioni coinvolte nei test sono state Scrubber, I stadio di desolforazione, precipitatore elettrostatico. Tra il sistema di lavaggio ed il depolverazione elettrostatica, la sezione di maggiore interesse è l'elettrofiltro a umido (WESP), la sua gestione è molto difficoltosa a causa dell'alto rischio di esplosione. Durante queste campagne sperimentali è stato possibile avviare il suddetto componente, a seguito degli interventi effettuati per migliorare la gestione in condizioni di sicurezza. Il suo funzionamento non ha provocato delle particolari difficoltà; l'unica criticità è rappresentata dal controllo del tenore di ossigeno all'uscita del gassificatore.

I valori di intensità di corrente e di differenza di potenziale corretti per consentire un ottimale funzionamento dell'elettrofiltro sono:

- intensità di corrente: 1-1,5 mA;
- differenza di potenziale 19-23 kV.

Dall'analisi dei dati delle prove sperimentali è emersa la necessità di dotarsi di idonei opacimetri che consentano di valutare correttamente l'efficienza di abbattimento delle polveri. Inoltre dovrà essere migliorata la linea di campionamento syngas dei misuratori di ossigeno per evitare la formazione di condense e l'accumulo delle polveri che bloccano i misuratori stessi e quindi impediscono l'utilizzo dell'elettrofiltro.
Per quanto riguarda la sperimentazione di sistemi di campionamento TAR sono stati condotti dei test sperimentali sull'impianto pilota per il campionamento e l'analisi dei composti classificabili come TAR. Sono stati preliminarmente descritti i sistemi adottati sia per il campionamento del TAR in impianto, sia per la successiva analisi in laboratorio dei campioni raccolti. Sono stati presentati i risultati ottenuti nei campionamenti e successive analisi effettuati in 14 diverse prove di gassificazione condotte nell'impianto pilota. L'analisi dei risultati ha permesso di evidenziare i seguenti aspetti:

- un solo composto avente tempo di ritenzione 14,6 min è presente in concentrazioni apprezzabili; sono stati individuati altri composti, classificabili come TAR, aventi concentrazioni basse o trascurabili; per il calcolo della concentrazione dei composti classificabili come TAR ci si è riferiti ad uno standard esterno (naftalene) e alla sua concentrazione ci si è rapportati per l'integrazione delle aree cromatografiche ottenute;
- in diverse prove sperimentali la concentrazione del TAR separato è risultata trascurabile;
- la fase di campionamento del TAR resta il punto critico del sistema: la temperatura del gas prodotto dal gassificatore, la portata del syngas e la possibilità per il TAR di condensare influenzano notevolmente la

quantità di TAR che viene intrappolato e separato dal gas;

- il sistema di campionamento può essere ulteriormente migliorato tramite un'opportuna coibentazione della sonda di campionamento del TAR al fine di evitare possibili condensazioni; si può inoltre individuare qualche altro solvente, alternativo all'alcool isopropilico, per la separazione del TAR all'interno dei condensatori.

Per quanto riguarda la produzione dei energia elettrica e H2 a partire da syngas proveniente dalla gassificazione elettrostatica, sono stati eseguiti dei test sulle linee di produzione dell'energia elettrica e di produzione dell'idrogeno, è stata programmata una serie di prove sperimentali, nelle quali le due linee di trattamento sono state testate in differenti condizioni operative. In particolare sulla linea di trattamento a freddo e di produzione dell'energia elettrica sono state condotte sei prove complessive, eseguite con syngas proveniente da gassificazione di carbone sudafricano (tre prove sperimentali), di una miscela di carbone sudafricano e di provenienza Sulcis (una prova sperimentale), e da co-gassificazione di carbone e biomassa. Dei tre test sperimentali condotti sulla linea a caldo, tutti eseguiti con syngas proveniente da gassificazione di carbone sudafricano, solo uno ha interessato anche il separatore di idrogeno, a causa del malfunzionamento dell'apparecchiatura che non è stato possibile risolvere in tempo utile.
Per la linea di produzione energia elettrica, la colonna di desolforazione a freddo (primo stadio) integrata nello skid di lavaggio del syngas è stata testata per circa 63 ore complessive. In particolare, in questa apparecchiatura il trattamento di desolforazione è stato eseguito utilizzando una soluzione acquosa di soda caratterizzata da un grado di basicità pressoché costante (pH tipicamente compreso nei valori 9,5-10,0). Nel corso dei test, il trattamento ha consentito un significativo abbattimento dell'H2S presente nel syngas, da circa 200 ppm in volume (con picchi di oltre 500 ppm) fino a circa 20 ppm. L'efficienza dell'apparecchiatura in tale processo è stata mediamente del 90%, riducendosi, come chiaramente atteso, a valori dell'ordine di 65% nel caso di syngas proveniente da gassificazione di carbone sudafricano miscelato a Sulcis. Il trattamento mediante l'uso di soluzione di soda, come peraltro già evidenziato nelle precedenti campagne sperimentali, non comporta una significativa separazione della parte organica dei composti organici solforati (COS).

Il secondo stadio di desolforazione a freddo è stato utilizzato nel processo di abbattimento dei composti ridotti dello zolfo per circa 8 ore. La colonna è stata esercita in alternativa al primo stadio, utilizzando come solvente una soluzione acquosa di metil-dietanolammina (MDEA) in concentrazione 3M, in cui il grado di acidità della soluzione è stato mantenuto a valori di pH compresi tra 9,5 e 10. Il trattamento effettuato sulla corrente di syngas ha consentito l'abbattimento dell'H2S da valori di circa 450 ppm a mediamente 60 ppm, con un'efficienza media dell'ordine dell'87%. Anche in questo caso la soluzione non si è mostrata efficace nel trattamento del COS.

Il motore a combustione interna è stato utilizzato complessivamente per circa 16 ore con carichi elettrici molto variabili, generalmente compresi tra 0 e 9 kW. Il carico massimo (24 kW) non è stato raggiunto per via della potenzialità del reattore ancora limitata. Nel corso delle prove è stato possibile mantenere il motore acceso per circa 4 ore consecutive con un carico tipicamente compreso tra 3 e 6 kW. Non è stata evidenziata nessuna particolare differenza nelle prestazioni erogate dal motore al variare della tipologia del syngas di alimentazione. Di contro, le miscele di alimentazione al gassificatore utilizzate sono state costituite prevalentemente da carbone di provenienza sudafricana e che quindi non sono riscontrabili sostanziali differenze nelle composizioni dei syngas in termini di idrogeno e monossido di carbonio. Tale aspetto è altresì giustificato dal fatto che la messa in marcia del motore richiede una quantità di syngas elevata, ottenibile solo con carichi di aria e vapore al gassificatore superiori rispetto a quelli utilizzati nella gestione normale del reattore.

Per quanto attiene invece la linea di produzione idrogeno, complessivamente è stata testata per un totale di circa 50 ore complessive. I test sperimentali sono stati eseguiti con syngas derivante dal processo di gassificazione con aria di carbone sudafricano, a basso tenore di zolfo. Il sistema di desolforazione a caldo ha operato complessivamente per circa 29 ore, confermando sostanzialmente i risultati precedentemente ottenuti. Esso ha operato mediamente a una temperatura inferiore a quella di progetto (mediamente pari a 250-350 °C) consentendo comunque una riduzione della concentrazione di H_2S da valori mediamente pari a 150 ppm in ingresso alla sezione, fino a valori residui nella corrente trattata di 1 ppm. Parimenti per quanto riguarda la COS, la cui separazione avviene principalmente nella forma idrogenata, dopo la reazione nel prefiltro, nei reattori di assorbimento a caldo, la concentrazione è passata da circa 85 ppm a valori mediamente di 1 ppm.

Per quanto attiene al processo di CO-shift, nel corso della prima prova sperimentale (in cui il sistema ha funzionato per circa 11 ore), è stata riscontrata una conversione del monossido di carbonio pressoché trascurabile a causa dell'avvelenamento dei catalizzatori, causato probabilmente da vapore condensato generatosi all'interno dei reattori. Per le prove successive (complessivamente 16 ore di funzionamento), il catalizzatore deteriorato presente nello stadio di CO-shift ad alta temperatura è stato sostituito con un catalizzatore di tipologia convenzionalmente utilizzato nei processi analoghi, a base di ossidi di ferro, cromo e rame. Complessivamente il trattamento

effettuato sul syngas nella sezione di CO-shift ha permesso un arricchimento, in termini di contenuto di idrogeno nella corrente, pari a circa 5 punti percentuali.

Nello specifico della sperimentazione di sistemi di cattura della CO_2 operata sui gas provenienti dal gassificatore sono state effettuate sette prove sperimentali: cinque prove sono state dedicate alla cattura della CO_2 dal syngas proveniente dal processo di gassificazione; due prove, in cui il reattore è stato impiegato come combustore, sono state realizzate per testare il processo di assorbimento dell'anidride carbonica dai fumi di combustione. In particolare, delle cinque prove di cattura della CO_2 dal syngas, due sono state realizzate nella colonna a riempimento progettata quale secondo stadio di desolforazione (linea a freddo) e tre nei separatori dell'anidride carbonica posizionati lungo la linea a caldo. Le altre due prove, relative alla cattura della CO_2 dai fumi, sono state realizzate nella linea a freddo.

I test sperimentali sono stati eseguiti principalmente con carbone sudafricano, a basso tenore di zolfo, miscelato in alcuni test con carbone Sulcis, ad alto tenore di zolfo. I test di assorbimento della CO_2 dai fumi di combustione sono stati effettuati sulla colonna a riempimento. Tale sistema è stato testato per oltre dieci ore con un solvente a base di monoetanolammina (MEA) 3M; il processo ha presentato una efficienza media di rimozione dell'anidride carbonica pari al 99,6%.

Relativamente al syngas, invece, i test operati con MEA 5M nei reattori a gorgogliamento della linea di trattamento a caldo del gas hanno presentato una efficienza di separazione dell'anidride carbonica dell'ordine del 98-99%; d'altra parte, i test effettuati sulla colonna a riempimento hanno presentato efficienze del 95% nel corso delle prove con MEA 5M e del 65% circa (con una contemporanea rimozione dell'87% di H_2S) quando è stata impiegata MDEA.

I risultati sono in ogni caso soggetti a una notevole variabilità, per via della limitata stabilità dei sistemi a monte dei reattori impiegati per la separazione della CO2. Per tale motivo uno studio più accurato dei processo in esame necessita di una ulteriore messa a punto dell'impianto e di specifiche campagne sperimentali.

Per quanto riguarda la realizzazione e i primi risultati della sperimentazione dell'unità di rigenerazione solvente si è proceduto all'acquisizione di un sistema capace di operare il processo di rigenerazione delle ammine sia in batch che in continuo con effetti positivi anche nella direzione di un abbattimento dei costi delle prove di assorbimento della CO_2. In generale tale impianto è stato progettato e realizzato per essere molto flessibile e semplice da utilizzare ed è inoltre caratterizzato da transitori brevi. Le principali specifiche che caratterizzano l'impianto sono le seguenti:

- portata di soluzione amminica da rigenerare: 50 l/h;
- efficienza di desorbimento almeno pari al 97%;
- contenuto CO_2 nella soluzione da rigenerare: max 30% b.w;
- solventi da rigenerare: MEA 30% b.w. o in alternativa mix MEA e MDEA;
- possibilità di strippaggio contemporaneo di CO_2 ed H_2S;
- uscita della CO_2 strippata dall'unità di rigenerazione con una sovrapressione di 250 mbar;
- alimentazione del ribollitore della colonna di stripping tramite un riscaldatore di tipo elettrico.

Inoltre, l'impianto è dotato di un sistema di gestione dell'unità (PLC), con quadro elettrico per la conduzione in modalità manuale dell'unità di rigenerazione ed una serie di controlli di sicurezza quali quelli:

- della portata di alimentazione
- del livello in colonna;
- della pressione operativa;
- della temperatura di scarico gas;
- della temperatura del prodotto;
- della temperatura del ribolliture.

L'unità di rigenerazione delle ammine è stata consegnata e installata presso la piattaforma sperimentale Sotacarbo i primi giorni del mese di agosto, mentre nel mese di settembre sono state eseguite le prime prove sperimentali sull'unità di rigenerazione. L'impianto è stato testato con una soluzione di MEA 5 molare per verificare la massima potenzialità dell'unità di rigenerazione. I primi risultati hanno evidenziato un'efficienza di rigenerazione dell'ammina pari a circa il 30%, valore inferiore a quello indicato nell'ordine (97%). Pertanto nel mese di settembre sono state eseguite ulteriori prove sperimentali per ottimizzare il settaggio dei parametri di controllo dell'impianto e, quindi, migliorare il rendimento dell'impianto.

Nell'ambito delle attività relative allo **s**tudio e alla definizione preliminare di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2 integrato con la gestione miniera del Sulcis è stato predisposto da

Sotacarbo uno studio di definizione preliminare, da un punto di vista tecnico, ambientale ed economico di una nuova centrale termoelettrica dotata di sistema dimostrativo di cattura e confinamento geologico della CO_2.

Il programma di lavoro si è articolato sull'esame degli aspetti normativi per il ricorso alle agevolazioni previste dal DPR 28.01.1994 e sulle successive disposizioni legislative e sul nuovo quadro normativo. Vengono valutate le soluzioni tecnologiche presenti sul mercato per la produzione di energia elettrica e la riduzione delle emissioni di CO_2 con una caratterizzazione dal punto di vista tecnico, ambientale ed economico.

Vengono in questa sede individuate le principali alternative tecnologiche per la produzione di energia elettrica da carbone Sulcis e le diverse opzioni alternative per la cattura ed il confinamento della CO_2. Non da ultimo viene svolto l'esame degli aspetti ambientali per le soluzioni tecnologiche individuate in relazione anche alle procedure di autorizzazione. Il tutto va a convergere su una analisi comparativa delle diverse soluzioni tecnologiche per la realizzazione della centrale che si avvale della configurazione impiantistica più conveniente valutata sulla base dell'analisi delle diverse tecnologie, delle differenti taglie di impianto, dell'analisi di performance ambientale e della fattibilità economica. Il bacino carbonifero del Sulcis, attualmente l'unico attivo in Italia, si estende nell'estremità Sud-Ovest della Sardegna. La parte settentrionale del bacino è sfruttata con sistemi tradizionali di coltivazione del carbone nella concessione della miniera Monte Sinni della Carbosulcis S.p.A., mentre la parte meridionale del giacimento, la cui profondità raggiunge gli 800-1500 m, è attualmente oggetto di ricerca per le applicazioni CCS.

Fin dal 1994, al fine di rilanciare l'economia del Sulcis-Iglesiente, principalmente mediante l'incremento dell'attività mineraria, sono state promulgate numerose leggi per regolare e incentivare la realizzazione di una centrale termoelettrica alimentata, almeno parzialmente, con il carbone locale. In particolare, con il DPR del 28/01/1994 è stato lanciato il progetto IGCC Sulcis, che prevedeva, per la realizzazione della centrale, l'impiego della tecnologia di gassificazione in letto trascinato. Successivamente alla mancata realizzazione, alla fine degli anni '90, di tale impianto, la legge 99 del 2009 ha rilanciato l'obiettivo di realizzare una centrale termoelettrica nel Sulcis, estendendo le tecnologie applicabili a quelle analoghe, dal punto di vista ambientale, alla gassificazione e prevedendo di dotare l'impianto di un sistema dimostrativo CCS per la separazione e il confinamento geologico dell'anidride carbonica.

Il carbone Sulcis è infatti rappresentativo di numerose qualità di carbone caratterizzate da proprietà analoghe (elevato contenuto di zolfo e ceneri), largamente disponibili e diffuse a livello mondiale. Le tecnologie CCT e CCS sviluppate nel bacino del Sulcis sarebbero quindi caratterizzate da un'altissima trasferibilità (soprattutto nel paesi emergenti quali Cina, India, ecc.) e darebbero un'alta competitività all'industria italiana ed europea. Studi preliminari di caratterizzazione del carbone estratto e precedenti indagini sulla geologia del sito hanno evidenziato una notevole affinità del bacino carbonifero all'applicazione delle tecnologie CCS. Tale affinità è dovuta a una serie di caratteristiche peculiari del sito in questione:

- buona omogeneità del reservoir, che favorisce la distribuzione e l'adsorbimento della CO_2;
- carattere subbituminoso del carbone Sulcis, che presenta ottime capacità di adsorbimento della CO_2;
- faglie adatte al confinamento in quanto impermeabili e non eccessivamente estese;
- campo di profondità (800-1500 m) ottimale per il confinamento della CO_2;
- geometria favorevole e permeabilità del letto di carbone;
- presenza di una formazione acquifera al di sotto degli atrati più profondi del giacimento di carbone, la quale aumenta sensibilmente la capacità di confinamento del sito.

Ad oggi, le tecnologie di generazione elettrica potenzialmente applicabili nel Sulcis sono quelle di combustione del polverino di carbone con ciclo a vapore supercritico o ultrasupercritico (SPCC e USPCC, rispettivamente), la combustione in letto fluido atmosferico (AFBC) e la gassificazione (IGCC). Tali tecnologie devono essere integrate con un apposito sistema di trattamento dei gas e con una sezione di separazione dell'anidride carbonica dai fumi (separazione post-combustione, applicabile alle tecnologie USPCC e AFBC) o dal syngas (separazione pre-combustione, applicabile alla configurazione IGCC). In chiave futura, invece, promette di diventare estremamente competitiva la tecnologia di ossicombustione.

La combinazione tra le varie tecnologie di generazione elettrica, trattamento dei gas, separazione, trasporto e confinamento dell'anidride carbonica ha consentito di definire quattro configurazioni impiantistiche oggi particolarmente adatte all'applicazione nel Sulcis:

1. impianto USPCC dotato di un sistema SNOXTM per la rimozione combinata degli ossidi di zolfo e azoto e di un sistema di assorbimento chimico con ammine per la separazione della CO_2;
2. impianto USPCC dotato di sistemi convenzionali FGD e SCR per la rimozione degli ossidi di zolfo e azoto, rispettivamente, e di un sistema di assorbimento chimico con ammine per la separazione della CO_2;

3. impianto AFBC di combustione in letto fluido atmosferico, anch'esso dotato di sistemi convenzionali FGD e SCR per la rimozione degli ossidi di zolfo e azoto, rispettivamente, e di un sistema di assorbimento chimico con ammine per la separazione della CO_2;
4. impianto IGCC dotato di un processo Selexol per la desolforazione del syngas e di un sistema che operi il processo di water-gas shift e la separazione dell'anidride carbonica per assorbimento fisico pre-combustione.

A tali configurazioni impiantistiche ne è stata aggiunta, a titolo comparativo, una basata sul processo di ossicombustione, che, come accennato, non è però matura per una applicazione nel breve termine.
Tutte le configurazioni considerate comprendono una pipeline per il trasporto della CO_2 separata e un sistema di confinamento sia negli strati profondi e non coltivabili del bacino carbonifero del Sulcis (mediante tecniche ECBM), sia negli acquiferi sottostanti il bacino stesso.

Fatta eccezione per la tecnologia di ossicombustione, che, se fosse disponibile sul mercato, sarebbe quella caratterizzata dalle migliori prestazioni, uno studio di carattere ambientale indica che tutte le configurazioni individuate consentono di soddisfare i limiti normativi sulle emissioni gassose; d'altra parte, le configurazioni USPCC-SNOX e IGCC risultano essere nel complesso le meno impattanti, dato che comportano la produzione di ceneri non pericolose e molto probabilmente riciclabili e la produzione di sottoprodotti ad alto valore di mercato (rispettivamente acido solforico e zolfo elementare). La combustione in letto fluido e, secondariamente, l'impianto USPCC con il sistema FGD comportano, invece, la produzione di notevoli quantità di rifiuti solidi da conferire a discarica.

I vantaggi che le configurazioni USPCC-SNOX e IGCC presentano rispetto alle altre configurazioni impiantistiche sono anche di tipo economico. Infatti, considerando una taglia convenzionale di 660 MW elettrici netti per la configurazione di base (senza CCS), le soluzioni USPCC-SNOC e, in particolar modo, IGCC risultano essere quelle economicamente più convenienti, sebbene i margini di profitto piuttosto limitati rendono l'investimento poco sicuro dal punto di vista finanziario (soprattutto a causa della forte incertezza relativamente alle stime di alcuni parametri fondamentali, quali il prezzo del petrolio, i costi di investimento e il prezzo di acquiso del carbone di importazione. La convenienza limitata delle configurazioni individuate è dovuta principalmente ai costi (di investimento e operativi) ancora eccessivi dell'unità di separazione dell'anidride carbonica, compensati solo in piccola parte dal mancato costo di acquisto delle quote di emissione.

Un'analisi di sensitività effettuata al fine di tener conto della possibile variabilità dei principali parametri assunti mostra che il parametro che influisce maggiormente sul valore attuale netto dell'investimento è il prezzo del petrolio (che, secondo il provvedimento CIP 6/1992, determina il prezzo di cessione dell'energia elettrica alla rete nazionale). Inoltre risulta essere particolarmente influente la disponibilità annua dell'impianto, sebbene la valutazione di tale parametro, soprattutto per la configurazione USPCC-SNOX, sia soggetta solo a piccole incertezze.

Complessivamente, dallo studio emerge che, allo stato attuale, l'applicazione del sistema CCS alla centrale termoelettrica da ubicarsi nel territorio del Sulcis può essere economicamente accettabile solo se "parziale", ovvero nel caso in cui tale sistema sia dimensionato per trattare solo una porzione relativamente limitata di fumi o di syngas. A tale proposito, la possibilità più concreta appare quella di dimensionare il sistema CCS secondo la taglia dimostrativa minima prevista dal bando NER 300 per il finanziamento dei progetti europei. Tale taglia corrisponde a quella di un ipotetico impianto che, nella configurazione di base (senza CCS), sarebbe caratterizzato da una potenza elettrica netta di 250 MW.

Ancora nell'ambito delle attività sulla gassificazione e sul trattamento del syngas prodotto è stato condotto, da parte del DIMECA dell'Università di Cagliari, uno studio sulle prestazioni della sezione di shift-conversion del CO, con particolare attenzione alla sua applicazione in impianti integrati di gassificazione e ciclo combinato (IGCC) e all'integrazione con la successiva sezione di rimozione della CO_2.

Lo studio della sezione di shift-conversion del CO e della successiva sezione di rimozione della CO_2 si basa su complessi modelli di simulazione appositamente sviluppati, basati sul codice industriale Aspen-Plus. La reazione di shift-conversion del CO è una reazione esotermica ed è pertanto favorita dalla riduzione della temperatura, mentre non essendoci variazione del numero di moli tra reagenti e prodotti, non è influenzata dalla pressione. Il processo di shift-conversion risulta di fondamentale importanza negli impianti IGCC, qualora siano integrati con sistemi di rimozione della CO_2. Generalmente, infatti, un impianto IGCC si basa su un gassificatore a letto trascinato alimentato con ossigeno quasi puro, che produce un gas di sintesi praticamente privo di azoto e molto ricco in CO, che deve essere rimosso prima della sezione di cattura della CO_2.

La sezione di shift-conversion è costituita da due reattori, uno di alta e uno di bassa temperatura, operanti in serie. Il reattore di alta temperatura è caratterizzato da una più elevata velocità di reazione ma non consente di ottenere

un elevato grado di conversione del CO per via degli effetti della temperatura sulle condizioni di equilibrio; esso permette pertanto una più rapida conversione in CO_2 di gran parte del CO. Il secondo reattore, operante a temperatura inferiore, pur penalizzato da una minore velocità di reazione, permette di completare il processo di conversione, garantendo efficienze di conversione molto alte che possono raggiungere valori prossimi all'unità (in funzione della temperatura operativa e del rapporto molare H_2O/CO in ingresso). In entrambi i casi le reazioni di conversione del CO avvengono in presenza di opportuni catalizzatori da cui sostanzialmente dipende la possibilità di conseguire le condizioni di equilibrio pur operando a temperature relativamente basse. Un aumento del rapporto molare H_2O/CO in ingresso favorisce inoltre la conversione del CO, ma, nel contempo, comporta una maggiore spesa energetica per la produzione di vapore ad alta temperatura.

I modelli di simulazione sviluppati con Aspen-Plus sono stati applicati allo studio delle sezioni di shift-conversion del CO e di rimozione della CO_2, integrate con un impianto IGCC alimentato con un carbone commerciale a basso tenore di zolfo e dimensionato con riferimento ad una potenza primaria in ingresso pari a 1000 MW.

Il syngas all'ingresso della sezione di shift-conversion, proveniente dalla sezione di desolforazione, è caratterizzato da una temperatura di 270 °C e da una pressione di 23 bar. Il syngas è molto ricco in CO (50,6%) ed è composto anche da H_2 (31,6%) e CO_2 (15,0%); sono presenti in minore quantità N_2 (1,4%), Ar (0,9%) H_2O (0,5%), mentre H_2S (70 ppm), CH_4 (13 ppm) e COS (2 ppm) sono presenti in tracce. I due reattori di shift, di alta e bassa temperatura, operano rispettivamente a 300 °C e 200 °C. Il calore rilasciato dal reattore ad alta temperatura viene utilizzato per la produzione di parte del vapore necessario per il processo di conversione del CO, mentre la restante parte viene spillata dalla linea di media pressione del ciclo combinato dell'impianto IGCC.

Sono state effettuate approfondite analisi tese a valutare l'influenza del rapporto molare n tra H_2O e CO sulle prestazioni della sezione di shift conversion del CO e delle successive sezioni di rimozione e compressione della CO_2. Le analisi sono state condotte al variare del suddetto rapporto molare n in un campo 1-1,5. La conversione del CO aumenta con n, da un valore di circa il 91% per n pari a 1 fino ad un valore superiore al 98% per n pari a 1,5. All'aumentare di n diminuiscono la frazione molare del CO e il rapporto molare CO/CO_2 nel syngas, che per n=1 sono pari rispettivamente al 3% e a 0,074, mentre per n =1,5 raggiungono i valori dello 0,5% e di 0,013.

Contestualmente ad un miglioramento dell'efficienza di conversione del CO, all'aumentare del rapporto molare H_2O/CO si assiste però anche ad una maggiore richiesta di vapore spillato dal ciclo combinato. Infatti il vapore prodotto sfruttando il calore rilasciato dalla sezione di shift-conversion è pari a circa il 40-50% (funzione del grado di avanzamento della reazione di shift) del vapore necessario per effettuare lo shift in condizioni stechiometriche (n=1). Pertanto, qualunque sia il rapporto n scelto, è sempre richiesta una integrazione di vapore dal ciclo combinato, in particolare per n=1,5 la portata di spillamento richiesta è quasi doppia rispetto a quanto richiesto in condizioni stechiometriche.

Un aumento del rapporto molare H_2O/CO in ingresso migliora pertanto la conversione del CO, ma nel contempo penalizza le prestazioni dell'impianto IGCC. Lo spillamento di vapore dalla linea di media pressione del ciclo combinato riduce infatti la potenza effettiva dell'impianto IGCC del 3,7% per n=1 e di circa il 7% per n=1.5. Contestualmente un aumento del rapporto molare n H_2O/CO favorisce la successiva rimozione della CO_2, ma poiché anche operando con un valore stechiometrico di n la conversione del CO raggiunge valori superiori al 90%, l'effetto di n sulle prestazioni della sezione di cattura della CO_2 è sostanziale solamente per efficienze di rimozione molto spinte, superiori al 90% limite massimo considerato nel presente studio.

Tuttavia è opportuno ricordare come per valori del rapporto molare H_2O/CO in ingresso prossimi al valore stechiometrico in condizioni operative reali il processo di shift conversion potrebbe discostarsi dalle condizioni di equilibrio e pertanto potrebbe essere caratterizzato da efficienze di conversione notevolmente inferiori a quanto calcolato con l'equilibrio. In ragione di queste considerazioni si ritiene che il rapporto molare H_2O/CO ottimale sia pari ad 1,2; un rapporto n pari a 1,2 garantisce una conversione del CO del 96,3%, una frazione molare del syngas in uscita pari all'1,2% e un rapporto molare CO/CO_2 pari a circa 0,03. Il vapore spillato per effettuare la reazione di shift conversion riduce la potenza dell'impianto IGCC del 4,9%.

Sempre nell'ambito delle attività sulla gassificazione e sul trattamento del syngas prodotto è stato effettuato, presso il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Cagliari (DSC-UniCa), lo studio parallelo di sistemi sorbenti innovativi per H_2S e quello di un primo upscale di sorbenti a base di ZnO per la rimozione dell'H_2S. L'obiettivo dell'attività è quello di studiare, sintetizzare, caratterizzare e testare l'efficienza di materiali innovativi compositi da utilizzare nel sistema di depurazione dall'H_2S in alternativa sia all'uso di sorbenti tradizionali come ossido di zinco e carbone attivo, che ai processi per via umida, basati sull'impiego di ammine organiche.

Lo sviluppo delle attività sui sorbenti ha interessato quattro punti principali:

- il primo è relativo all'analisi della letteratura e stato dell'arte; è stata condotta una ricerca bibliografica, con l'intento di fornire una panoramica sull'importanza dell'argomento in studio e dei sistemi attualmente utilizzati;
- il secondo ha riguardato la sintesi di nuovi sistemi a base di Ferrite di Zinco nanostrutturato supportato su SBA-15;
- il terzo la caratterizzazione dei sistemi sintetizzati mediante Diffrazione di Raggi X (XRD);
- il quarto lo studio delle prestazioni dei sistemi sintetizzati nella rimozione dell'H2S dal syngas derivante dalla gassificazione del carbone.

Per quanto riguarda l'upscale si è passati ad una scala dimensionale superiore (dell'ordine dei millimetri) dei compositi ZnO/SBA-15 al fine di testare i sorbenti in dimensioni tali da precorrere l'utilizzo su scala industriale. Lo sviluppo dell'attività ha visto quattro fasi principali.
Dapprima si è proceduto alla sintesi e pelletizzazione di 12 g di composito ZnO/SBA-15. Si è poi passati in una seconda fase alla caratterizzazione dei pellet sintetizzati procedendo alla caratterizzazione dei sistemi sintetizzati utilizzando tre diverse tecniche di caratterizzazione:

- Analisi strutturale mediante Diffrazione di Raggi X (XRD);
- Analisi morfologica mediante Microscopia Elettronica in Trasmissione (TEM);
- Analisi tessiturale mediante misure di adsorbimento fisico di azoto a -196 °C.

Lo studio delle prestazioni dei pellet sintetizzati nella rimozione dell'H_2S dal syngas derivante dalla gassificazione del carbone ha concluso la ricerca.

Come ulteriore attività di ricerca si è proceduto con il caratterizzare e testare dei catalizzatori commerciali, forniti da ENEA, per la reazione di Water Gas Shift (WGS). Si è proceduto in questo caso attraverso la caratterizzazione dei sistemi commerciali freschi (WGS_Pt e WGS_Fe-Cr) mediante analisi strutturale XRD e tessiturale (fisisorbimento di azoto a -196 °C). Un secondo passo è stato quello di caratterizzazione del sistema commerciale WGS_Pt esausto. Le modificazioni subite dai sistemi in esame a seguito del loro utilizzo sono state investigate sottoponendo il campione esausto alle stesse tecniche di caratterizzazione usate per i campioni freschi. Da ultimo è stato effettuato lo studio delle prestazioni dei sistemi commerciali (WGS_Pt e WGS_Fe-Cr) nella reazione di Water Gas Shift.

Sempre nell'ambito delle attività sulla gassificazione e sul trattamento del syngas prodotto sono stati effettuati lo studio e la realizzazione su scala da laboratorio di un dispositivo di tipo rigenerativo per il trattamento del tar e del particolato contenuto nel syngas. Il dispositivo funzionante ad alta temperatura svolge la triplice funzione di filtro per il particolato, di gassificazione delle frazioni carboniose solide e di reforming della fazione liquida vaporizzabile. Questo sistema è stato testato su un impianto di gassificazione in scala di laboratorio di tipo updraft di capacità 500 g/h. La valutazione dell'efficienza del sistema nella configurazione scelta è stata eseguita variando sia le condizioni di esercizio (temperatura e portata gas), sia l'entità della frazione condensabile presente a monte del dispositivo. Non disponendo di carboni a differente contenuto di sostanze volatili, allo scopo di modulare la quantità di frazione condensabile da inviare al dispositivo, sono state utilizzate due differenti tipologie di carbone, una biomassa lignocellulosica e una serie di miscele carbone-biomassa.

Oltre a questa attività di tipo sperimentale è stata anche svolta una approfondita ed esauriente analisi critica della letteratura allo scopo di valutare le potenzialità realizzative di un dispositivo di rimozione e conversione del tar basato sulla tecnologia del plasma freddo generato da un reattore corona pulsato. Tale tipologia di reattori sembra, infatti, rappresentare una valida alternativa ai sistemi più propriamente chimici normalmente proposti. In questo ambito, attraverso una analisi delle differenti sezioni di cui è costituito un generatore di plasma freddo a scarica corona (dalla produzione dell'alta tensione alla generazione dell'impulso) sono state messe in evidenza le criticità non ancora completamente risolte. Il lavoro svolto ha reso possibile l'elaborazione di uno schema di reattore corona pulsato utilizzabile per impianti in scala da laboratorio, che viene proposto.

Sempre nell'ambito delle attività sulla gassificazione e sul trattamento del syngas prodotto è stata effettuata, presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell' Università Roma Tor la caratterizzazione sperimentale qualitativa e quantitativa della composizione dei "TAR" e di altri materiali prodotti presenti nel syngas proveniente dalla gassificazione del carbone. Dapprima è stato effettuato un primo inquadramento e screening delle tecniche analitiche più adatte allo scopo. Successivamente si è passati alla caratterizzazione di campioni di tar e polveri, prelevate durante il funzionamento degli impianti di gassificazione ENEA/Sotacarbo, con l'ausilio di tecniche gas cromatografiche, di spettrometria di massa e di altro tipo. In particolare sui TAR, sono state effettuate, tramite l'uso di opportuni solventi, la determinazione quantitativa e qualitativa dei prodotti al fine di effettuarne una prima speciazione. E' stata inoltre indagata la tecnica della spettroscopia NMR, considerata

in ambito UE il metodo più attendibile per l'identificazione degli idrocarburi policiclici aromatici (Polyaromatic Hydrocarbons PAHs). In tutti i cromatogrammi si nota un numeroso set di bande di assorbimento che indica un alto numero di specie chimiche aromatiche presenti nel campione.

Una seconda attività ha riguardato lo studio del comportamento chimico e chimico fisico della Mono Etanol Ammina durante il meccanismo di assorbimento della CO_2 . In particolare è stata effettuata l'analisi del comportamento della MEA durante l ' assorbimento di CO_2 e le sue eventuali decomposizioni o side reactions. A conclusione sono state effettuate delle valutazioni e forniti dei suggerimenti per migliorare il comportamento della MEA nella sua funzione di cattura della CO_2 e salvaguardia della sua capacita' di funzionamento rispetto a cicli ripetuti. In particolare viene sottolineata l'importanza di :

- Tenere alto il valore del pH, ad esempio con l'utilizzo di un tampone basico come il borato o altri per stabilizzare il pH ai valori alti.
- Tenere alto il potenziale riducente, ad es. con utilizzo di un substrato come il solfito in grado di legare zolfo e quindi sottrarlo agli effetti reattivi dei carbammati, trasformandolo in tiosolfato e creando un ambiente fortemente riducente; ciò permetterebbe anche di limitare o eliminare la corrosione di eventuali parte metalliche in grado di rilasciare ioni capaci di dare complessi metallici.
- Tenere basso il valore della pressione osmotica. L'inserimento della MEA in un polimero per abbassare fortemente la forza ionica che, come è stato pubblicato, abbassa il coefficiente della legge di Henry della solubilità dei gas in acqua. La modifica dovrebbe ancorare la MEA via O ad un polimero solubile lasciando libera la terminazione NH_2 che è la parte attiva nella cattura della CO_2 (ad es il PEO) in modo da aumentare in modo significativo la quantità di gas assorbito. Inoltre e contribuendo ad impedire il contatto tra molecole si dovrebbe anche diminuire il canale di degradazione della MEA verso gli ossazolidoni o tio derivati.
- Aggiunta di EDTA alla soluzione per creare comunque una preferenzialità dei metalli verso la complessazione con quest' ultimi sfruttando il potente effetto chelante del composto.
- Utilizzare l' assorbimento a 260 con un opportuno sistema colorimetrico per la misura in situ della reazione laterale di sottoprodotti colorati che si dimostrano indicatori della degradazione della MEA.

Studi e test su processi avanzati di gassificazione/pirolisi e pulizia syngas integrati, per l'utilizzo di carboni ad alto contenuto di tar e zolfo

Questa serie di studi è finalizzato alla definizione e messa a punto di un processo di gassificazione/pirolisi ottimizzato per l'utilizzo di carboni di difficile utilizzo per la presenza di tars e zolfo come il carbone del Sulcis. Il carbone a basso rango e con un elevato tenore di zolfo della regione del Sulcis, con le attuali configurazioni impiantistiche, non può essere pienamente utilizzato come combustibile solido per produrre energia sostenibile, a causa delle inevitabili elevate emissioni di agenti inquinanti nell'atmosfera, e della presenza di tars dannosi per la funzionalità dell'impianto. Tuttavia, inserendo opportunamente nel ciclo di gassificazione e trattamento syngas il processo di pirolisi, è possibile utilizzare in modo pulito anche tale tipologia di carbone. Un possibile ciclo di gassificazione che utilizza la pirolisi come processo separato dalla gassificazione è visualizzato in Figura 111. Lo schema di processo illustrato è predisposto in modo da separare in due apparecchiature distinte la zona del reattore in cui avviene il rilascio della parte volatile da quella in cui avvengono le reazioni di gassificazione vera e propria. Tale separazione ha due scopi:

1) Eliminare, o in ogni caso diminuire, l'influenza che la presenza delle sostanze volatili ha sulle reazioni di gassificazione/combustione del carbone. E' infatti generalmente riconosciuto che le principali differenze di comportamento termico e di reattività tra carboni sono prevalentemente riconducibili alle differenze di comportamento nello stadio di devolatilizzazione in quanto le modalità con cui avviene la devolatilizzazione influenzano fortemente la reattività del char nel successivo processo di gassificazione.
2) Sfruttare il potere calorifico delle sostanze volatili mediante reazione di ossidazione parziale con aria (o con ossigeno) eventualmente in presenza di vapore e di catalizzatore al fine di convertire il tar presente e di fornire parte dell'energia termica necessaria al successivo processo di gassificazione del char e di incrementare la produzione di idrogeno.
3) Utilizzare il prodotto solido della pirolisi, costituito essenzialmente da char e ceneri, in un processo di gassificazione o idrogassificazione in cui si può efficacemente applicare processi atti alla rimozione dello zolfo e della CO_2 prodotta.

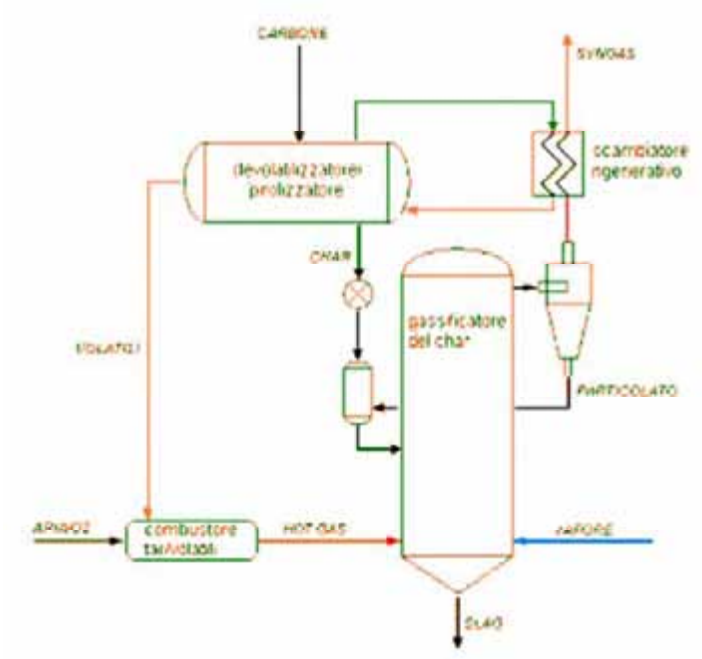


Figura 111. Rappresenzazione schematica di un processo avanzato di gassificazione/pirolisi del carbone

Il processo di pirolisi del carbone Sulcis è stato analizzato a livello di test di laboratorio in atmosfera sia inerte (di N_2) sia di H_2, in modalità di riscaldamento a temperatura programmata impiegando un reattore di quarzo. I gas di emissione dei processi termici sono stati analizzati mediante spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR) per ottenere profili di evoluzione simultanea e dinamica dei gas liberati. Il residuo solido della pirolisi e idropirolisi (char) è stato sottoposto ad un processo di gassificazione a 800 °C e pressione di idrogeno di 5,0 MPa e l'andamento del gas prodotto durante il processo di gassificazione è stato monitorato per ottenere un miglior confronto tra i due processi di decomposizione primaria, ossia la pirolisi e la gassificazione del char.

In generale, gli spettri FTIR hanno mostrato bande di assorbimento dei prodotti tipici della pirolisi come CO_2, CO, COS, SO_2 e gas alifatici leggeri principalmente CH_4 e C_2H_4. L' evoluzione nel tempo delle varie specie gassose è mostrato in Figura 112.

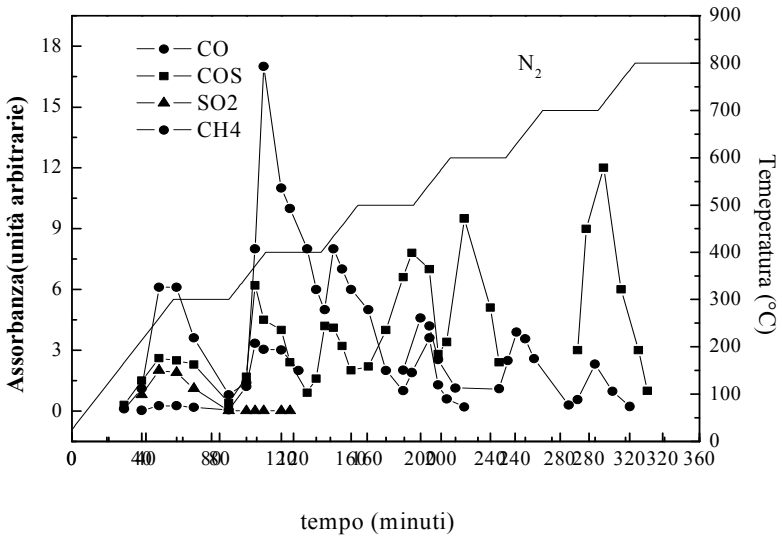


Figura 112. Evoluzione nel tempo di specie gassose (CO_2, CO, SO_2, COS, CH_4, and C_2H_4) durante la pirolisi del carbone Sulcis in atmosfera di N_2 e H_2

E' stata esaminata anche l'evoluzione della conversione diretta del carbonio del char a metano (idrogassificazione), che è stato raggiunta isotermicamente a 800 °C per 30 minuti sotto pressione (5,0 MPa in H_2).

L'entità della conversione del carbone in metano, calcolato come perdita di peso in % dei campione, è stata del 36% per char ottenuto mediante pirolisi in atmosfera di N_2 e del 16% per char ottenuto in H_2. Nella Figura 113 è mostrato l'evoluzione di CH_4 durante il processo di gassificazione dei char.

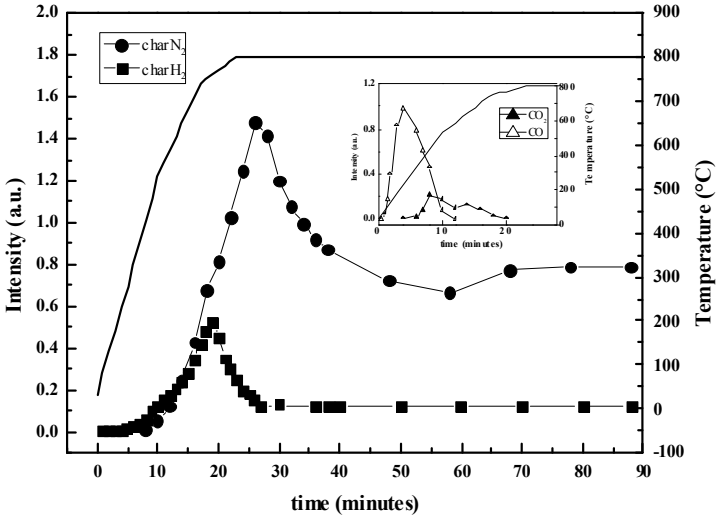


Figura 113. Evoluzione nel tempo di CH_4 durante il processo di metanazione a 800 °C e pressione di 5,0 MPa in H_2

Il CH_4 è presente nel gas in uscita dal micro reattore a temperatura di 500 °C. La formazione di CH_4 a basse temperature è probabilmente dovuta a reazioni di cracking termico del char e/o a reazione di metanazione di CO_2 e CO. A basse temperature sono prodotti anche ossidi di carbonio, indicando una iniziale reattività dei char. Si può notare come la formazione di CO sia dovuta alla gassificazione in situ del char con CO_2. E' stata impostata l'attività del prossimo anno prevista nei laboratori della Trisaia dotati di un impianto pilota pirolizzatore per lo studio approfondito della fenomenologia.

L'obiettivo finale è quello di approfondire le conoscenze sul processo di devolatilizzazione e pirolisi del carbone al fine, da un lato di ottimizzare la formazione di un gas costituito dai volatili del carbone per sfruttarne termicamente il potere calorifico, dall'altro di ottenere un residuo solido ("char") da poter utilizzare in un processo di gassificazione più stabile e pulito.

Sulla stessa linea è stata inserita l'attività svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Tor Vergata, volta ad approfondire la possibilità di utilizzare diverse tipologie di residui industriali alcalini, tra cui le ceneri di gassificazione, in un processo di carbonatazione con assorbimento di CO_2 ed H_2S, agendo direttamente su sorgenti diluite di anidride carbonica, quale gas di sintesi o in subordine fumi di combustione, evitando quindi il processo intermedio di cattura normalmente previsto nella filiera del CCS per la concentrazione della CO_2. Sulla base dei risultati ottenuti nel corso delle attività svolte nel corso della precedente annualità,si è deciso di concentrare l'attenzione su scorie di acciaieria, che rappresentano sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo la tipologia di residui con le migliori potenzialità di applicazione, rimandando alla prossima annualità l'attività di caratterizzazione delle ceneri da gassificazione del carbone Sulcis.

Ad integrazione dei dati già disponibili, è stata svolta una accurata caratterizzazione di diversi flussi di scorie da convertitore a ossigeno (BOF) che attualmente a livello nazionale non trovano alcuna applicazione e sono pertanto smaltite in discarica. Le scorie BOF sono state sottoposte a test di carbonatazione utilizzando la route ad umido (rapporto Acqua/Scoria=0,3-0,4) a condizioni operative relativamente blande (T=50 °C, P=1-10 bar), risultata la più efficace a seguito dei risultati ottenuti nella prima annualità. Le prove sono state condotte utilizzando sia CO_2 pura che una miscela costituita dal 40% di CO_2 e 60% di N_2, finalizzata a simulare la composizione tipica di un Syngas a valle del water-gas shift.

Allo scopo di integrare il processo di carbonatazione con il processo di granulazione necessario per l'ottenimento di materiale in forma granulare, utile per la produzione di aggregati artificiali, è stato realizzato un reattore di granulazione che è stato utilizzato per condurre prove di granulazione di diverse tipologie di scorie di acciaieria, che hanno consentito di individuare i principali parametri operativi critici: rapporto acqua/scoria, velocità di rotazione, quantità di materiale, inclinazione del reattore, configurazione del sistema di raschiamento del fondo del reattore. Alcuni di tali effetti sono stati valutati mediante l'elaborazione di un modello del processo di granulazione, che include i diversi possibili meccanismi di aggregazione delle particelle. Inoltre, le prove di carbonatazione sono state interpretate mediante un modello cinetico basato sul modello "Shrinking Core", che ha consentito di valutare l'effetto della distribuzione granulometrica sulla resa del processo e di determinare le corrispondenti costanti cinetiche. Tale modello potrà essere incluso nel modello di granulazione per

l'interpretazione dei risultati delle prove di granulazione-carbonatazione. Infine, è stato elaborato lo schema del processo di carbonatazione/granulazione, per il quale sono stati effettuati i bilanci di materia ed energia basandosi sui dati raccolti nel corso delle attività, che hanno evidenziato la sostenibilità del processo, soprattutto alla luce della possibilità di evitare lo step preliminare di cattura, concentrando cattura e sequestro in un singolo processo.

L'obiettivo finale è rappresentato dalla possibilità di riutilizzare, all'interno del processo stesso, le ceneri di pirolisi/gassificazione del carbone, eventualmente additivate con ulteriori scorie opportunamente selezionate, per facilitare i processi di de carbonizzazione e pulizia del syngas (da tars e H_2S).

Analisi del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone (Coal To Liquid)

Si è in quest'ambito proceduto con la predisposizione di uno studio di analisi di sistema e modellazione di un impianto CTL di taglia tipica (10.000 bbl/d) effettuata con l'ausilio di codicistica industriale, con la redazione di uno studio sullo stato dell'arte delle tecnologie CTL che si accompagna ad una valutazione della possibile integrazione della produzione di combustibili liquidi da carbone all'interno della piattaforma pilota ENEA/Sotacarbo, con l'effettuazione di una serie di test sperimentali volti alla caratterizzazione del processo e dei prodotti ottenuti a partire da syngas da carbone e infine con una attività di modellazione numerica del processo.

Le tecnologie CTL (coal to liquids) consistono, in termini generali, nella conversione del carbone in combustibili liquidi quali metanolo e dimetiletere e in prodotti derivanti dalla sintesi Fisher-Tropsch (tipicamente benzina, gasolio, nafta, olefine ecc.). Per via dei processi termochimici di conversione, tali prodotti sono tipicamente caratterizzati da una bassissima concentrazione di composti inquinanti e, nel complesso, da una qualità tipicamente superiore ai corrispondenti prodotti di derivazione petrolifera. In termini generali, le tecnologie CtL sono tipicamente classificate in due categorie principali: liquefazione diretta (DCL, direct coal liquefaction) e liquefazione indiretta (ICL, indirect coal liquegaction). Queste ultime, in particolare, consistono nella gassificazione del carbone e nella successiva conversione (più o meno diretta) di una parte del gas di sintesi prodotto in combustibili liquidi di varia natura.

Il recente forte incremento del prezzo del petrolio ha comportato un forte impulso allo sviluppo e all'applicazione delle tecnologie CTL, soprattutto da parte di paesi, come Cina e Stati Uniti, che dispongono di vasti giacimenti carboniferi. La Cina, in particolare, ha recentemente sviluppato un grosso programma di sviluppo industriale delle tecnologie di liquefazione diretta e indiretta del carbone, che ha portato alla realizzazione di numerosi impianti (molti dei quali già in fase di esercizio) di carattere dimostrativo e/o industriale.

Dal punto di vista tecnologico, oggi la ricerca è principalmente rivolta verso i reattori a slurry, in cui il catalizzatore solido, finemente macinato, viene messo in sospensione in un olio inerte diatermico attraverso il quale gorgoglia il gas da trattare. Tali reattori, rispetto ai convenzionali sistemi a letto fisso, consentono un accurato controllo delle temperature operative con notevoli conseguenze in termini di aumento dell'efficienza di conversione e di semplicità di gestione del sistema.

In particolare è stata svolta presso il C. R. ENEA di Casaccia, con l'ausilio di un software commerciale di simulazione impiantistica, un'analisi di sistema di una configurazione impiantistica di riferimento allo scopo di valutare le modalità di una loro applicazione nel contesto italiano, con la finalità di realizzare una piattaforma pilota nell'area del Sulcis. L'obiettivo è lo sviluppo e dimostrazione di tecnologie per l'impiego pulito del carbone per produzione di combustibili liquidi, idrogeno ed energia elettrica, ad emissioni quasi zero.

Sono state in questo ambito effettuate delle valutazioni preliminari per l'individuazione della taglia e della tecnologia più opportuna per una realizzazione di impianto considerando anche l'integrazione di sistemi di produzione di combustibili di opportunità sia liquidi che gassosi andando ad investigare in particolare la tecnologia di liquefazione del carbone per via indiretta che si basa sulla gassificazione e sulla sintesi di Fisher Tropsch. Si è quindi individuata una taglia impiantistica di riferimento per la presente elaborazione che conducesse alla produzione di 10000 bbl/giorno di combustibili liquidi che equivalgono ad un consumo di 4000 t/giorno di carbone. L'analisi delle prestazioni dell'impianto CTL si è sviluppata con l'ausilio di un codice di simulazione commerciale AspenPlus, attraverso il suo utilizzo è stato possibile definire il rendimento in termini di energia dell'impianto, nonché di definire le migliori configurazioni impiantistica sia come flussi di materia, ossia nel caso della sezione di assorbimento come portata di solvente, che come scambi termici.

Data l'implementazione delle tecnologie CTL nelle tecnologie CCS si è individuata una configurazione impiantistica che realizzasse il clean-up del syngas per rispettare le specifiche di purezza della sezione di FT e che nel contempo operasse la separazione della CO_2 per il suo successivo storage. A tale scopo si è individuata la tecnologia Selexol come la tecnologia più idonea per il processo analizzato. L'obiettivo è stato inoltre quello di realizzare uno strumento utile all'analisi parametrica di un impianto CTL che fornisse la possibilità di valutare la resa in termini di prodotti liquidi ed energetici variando ad esempio la tipologia di carbone in ingresso o la distribuzione dei prodotti nel reattore Fischer Tropsch.

In tale contesto, Sotacarbo ha avviato una serie di studi volti a valutare la fattibilità dell'applicazione delle tecnologie CTL in un potenziale impianto da realizzare in prossimità del bacino carbonifero del Sulcis. In via preliminare, è attualmente in esame la possibilità di integrare la piattaforma pilota Sotacarbo con una unità pilota per la messa a punto delle tecnologie ICL e per acquisire l'esperienza operativa e le informazioni necessarie a un eventuale scale-up dell'impianto su scala dimostrativa e successivamente industriale. L'integrazione può avvenire sia mediante la semplice introduzione di una linea CtL nell'attuale impianto pilota, sia mediante la realizzazione di un impianto ad hoc, totalmente indipendente dalla piattaforma se non per l'impiego di alcune apparecchiature ausiliarie già esistenti.

L'integrazione dell'impianto attuale consiste nell'introduzione di un'apposita linea alimentata con il syngas prelevato a valle del primo stadio di CO-shift (previa compressione e regolazione della temperatura) e consentirebbe un primo approccio sperimentale, rapido e poco costoso, con le tecnologie in esame, ma non l'acquisizione di dati sperimentali direttamente trasferibili alle applicazioni di tipo commerciale.

L'eventuale nuovo impianto, nella sua configurazione completa, consiste invece in una sezione di gassificazione (basata ad esempio sulla tecnologia U-GAS® a letto fluido) e depurazione del syngas, in una sezione di sintesi dei combustibili liquidi dal syngas stesso, ed eventualmente in un sistema di separazione dell'anidride carbonica e di generazione elettrica. Tale ipotesi, sebbene sia significativamente più costosa e richieda tempi più lunghi per la sua realizzazione, consentirebbe uno studio piuttosto accurato del processo e l'acquisizione di risultati sperimentali facilmente e direttamente impiegabili per l'analisi dei processi CtL di tipo industriale.

Un ulteriore attività, svolta presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Milano, essa è consistita nell'analisi preliminare di un processo che risulti essere di potenziale interesse tecnologico per la valorizzazione del carbone del Sulcis. I processi che rispecchiano maggiormente le richieste sono quelli di liquefazione, ovvero quelli in cui il carbone viene convertito chimicamente in prodotti liquidi, passando attraverso la produzione di gas di sintesi.

Nell'ambito di questo lavoro l'attenzione è stata focalizzata sui processi di conversione del gas di sintesi in combustibili liquidi/liquefacibili, che tecnologicamente rappresentano l'aspetto più delicato nei processi CtL. Lo specifico delle attività condotte ha visto dapprima l'analisi critica di letteratura per l'identificazione dei processi di interesse per la valorizzazione del carbone del Sulcis.

Sono stati analizzati i diversi processi industriali con cui è possibile convertire il syngas in combustibili liquidi. Tra i principali processi identificati si possono elencare: sintesi del metanolo e derivati, sintesi di alcoli superiori, sintesi di Fischer-Tropsch. Tra queste, la sintesi di Fischer-Tropsch su catalizzatori a base di ferro, che produce una complessa miscela di idrocarburi formata sia da paraffine che da olefine, è stata ritenuta la più adatta, in quanto (1) in grado di dare prodotti facilmente commercializzabili e ad elevato valore aggiunto, (2) adatta a convertire un gas di sintesi con le proprietà di quello ottenuto per gassificazione del carbone, (3) accoppiabile a processi di CO_2 capture and sequestration per la riduzione delle emissioni di CO_2 in atmosfera.

A valle si è proceduto ad una prima progettazione di massima di un set-up sperimentale per condurre le attività di ricerca e acquisizione preliminare di alcune apparecchiature. Sono state contattati due diversi fornitori di apparecchiature di laboratorio "chiavi in mano". La progettazione dell'impianto è stata realizzata tenendo presente le seguenti peculiarità dei processi di interesse: (i) le operazioni vengono condotte a partire da (o quantomeno in presenza di) CO e H_2, gas tossico il primo, altamente infiammabile il secondo; (ii) le operazioni potrebbero dover essere condotte ad alta pressione; (iii) le operazioni potrebbero portare ad una miscela di prodotti di reazione di cui alcuni potrebbero essere liquidi alle condizioni di processo e solidi in condizioni ambiente; (4) il processo, soprattutto se operato in condizioni trifasiche (catalizzatore solido, reagenti gassosi, prodotti (parizalmente) liquidi), potrebbe richiedere l'esercizio dell'impianto in continuo, anche in assenza di operatori. E' stato identificato anche un sistema gascromatografico idoneo alla quantificazione dei componenti uscenti dal sistema in fas gas.

L'attività svolta ha permesso di estendere il know-how sui processi di liquefazione del carbone, identificando le possibili vie per la sua valorizzazione e permettendo di fare uno stato dell'arte di esse. L'attività sperimentale condotta ha dimostrato come la sintesi di Fischer-Tropsch su catalizzatori a base di ferro sia di un'opzione molto promettente su cui investire. I problemi scientifici aperti sulla tematica sono molteplici. Tra essi vale la pensa di ricordare la comprensione del meccanismo di reazione, lo studio della cinetica del processo, lo studio della possibilità di accoppiare il processo con sistemi di CCS, il disegno del reattore, ecc.

Altra attività, svolta presso l'Università di Pisa, è relativa allo sviluppo di un modello matematico teso a simulare il comportamento dinamico di un reattore di sintesi Fischer-Tropsch (FT) a letto fisso multitubolare raffreddato con acqua bollente ad alta pressione riempito con catalizzatore a base di ferro e alimentato con syngas prodotto da gassificazione di carbone (bassi rapporti H_2/CO). E' stato scelto un catalizzatore a base di ferro in quanto questo tipo è il migliore quando si opera con bassi rapporti H_2/CO nel syngas data la sua capacità a promuovere la

reazione water-gas shift. Questo avviene quando il syngas è prodotto da carbone, come nel nostro caso, o altri materiali ricchi di carbonio (bitume, residui pesanti da raffineria, oli pesanti, etc..).

Tale modello è finalizzato all'analisi del processo e alla predizione del comportamento del reattore in transitorio a seguito di modifiche dei principali parametri d'ingresso. Il modello prevede due fasi: una fase solida (catalizzatore) e una fase gassosa.

Il modello sviluppato è stato implementato su Matlab®, un software commerciale (come richiesto da contratto) sviluppato dalla compagnia statunitense MathWorks®, utilizzando SIMULINK® come piattaforma di simulazione. SIMULINK® è uno strumento interattivo per la modellazione, simulazione ed analisi di sistemi dinamici. Il modello è stato validato con dati sperimentali ottenuti in un reattore FT tubolare a letto fisso contenente il suddetto catalizzatore. Al momento il reattore FT è stato discretizzato in 20 celle, ma si conta di aumentarle e portarle a 40 in quanto i tempi computazionali con ode15s sono molto bassi (90000 sec in soli 15 sec).

Aumento dell'efficienza delle tecnologie di cattura della CO_2 con produzione di elettricità "zero emission"

Questa linea si sviluppa in 4 obiettivi:

- Attività sperimentali sulla cattura della CO_2 ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi a base di ossido di calcio: L'obiettivo si riferisce alla messa a punto un sorbente solido di CO_2 ad alta efficienza e durata; adattamento e messa a punto dell'impianto sperimentale Zecomix per prove di assorbimento della CO_2 e dell'H_2S dal syngas prodotto mediante gassificatore di carbone a letto fluido ad ossigeno.
- Studi modellistici/sperimentali sui processi di cattura della CO_2 con solventi: viene effettuata acquisizione di dati e di competenze sul processo di cattura della CO_2 mediante ammine. L'attività sperimentale viene svolta sul syngas prodotto negli impianti di gassificazione della Piattaforma Pilota Sotacarbo.
- Sviluppo di nuovi bruciatori avanzati per la combustione di syngas ricchi di idrogeno: viene sviluppato un nuovo bruciatore avanzato per turbogas, di tipo Trapped Vortex per la combustione stabile, efficiente, e a basse emissioni di syngas ricchi di idrogeno (fino ad idrogeno puro) provenienti da impianto operanti in modalità "pre-combustion carbon capture".
- Messa a punto delle migliori tecnologie per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone: viene eseguita l' analisi numerica e comparativa di sistemi a ossi-combustione per la cattura di CO_2 operanti in condizioni atmosferiche e pressurizzate.

Attività sperimentali sulla cattura della CO_2 ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi a base di ossido di calcio

Si tratta di attività volte a mettere a punto un processo di cattura della CO_2 basato sull'utilizzo dei sorbenti solidi ad elevata temperatura. Sono stati conseguiti 3 obiettivi:

- il completamento della piattaforma sperimentale Zecomix della Casaccia;
- la messa a punto, laboratorio, di un sorbente sintetico ad elevate prestazioni (150 cicli di assorbimento/rigenerazione con limitate perdite di efficienza e prossimo obiettivo raggiungibile 500 cicli), da utilizzare nello stesso Zecomix;
- l'approfondimento di alcune tematiche legate alla modellistica sia del reattore di decarbonatazione che del sistema complessivo di assorbimento e rigenerazione applicabile su scala industriale.

Le attività svolte negli ultimi anni sia di laboratorio che modellistici sono sfociati nella realizzazione della piattaforma sperimentale ZECOMIX atta a testare processi avanzati sia di gassificazione che di cattura della CO_2, basato sull'utilizzo dei sorbenti solidi ad elevata temperatura, con produzione di idrogeno e suo utilizzo in microturbina a gas. La taglia di impianto fissata, 50 kg/h di carbone, e la scelta di operare a pressione atmosferica (dettata principalmente da motivi legati alla minore onerosità progettuale ed autorizzativa) hanno portato ad una dimensione impiantistica tale da permettere di testare tutti i processi su scala significativa; per tale motivo l'impianto può catalogarsi come pilota.

La piattaforma sperimentale ZECOMIX, è stata progettata e realizzata con l'obiettivo di testare le diverse fasi di processo del ciclo omonimo. Si tratta di una infrastruttura molto flessibile, che si presta particolarmente sia allo studio sperimentale che allo sviluppo/qualificazione di modellistica applicata ai processi ed ai componenti.

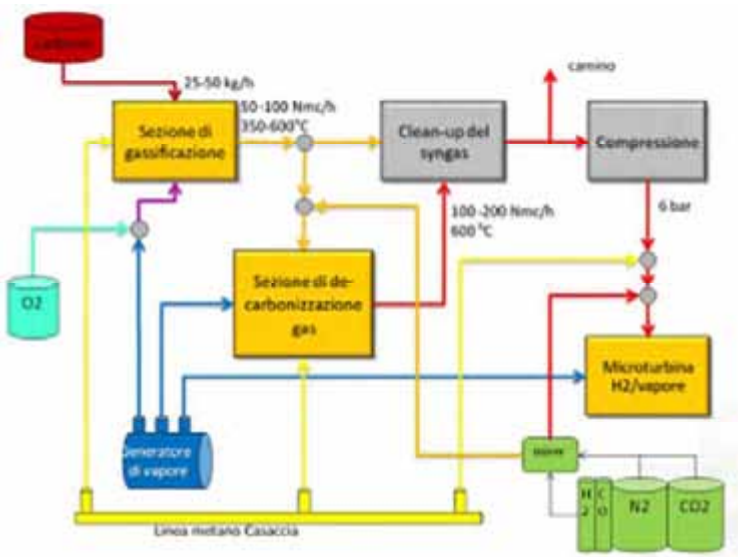


Figura 114. Schema a blocchi della piattaforma sperimentale ZECOMIX

L'impianto è rappresentato nello schema di Figura 114 ed è costituito essenzialmente da:

- una sezione di gassificazione, costituita da un gassificatore a letto fluido da 50 kg/h di carbone e da un sistema di adduzione della miscela ossigeno e vapore preriscaldata per mezzo di uno scambiatore di calore a recupero dell'entalpia del syngas prodotto; è possibile inviare in più punti del gassificatore miscele con diverse percentuali di O_2/H_2O, al fine di ottimizzare il funzionamento del reattore; è possibile inoltre, mediante gas-cooler, variare la temperatura di uscita del syngas dalla sezione;
- una sezione di decarbonatazione, che comprende principalmente un reattore di decarbonatazione di gas, anch'esso a letto fluido, dimensionato per decarbonizzare una portata di syngas pari a circa 100 Nm^3/h proveniente dal gassificatore o prodotto mediante miscelamento di gas tecnici; è possibile inviare al carbonatatore miscele di gas di varia natura, miscelando opportunamente azoto, CO_2, CO, metano, idrogeno e vapore;
- una sezione di produzione di energia elettrica, costituita essenzialmente da una microturbina da 100 kWe modificata per l'utilizzo con idrogeno/vapore e da un compressore/deumidificatore di syngas per portare lo stesso alla pressione di funzionamento della microturbina.

Sono presenti inoltre una serie di dispositivi per il trattamento del syngas (cicloni, scrubber di lavaggio) al fine di renderlo idoneo per il suo utilizzo nella microturbina, ed un generatore di vapore, necessario per il funzionamento dei 3 componenti principali. La piattaforma è in grado di effettuare attività sperimentali sulle seguenti tematiche:

- la gassificazione, in letto fluidizzato, di carboni "difficili" perché ad alto contenuto di tar e zolfo, come il carbone Sulcis, con processo alimentato da vapore/ossigeno preriscaldati a 600 °C;
- il possibile riutilizzo, all'interno del gassificatore stesso, delle ceneri di gassificazione e di altre scorie e/o additivi a base alcalina, per desolforazione e decarbonizzazione "in situ";
- la cattura della CO_2 ad elevata temperatura (600 °C), mediante sorbenti solidi sintetici, studiati in laboratorio per mantenere inalterata la loro efficacia anche dopo centinaia di cicli assorbimento/rigenerazione (vedi oltre); la cattura potrà essere testata sia su syngas di gassificazione che su fumi di combustione di diversa provenienza (ciclo combinato a metano o centrale a polverino di carbone);
- la cattura contemporanea di CO_2 ed H_2S all'interno del reattore di decarbonatazione;
- la rigenerazione del sorbente (calcinazione) e la sua capacità di mantenere inalterate le sue caratteristiche;
- la produzione di idrogeno da metano mediante steam reforming e CO-shift con cattura "in situ" della CO_2;
- la produzione di energia elettrica mediante microturbina funzionante con miscela di H_2 e vapore;
- le problematiche di integrazione impiantistica di stabilità di funzionamento
- la modellistica di componente e di sistema (reattori a letto fluido, chimica di reazioni eterogenee, cinetica chimica, simulazione dinamica).

Figura 115. Piattaforma sperimentale Zexomix

Nel corso della presente annualità, è stata completata la realizzazione dell'impianto (Figura 115)con l'esecuzione dei seguenti lavori:

- montaggio dello scambiatore di preriscaldo della miscela O_2/vapore, del gas-cooler per la regolazione della temperatura di uscita del syngas e del riscaldatore elettrico dell'ossigeno;
- allacci meccanici ed eletttro-strumentali della sezione di gassificazione al resto dell'impianto;
- montaggio del sistema di caricamento del carbone e messa a punto della procedura automatica di controllo della portata di carbone in ingresso;
- realizzazione del piping di collegamento tra i serbatoi di stoccaggio gas e l'impianto;
- montaggio e fornitura dei serbatoi dei gas tecnici (CO_2, N_2, O_2);
- messa a punto del sistema di controllo dell'impianto.
- In parallelo, sono stati effettuati i collaudi delle seguenti apparecchiature:
- generatore di vapore e sistema di addolcimento acqua;
- compressore syngas;
- riscaldatori azoto, syngas e ossigeno;
- torcia;
- scrubber;
- bruciatori ausiliari del carbonatatore.

Il secondo obiettivo raggiunto è la messa a punto di un sorbente sintetico ad elevate prestazioni da utilizzare nel reattore di decarbonatazione dell'impianto Zecomix. Uno dei principali svantaggi della tecnologia CaL è la diminuzione della capacità di cattura dopo circa 5 cicli di separazione/rigenerazione quando viene usata dolomite naturale come sorbente. Per poter selezionare un materiale idoneo alla cattura della CO_2, il lavoro di ricerca svolto ha riguardato, essenzialmente, lo studio parallelo di pretrattamenti di materiali sorbenti e la sintesi di un materiale sorbente rigenerabile con la relativa caratterizzazione. Il primo ramo di ricerca riguarda i principali pretrattamenti di sorbenti, naturali o sintetici, prima di avviarli a cattura multi-ciclica della CO_2 in TGA mentre il secondo ramo di ricerca è stato focalizzato sulla sintesi e la caratterizzazione in TGA di un sorbente a base di ossido di calcio disperso su una matrice di alluminato di calcio. L'attività in oggetto è stata completata con una prima formulazione di un modello di reattore a letto fluido per la cattura della CO_2. È stata utilizzata la teoria delle due fasi per studiare idrodinamica del letto e il modello a grani precedentemente sviluppato nella precedente annualità per modellare la reazione gas-solido tra la CO_2 e la fase attiva del sorbente. Lo studio è stato articolato nelle seguenti fasi:

Pretrattamento del materiale sorbente – La dolomite è un minerale composto principalmente da carbonato di calcio e carbonato di magnesio. Il pretrattamento principale analizzato consiste nel sottoporre il campione di dolomite ad una iniziale rampa di riscaldamento da temperatura ambiente ad una temperatura di 900 °C al fine di calcinare il carbonato di magnesio e calcio nei rispettivi ossidi. In seguito il campione viene lasciato alla temperatura di 900 °C per circa 5 minuti. Si è cercato, quindi, di studiare l'effetto della composizione

dell'atmosfera cui è esposto il campione solido durante il pretrattamento (Figura 116). L'obiettivo principale dello studio sul pretrattamento della dolomite è stato quello di investigare sull'effetto delle condizioni di rigenerazione sulla struttura del sorbente in particolare sulla decomposizione dei principale carbonati. In particolare si è studiato l'evoluzione della capacità sorbente lungo i cicli in TGA quando il pretrattamento avviene in atmosfera di N_2 ovvero CO_2/N_2 (50/50 v/v). Si è analizzato pure un particolare pretrattamento della dolomite: trigged calcination del $CaCO_3$ che consiste nell'esporre il campione solido a due diverse atmosfere. Durante la rampa di riscaldamento il sorbente è immerso in un'atmosfera di CO_2/N_2 (50/50 v/v) mentre durante la fase isoterma l'atmosfera è completamente composta da N_2. In questo modo si realizza una prima calcinazione del carbonato di magnesio mentre il $CaCO_3$ non viene decomposto a causa dell'elevata concentrazione della CO_2 ottenendo un materiale noto come dolomite semi-calcinata. Quando la temperatura arriva a 900 °C si interrompe l'afflusso di CO_2 in camera di reazione calcinazione e l'atmosfera risulta essenzialmente composta da azoto. In questo modo la calcinazione del $CaCO_3$ avviene in brevissimo lasso di tempo perché favorita, provocata (trigged) dall'assenza dell'CO_2 nell'atmosfera che avvolge il campione. Si è trovato che la capacità sorbente della dolomite naturale rimane costante per i primi 10 cicli quando sottoposta preventivamente a trigged calcination del $CaCO_3$.

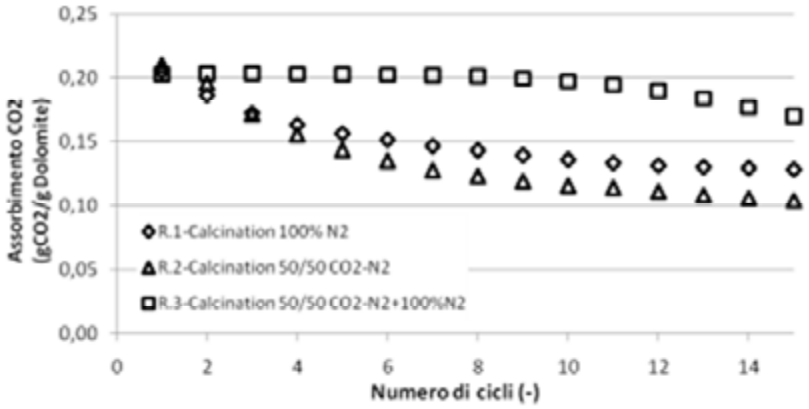


Figura 116. Aumento della stabilita del materiale col pretrattamento trigged calcination (Run 3)

Inoltre è stato trovato che all'aumentare del tasso di riscaldamento sia della trigged calcination che della rigenerazioni successive le prestazioni del materiale decadono. Probabilmente questo fenomeno è dovuta alla maggiore stabilità strutturale che la particella avrebbe quando sottoposto ad un riscaldamento più lento. È stato analizzata anche l'influenza del tempo del pretrattamento (30, 60, 90, 360 minuti) e della temperatura massima raggiunta (1000-1100 °C) osservando che l'aumento di temperatura non influenza le prestazioni del sorbente se sottoposto a trigged calcination mentre le prestazioni decadono quando il materiale viene sottoposto sempre alla stessa atmosfera (N_2 o N_2/CO_2). Questo fenomeno potrebbe essere spiegato con la formazione di una struttura con mesopori durante la trigged calcination risultando più stabile, quindi, alla sinterizzazione dovuta all'aumento della temperatura.

Infine, è stato analizzato un ulteriore pretrattamento che consiste nel sottoporre il materiale sorbente ad una isoterma di 600 °C in atmosfera di CO_2/N_2 (50/50, 16/84, 12/88 v/v) per un periodo di 2 ore ovvero 72 ore (*long carbonation*). È stato trovato che quando la dolomite naturale viene trattata preventivamente con la trigged calcination e poi da un secondo trattamento di long carbonation le prestazioni del sorbente decadono con l'aumento temporale di quest'ultimo trattamento, mentre il periodo della long carbonation sembra non avere nessun effetto quando il materiale viene preventivamente trattato solamente con azoto.

Sintesi e caratterizzazione del materiale sorbente – Il materiale sintetizzato è composto da una fase attiva di ossido di calcio disperso in una matrice di alluminato di calcio. In particolare, sono stati ottenuti due serie di campioni contenenti 75 e 85% della fase attiva. Il materiale è stato sottoposto a cattura multi-ciclica della CO_2 per poterne determinare sia la capacità sorbente sia come questa varia lungo una serie di cicli di separazione/rigenerazione. Lo studio principale riguarda l'influenza delle condizioni di rigenerazione del sorbente sulle prestazioni del sorbente. Sono state prese in considerazione tre condizioni di rigenerazione : mild, moderately severe e severe. La prima consiste nel rigenerare il materiale in atmosfera composta da CO_2/N_2 (16/84 v/v) sottoposta ad una temperatura di 900 °C, nella seconda condizione, l'atmosfera risulta uguale alla prima ma la temperatura viene aumentata a 1000 °C, infine nella terza condizione l'atmosfera risulta composta per l'86% di CO_2 e la rimanente parte N_2 mentre la temperatura rimane a 1000 °C. Tra le tre condizioni di rigenerazioni analizzate, l'ultima è quella che realisticamente bisogna attuare nella tecnologia CaL al fine di ottenere una corrente altamente concentrata in CO_2. La rampa di riscaldamento è stata fissata in 100 °C/min, mentre il sorbente è sottoposto a calcinazione per 15 minuti. Una volta completato la rigenerazione del materiale questo viene raffreddato in atmosfera di CO_2/N_2 (16/84 v/v) alla temperatura di carbonatazione con un tasso di 100 °C/min ad

una temperatura di 600 °C lasciato per in isoterma per 20 minuti. La capacità sorbente del materiale sintetico è stata confrontata con quella della dolomite naturale: si è visto che dopo i primi sei cicli, in cui il materiale naturale mostra una capacità sorbente superiore a quello sintetico, la capacità sorbente della dolomite naturale inizia a decadere mentre quella del sorbente sintetico inizia a crescere fino a stabilizzarsi ad un certo valore lungo i cicli di sperimentazione. Inoltre è stata valutata l'influenza di un pretrattamento del sorbente sulla capacità di separazione della CO_2 da una corrente gassosa. Tale pretrattamento consiste nel sottoporre il campione solido ad una temperatura di 600 °C in atmosfera reagente di CO_2/N_2 (16/84 v/v) per un periodo di 80 minuti. Si è visto che all'aumentare del carico della fase attiva il pretrattamento aumenta le prestazioni del materiale sintetico. Si passa da un incremento percentuale di circa il 15% per il sorbente che contiene il 75% di CaO ad un incremento del 41% per il sorbente all'85% di CaO.

Infine la migliore stabilità in termini di assorbimento della CO_2 è stata trovata per il sorbente con un carico di fase attiva del 75% per il quale si è osservata come all'aumentare del numero di cicli sperimentali fino ad un massimo di 150 le prestazioni del materiale non decadono come mostrato chiaramente in Figura 117.

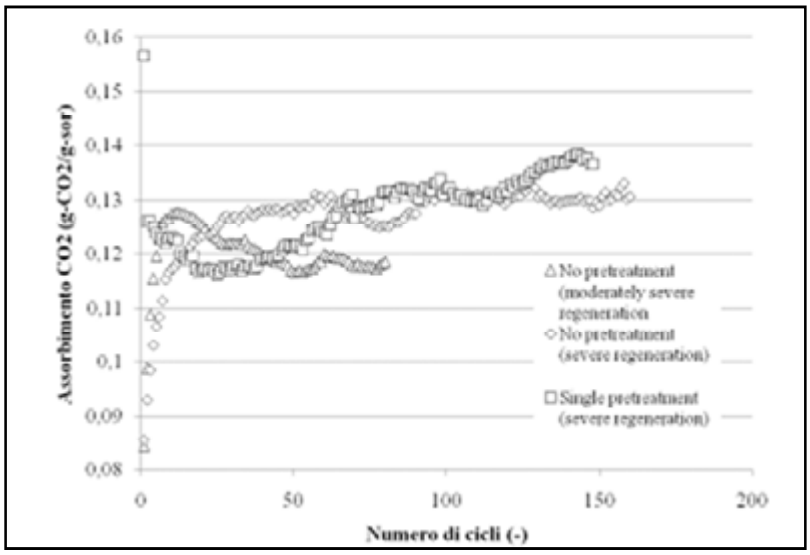


Figura 117. Assorbimento della CO_2 del materiale con 75% di fase attiva in funzione dei cicli di separazione/rigenerazione

Modellazione di un letto fluido per la cattura della CO_2 - Per la cattura della CO_2 con sorbenti solidi, viene scelta la tecnologia a letto fluido in quanto questa garantisce l'omogeneità della temperatura in tutto il volume del letto, un buon grado di mescolamento tra catalizzatore di SMR e sorbente della CO_2. Inoltre se viene richiesta continuità al processo di cattura, il letto fluido facilità la circolazione del solido verso un reattore di rigenerazione del sorbente. Il letto di particelle solide (sorbente ed eventuale catalizzatore di SMR) viene modellato secondo la teoria delle due fasi. In particolare la fase gas (*bubble gas* ed *emulsion gas*) viene idealizzata come un reattore a pistone (*plug flow reactor*, PFR) in cui si trascura la diffusione radiale mentre le grandezze di interesse (e.g. concentrazione, velocità del gas) variano al variare della quota *z*. La fase solida viene, invece, concepita come un reattore a mescolatore perfetto (*perfect mixer* PMR) in cui le variabili prese in considerazione non mostrano alcun gradiente spaziale. I risultati dell'integrazione di questo modello sono stati confrontati con dati pubblicati in letteratura e riguardanti la produzione di idrogeno con SMR ottenendo una buona sovrapposizione.

Nel terzo obiettivo è stato effettuato dapprima un approfondimento della cinetica di reazione tra l'anidride carbonica e l'ossido di calcio. In particolare è stato studiato l'effetto delle dimensioni delle particelle di dolomite calcinata – per diametri medi compresi tra 0,1 e 1,5 mm – attraverso il modello a grani precedentemente sviluppato. Il modello è risultato idoneo a descrivere le caratteristiche essenziali del comportamento del sorbente nel processo di cattura della CO_2, come il brusco cambiamento da un'alta velocità di conversione a una molto più lenta, come osservato da diversi autori; il modello spiega anche il perché la capacità di assorbimento raggiunta in pratica può risultare inferiore al valore teorico. Nel caso delle particelle di sorbente di minore dimensione, è stato trovato un ottimo accordo tra i risultati sperimentali e quelli numerici utilizzando la costante cinetica proposta in letteratura. All'aumentare delle dimensioni della particelle, si è trovato una buona sovrapposizione tra dati sperimentali e numeri quando si fa riferimento all'aggregazione dei grani secondo lo schema geometrico *cluster-cluster aggregate* per calcolare la tortuosità dei pori in funzione del grado di vuoto della particella.

È stato inoltre modellato come mescolatore perfetto, un reattore a letto fluido per la reazione di reforming del metano SMR, CO-shift e simultanea cattura della CO_2. In particolare è stato formulato un modello short-cut e implementato in ambiente Matlab per lo studio dell'interazione tra l'idrodinamica del letto e la cinetica delle

reazione nella maniera più semplice consentita per ottenere comunque risultati significativi. E' stata ricavata l'equazione di bilancio molare per ciascuna specie chimica, con riferimento al volume occupato dal letto fluidizzato. Il modello a mescolamento perfetto è stato utilizzato per descrivere la dinamica del letto fluidizzato dove avviene la produzione di H_2 tramite reforming SMR e contemporanea cattura della CO_2. L'intero letto viene supposto isotermo. Le reazioni catalitiche e la separazione della CO_2 avvengono in corrispondenza della fase solida. Il modello cinetico implementato nella soluzione del sistema reattivo è basato essenzialmente sul modello a grani per quanto riguarda la reazione gas-solido e la cinetica di Xu-Froment per quanto riguarda le reazioni catalitiche SMR e di CO-shift. In particolare il modello consente di prevedere la produzione dell'idrogeno e le curve di breakthrough del reattore associate con l'esaurimento della capacità sorbente della dolomite calcinata caricata nel letto.

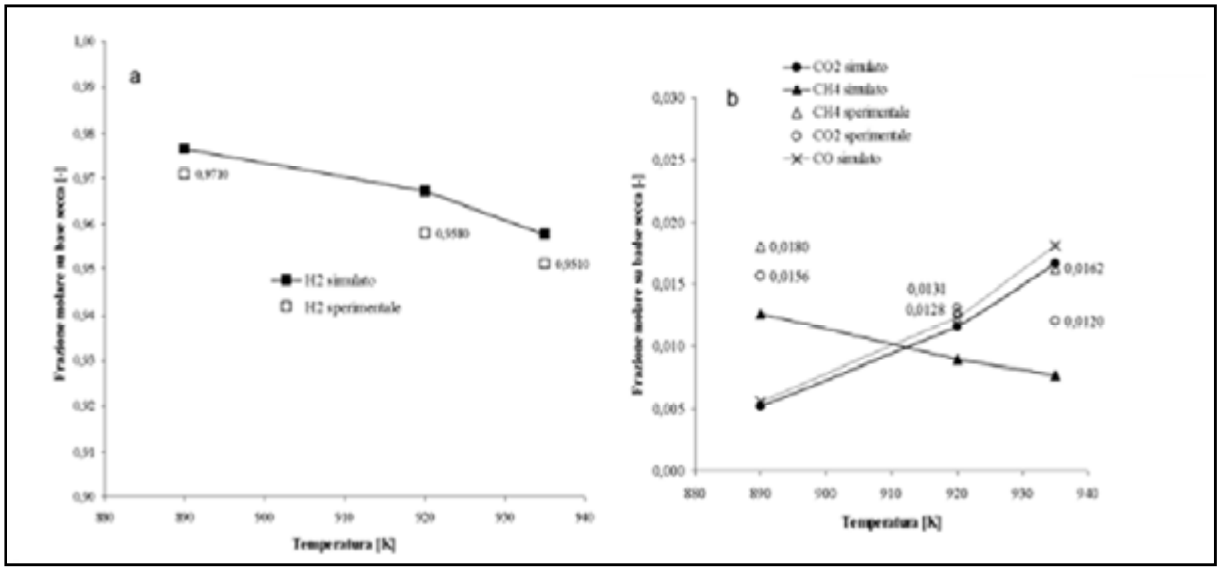


Figura 118. Confronto tra risultati sperimentali e quelli numerici per un letto fluido a 935 K per la cattura della CO_2. Idrogeno prodotto (sinistra); frazione molare secca CH_4 e CO_2 (destra)

Infine viene presentata una proposta per rendere continuo il processo di gassificazione del carbone con cattura della CO_2 dal combustibile gassoso per la produzione di idrogeno. La gassificazione, endotermica, del combustibile solido ben si combina con la cattura, esotermica, della CO_2 da parte del sorbente in un letto fluidizzato con vapore. Questo è connesso alla sezione di combustione-calcinazione attraverso un sistema di circolazione dei solidi granulari. Qui le particelle di combustibile non completamente gassificate, trasportate insieme al materiale del letto, vengono bruciate insieme ad un combustibile addizionale introdotto in misura appropriata, fornendo il calore richiesto dalla rigenerazione del sorbente. Il materiale solido del letto viene quindi separato dal gas in un ciclone e torna nella sezione di gassificazione, fornendo un ulteriore apporto di energia legato al calore sensibile posseduto. Queste considerazioni sono suffragate da alcuni studi recenti sulla fattibilità del processo di produzione di idrogeno qui delineato (Figura 118).

Studi modellistici/sperimentali sui processi di cattura della CO_2 con solventi

E' stato acquisito e installato presso i laboratori del Centro Ricerche Sotacarbo di Carbonia un impianto sperimentale di assorbimento e stripping dell'anidride carbonica denominato GAIA (Greenhouse gas Absorption In Amine-based solvents pilot plant), di proprietà del Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università degli Studi di Cagliari.

Sono state effettuate attività sperimentali volte a valutare le prestazioni del processo di assorbimento dell'anidride carbonica, applicato a una miscela gassosa che simuli i fumi di combustione tipici delle centrali termoelettriche a carbone o il syngas prodotto nella piattaforma pilota Sotacarbo, opportunamente trattato mediante il processo di CO-shift, con differenti solventi di tipo chimico (miscele di ammine in soluzione acquosa). In particolare, riguardo alla tipologia del solvente, è stata principalmente testata la MEA con concentrazione pari al 30% in peso (5 M). Sono state inoltre condotte delle prove con MEA in diverse concentrazioni (3 M e 4 M) e con una miscela MDEA/piperazina con concentrazione pari al 30% in peso, contente il 2% in peso di piperazina.

L'impianto sperimentale è costituito da una colonna in vetro suddivisa in due sezioni fondamentali:

- una colonna a riempimento nella sezione superiore in cui è possibile effettuare l'assorbimento tramite solventi liquidi;
- una sezione inferiore dimensionata per il processo di rigenerazione del solvente esausto.

La colonna di assorbimento nella sezione superiore, caratterizzata da un diametro interno di 80 mm, è dotata di un riempimento dell'altezza di 1 m costituito da anelli Rashig, in vetro, da 8 mm sostenuto da una griglia forata. La parte inferiore della colonna, sempre del diametro di 80 mm, costituisce uno scambiatore di calore dotato di tre serpentine coassiali per il vapore. Tale sistema è stato pensato per operare la rigenerazione "offline" del solvente impiegato. L'impianto è stato dotato di un sistema di miscelazione e distribuzione dei gas in grado di simulare la miscela gassosa tipica del syngas prodotto da differenti tecnologie di gassificazione (a ossigeno e ad aria) e dei fumi di combustione.
I gas da trattare (azoto e anidride carbonica) sono acquistati in bombole, equipaggiate con un sistema di riduzione della pressione (primo stadio) e, relativamente alla bombola di CO_2, da un riscaldatore elettrico installato per evitare danni alle apparecchiature a valle dovute alle basse temperature che si hanno in fase di decompressione. I gas vengono inviati al sistema automatico di miscelazione che permette la realizzazione di miscele dei due gas con concentrazione di CO_2 variabile nel campo 0-100%. La regolazione della concentrazione della miscela è effettuata mediante una manopola che comanda una valvola proporzionale di omogeneizzazione ad alta precisione. Il sistema di equilibrazione automatica fa sì che eventuali oscillazioni delle pressioni dei gas in ingresso non influiscano sulla stabilità della miscela prodotta. A valle del miscelatore è presente un sistema di regolazione finale della pressione e un sistema di regolazione della portata mediante due flussimetri.

La miscela di gas così ottenuta viene immessa nella colonna al di sotto del riempimento e risale verso l'alto in controcorrente con la soluzione solvente, immessa in corrispondenza della testa della colonna. Il gas trattato viene poi scaricato in atmosfera, tramite apposito condotto, all'esterno dei laboratori. Sia il gas in ingresso alla colonna che quello in uscita vengono campionati e analizzati per mezzo di un gas cromatografo, descritto più nel dettaglio nel seguito. I collegamenti tra il regolatore di portata dei gas e l'impianto, oltre allo scarico in atmosfera della colonna, sono stati realizzati mediante tubi in rilsan, al fine di garantirne la flessibilità e la semplicità di sostituzione. La soluzione solvente, stoccata in serbatoi di accumulo, viene inviata alla colonna mediante una apposita pompa e viene successivamente raccolta sul fondo della colonna stessa.

Un sistema di valvole consente di selezionare due differenti modalità operative:
- funzionamento con il solvente a ciclo aperto;
- funzionamento con ricircolo del solvente.

Al fine di garantire la sicurezza del personale operante, l'impianto è stato dotato di una serie di semplici dispositivi di sicurezza
- una vasca di raccolta per sversamenti di solvente;
- un sistema di protezione da eventuali spruzzi di solvente in circolo realizzato tramite pannellature rimovibili, in plexiglass trasparente;
- un analizzatore della salubrità dell'aria che monitora la concentrazione di CO_2 presente; provvisto di allarme (ottico e acustico). Tale misuratore è dotato di un dispositivo di controllo remoto che consente la visualizzazione degli allarmi fuori dell'ambiente ove è localizzato il rischio.

Il sistema è dotato di prese di campionamento, poste a monte della colonna (e, in particolare, a valle del sistema per la regolazione finale della pressione) e a valle della stessa, dove sono presenti due stacchi per il campionamento della miscela gassosa rispettivamente da trattare e trattata. Il gas campionato viene inviato, mediante tubi in rilsan, a un micro gascromatografo in grado di analizzare la concentrazione nel gas dei composti oggetto della ricerca (N_2, CO_2) oltre che di altri componenti come H_2, O_2, CO, CH_4, H_2S, COS, C_2H_6 and C_3H_8.
Oltre al sistema di analisi gas, l'impianto è dotato di due sonde di temperatura Pt100 installate nella testa e nel fondo della colonna. I dati rilevati da tali termocoppie sono riportati su un pannello di controllo posto sull'apparecchiatura. Un sistema automatico di acquisizione e registrazione permette l'archiviazione dei dati e consente di analizzare, stampare ed esportare le variabili registrate su altre applicazioni per PC.

Al fine di approfondire le conoscenze sul processo di assorbimento chimico dell'anidride carbonica, è stata effettuata una campagna sperimentale in cui è stato possibile testare l'impianto in diverse condizioni operative.

Nella prima parte della campagna sperimentale si è scelto di effettuare una serie di test a ciclo chiuso, per un totale di 50 ore di sperimentazione, nell'intento di realizzare uno screening preliminare dei diversi solventi. Poiché l'assorbimento chimico con ammine è la scelta tecnologica tipica dei sistemi di cattura della CO_2 sui fumi di combustione, si è scelto di operare con una concentrazione di CO_2 pari circa il 15% in volume. Per quanto riguarda invece il solvente, come base di riferimento, è stata scelta la MEA con concentrazione pari al 30% in peso (5 M). Sono state inoltre condotte delle prove di saturazione su MEA in diverse concentrazioni (3 M e 4 M) e su una miscela MDEA/PZ con concentrazione pari al 30% in peso.

Nella seconda parte della campagna sperimentale , sono state condotte delle prove a ciclo aperto, per un totale di 22 ore di sperimentazione, sui diversi solventi, a diverse concentrazioni di CO_2. Nello specifico è stato analizzato il

processo di assorbimento chimico della CO_2 su correnti gassose che presentano concentrazioni di CO_2 del 5, 15 e 30% in volume; tali concentrazioni corrispondono rispettivamente, in linea di massima, ai valori tipici dei fumi di impianti turbogas e di impianti supercritici a polverino di carbone, oltre che del syngas della piattaforma pilota Sotacarbo (a valle del processo di CO-shift). In questa fase della sperimentazione sono stati utilizzati come solventi MEA 3 M e 5 M e la miscela MDEA/PZ con concentrazione pari al 30% in peso. Compatibilmente con i limiti del sistema, sono stati testati diversi rapporti L/G (kmol solvente/ kmol di gas).

Al fine di poter determinare sperimentalmente il caricamento della soluzione utilizzata nel processo di assorbimento della CO_2 è stata utilizzata una metodica proposta da SINTEF (Trondheim, Norvegia), che si basa sul trattamento del campione con cloruro di bario che porta alla precipitazione del carbonato di bario e alla sua titolazione con acido cloridrico e idrossido di sodio.

Prove di saturazione a ciclo chiuso

Nell'intento di valutare il comportamento a saturazione dei diversi solventi tutte le prove sono state condotte nelle stesse condizioni operative:

- Portata miscela gassosa (CO_2/N_2): 2100 Ndm^3/h
- Composizione miscela gassosa: 14,5% CO_2
- Portata solvente a ricircolo: 80,0 dm^3/h
- Pressione operativa: 0,1 MPa
- Temperatura inizio prova: 25 °C

Si è osservato che i risultati dei test sperimentali di saturazione della MEA 5 M condotti sull'impianto mostrano una buona ripetibilità. Nelle condizioni di prova considerate, la saturazione della monoetanolammina 5 M si raggiunge dopo circa due ore di funzionamento.
Per quanto riguarda le prove realizzate utilizzando soluzioni di MEA in differente concentrazione, come atteso, si è potuto verificare che una diminuzione della concentrazione di MEA nella soluzione solvente comporta un calo delle prestazioni del processo, che si manifesta in una riduzione dei tempi di saturazione. Va sottolineato che non si osservano grandi differenze tra il comportamento a saturazione della MEA 3 M e di quella 4 M.

Le prestazioni del processo di assorbimento della CO_2 nella soluzione di MEA hanno una relazione inversa rispetto al caricamento della soluzione (espresso come rapporto tra le moli di CO_2 e le moli di ammina), ossia decadono all'aumentare del caricamento. La riduzione dell'efficienza di rimozione è legata alla riduzione della concentrazione di MEA disponibile.

Si è osservato inoltre che durante le prove si verifica una variazione della temperatura in colonna a testimonianza del fatto che il processo non avviene in condizioni isoterme. Nello specifico la temperatura nella parte superiore della colonna di assorbimento, che inizialmente è pari a circa 25 °C, raggiunge i 41 °C al termine della prova. L'aumento della temperatura favorisce la cinetica di reazione e quindi la velocità di assorbimento, fenomeno controbilanciato dal fatto che all'aumentare della temperatura si ha una riduzione della solubilità del gas.

Infine sono state condotte le prove di saturazione della soluzione di MDEA/PZ (28%-2% in peso). La MDEA presenta una velocità di assorbimento più bassa e, essendo un'ammina terziaria, non è in grado di reagire direttamente con la CO_2 poiché manca del legame N-H necessario per la formazione degli ioni carbammati. Nelle soluzioni MDEA/PZ, la velocità di assorbimento migliora, poiché la piperazina agisce come promotore per la MDEA, formando rapidamente carbammati con la CO_2.

Complessivamente, si è osservato, effettuando un confronto tra tutti i solventi analizzati, che la reazione della CO_2 con le soluzioni di MEA presenta una velocità superiore rispetto a quella con la soluzione MDEA/PZ. Tuttavia, raggiunto un certo caricamento della soluzione, dopo circa 30 min di prova, la soluzione di MDEA/PZ presenta un comportamento confrontabile con le soluzioni di MEA.

Prove di assorbimento a ciclo Aperto

I successivi test di assorbimento sono stati effettuati con differenti rapporti liquido/gas (L/G), operando variazioni della portata sia di liquido (il cui valore minimo garantisce il corretto bagnamento della colonna) che di gas. In particolare si sono assunti valori del rapporto suddetto pari a 5, 6 e 9 rispettivamente.

Dai dati ottenuti durante i test effettuati con una soluzione acquosa di monoetanolammina 5 M, risulta evidente che l'elevata concentrazione di MEA nella miscela solvente comporta l'assorbimento pressoché totale (con efficienze sempre superiori al 99%) dell'anidride carbonica, anche quando questa è presente nel gas in concentrazioni elevate (30% in volume). Come atteso, l'efficienza di rimozione si riduce, ma in maniera quasi trascurabile, quando la concentrazione di MEA nella miscela solvente si riduce da 5 a 3 M.

I test impieganti miscele MDEA/PZ (in concentrazioni rispettivamente del 28 e del 2% in peso) hanno invece presentato prestazioni significativamente inferiori a quelle relative all'impiego delle soluzioni di MEA. Infatti la MDEA, come risaputo, è poco selettiva nei confronti della CO_2 e la concentrazione di piperazina si è dimostrata insufficiente per garantire una efficienza di separazione adeguata.

I risultati ottenuti nel corso della prima campagna sperimentale condotta sull'impianto GAIA, il cui scopo è stato principalmente quello di mettere a punto le apparecchiature e le procedure sperimentali, oltre che di fornire le prime indicazioni sul comportamento dei solventi in fase di assorbimento, consentono una pianificazione più precisa delle future campagne sperimentali.

Anzitutto è fondamentale effettuare una ulteriore ottimizzazione del processo in modo da ampliare il campo di variabilità del rapporto L/G. Successivamente verranno effettuati test di assorbimento con differenti solventi inviati all'impianto in differenti concentrazioni (come ad esempio la MDEA additivata con piperazina in concentrazioni superiori al 2% in peso).

Infine è attualmente in fase di valutazione la possibilità di equipaggiare l'impianto con un piccolo generatore di vapore che consenta l'impiego offline della parte inferiore della colonna come stripper per il solvente. In tal modo potrà essere testato quello che risulta essere l'aspetto più critico di tutte le tecnologie di separazione dell'anidride carbonica per assorbimento su solventi liquidi: la rigenerazione termica dei solventi stessi, processo caratterizzato da elevati consumi energetici che compromettono seriamente l'efficienza complessiva dell'impianto.

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

L'obiettivo prevede lo sviluppo di un nuovo bruciatore avanzato per turbogas, di tipo Trapped Vortex (TVC) per la combustione stabile, efficiente, e a basse emissioni di syngas ricchi di idrogeno (fino ad idrogeno puro) provenienti da impianto operanti in modalità "pre-combustion carbon capture".

Attivita' numerica di simulazione e progettazione

I sistemi TVC realizzati fino ad ora utilizzano la combustione in cavità come fiamma pilota per flussi premiscelati immessi a forte velocità. L'obiettivo del progetto è quello di ideare una apparecchiatura che funzioni interamente con il principio dei vortici intrappolati. Il sistema che si intende sviluppare realizza la combustione della parte pilota e della parte premiscelata all'interno di un unico volume, consentendo un più intimo e immediato contatto dei gas caldi prodotti con la miscela fresca, con l'intento di creare i presupposti per un regime di combustione fortemente diluito, al limite di tipo flameless.

Il TVC progettato è rivolto a turbine a gas che utilizzano camere di combustione anulari. Le due tipologie di syngas studiate sono:

- Syngas A: 19% H_2 ; 31% CO ; 50% N_2 ; LHV 6 MJ/kg;
- Syngas B: 33% H_2 ; 67%CO ; LHV 13,76 MJ/kg;

con i risultati CFD relativi a λ=1,75.

La tecnica più ovvia per realizzare il vortice nel volume che rappresenta la camera di combustione è quella di immettervi uno o più flussi tangenziali. Si è pensato quindi di disporre due flussi tangenziali i quali promuovono la formazione del vortice, mentre altri flussi contrapposti distribuiti verticalmente ne alimentano il cuore. Un grosso sforzo è stato fatto per modulare opportunamente portate e velocità, e quindi quantità di moto relative, dei flussi nonché dimensioni minime della camera di combustione. Infatti nella configurazione adottata si è instaurato un perfetto equilibrio tra l'azione dei flussi tangenziali, che tendono a generare il vortice, e l'azione dei flussi verticali che tendono a distruggerlo. In questo senso è bene sottolineare che è soprattutto il flusso tangenziale più distante dall'uscita ad essere determinante. Gli effetti negativi sulla posizione e la dimensione del vortice conseguenti ad una riduzione di portata di quest'ultimo sono risultati evidenti. Il flusso tangenziale più vicino all'uscita è utile soprattutto ad incrementare la densità di potenza dell'apparecchiatura nel caso di funzionamento premiscelato.

Sono state studiate due tipologie di funzionamento. Nella prima i flussi tangenziali sono premiscelati, mentre quelli verticali diffusivi alimentano la fiamma pilota del sistema. Nella seconda invece tutto il combustibile ed una parte dell'aria vengono alimentati attraverso i fori verticali, mentre quelli tangenziali apportano la restante aria.

Funzionamento in regime premiscelato **-** Dovendo la parte pilota garantire il sostentamento della parte premiscelata, essa non poteva che essere diffusiva. L'idea di base è stata quindi quella di generare al centro del sistema un cuore caldo che potesse garantire l'accensione della parte premiscelata magra. Si è pensato pertanto di disporre l'immissione di aria e combustibile pilota sulle due facce verticali opposte. Per problemi di sicurezza i due flussi premiscelati vengono iniettati a velocità superiori a 100 m/s. Le temperature massime raggiunte sono

dell'ordine dei 1700 K per il syngas A e 2000 K per il syngas B, registrate in corrispondenza della parte diffusiva. La differenza è chiaramente attribuibile al maggiore contenuto di idrogeno. L'incremento dell'eccesso d'aria porta certamente ad una riduzione di tali picchi ma determina il peggioramento dell'efficienza di combustione. In generale si può affermare che se da una parte l'idrogeno brucia rapidamente, è responsabile dei valori massimi di temperatura e necessiterebbe di maggiori quantità di aria, dall'altra il monossido di carbonio è più lento a bruciare e richiederebbe temperature mediamente più elevate.

L'indice di emissione $EINO_x$ (g/kg_{fuel}) risulta praticamente nullo per entrambi i casi, mentre l'indice EICO vale 1,76 g/kg_{fuel} per il caso A e 5,84 g/kg_{fuel} per il caso B.

***Funzionamento in regime diffusivo* -** Nel funzionamento in regime diffusivo, i flussi tangenziali sono costituiti da sola aria, i fori disposti circolarmente sono chiusi, mentre dei rimanenti cinque fori verticali tre sono per il syngas e due per l'aria in maniera alternata. A differenza del caso precedente la reazione è concentrata verso il centro del sistema. Le temperature sono mediamente più alte. Chiaramente essendo in regime diffusivo, pur con lo stesso eccesso d'aria, il mescolamento dei reagenti non è perfetto e quindi esistono zone con concentrazioni più vicine allo stechiometrico rispetto al caso premiscelato. Nonostante ciò i livelli di NO_x registrati si mantengono su valori quasi nulli, mentre per il CO risultano pari a EICO=2,54 e 2,63 g/kg_{fuel} (caso A e B rispettivamente). In questo caso inoltre la combustione appare maggiormente distribuita avvicinandosi di più al regime flameless.

***Densità di potenza* -** Dalle simulazioni effettuate variando le dimensioni della camera, e quindi la densità di potenza, è risultato che il comportamento del bruciatore rimane invariat,o tanto che i campi di velocità, temperatura, specie etc. sono perfettamente sovrapponibili. In definitiva si può concludere che al diminuire della taglia complessiva della macchina e quindi di conseguenza delle dimensioni complessive della camera di combustione, la densità di potenza aumenta secondo la correlazione $Pot^{-0.5}$.

La camera di combustione è stata studiata in condizioni di pressione atmosferica. In realtà le pressioni operative sono ben più alte e dipendono dal rapporto di compressione della macchina. Si è ritenuto quindi interessante verificarne il funzionamento in condizioni di pressione (circa 20 bar). L'aumento della pressione operativa da 1 a 20 bar, ragionando sempre a parità di velocità, comporta l'incremento della potenza di 20 volte, ma non della densità di potenza, che essendo valutata in MW/m^3bar, resta invariata. È utile sottolineare che lo schema cinetico adottato è ancora valido ed efficiente in queste condizioni. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono anche stavolta in linea con quelli già mostrati in condizioni atmosferiche. Quindi il comportamento dell'oggetto appare praticamente insensibile alla pressione operativa.

Attività sperimentale a supporto della modellazione

Sulla base del progetto di bruciatore TVC sviluppato da ENEA, il gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale (DIMI) dell'Università Roma Tre, nel quadro di un accordo di collaborazione con ENEA, ha condotto un'attività sperimentale a supporto e per la validazione del progetto. L'attività si è articolata in tre fasi

***Realizzazione del modello di bruciatore per prove a freddo* -** E' stato progettato e realizzato un modello di bruciatore TVC secondo la geometria sviluppata da ENEA. La progettazione ha previsto una fase preliminare basata su simulazioni numeriche CFD di tipo RANS, che ha consentito di risolvere alcune problematiche di carattere progettuale in particolare riguardanti l'influenza delle pareti sui campi di velocità. Data la complessità della geometria, particolare attenzione è stata rivolta alla progettazione e realizzazione dell'impianto di alimentazione.

***Messa a punto delle tecniche di misura* -** Sono state messe a punto le tecniche di misura per la caratterizzazione sperimentale del modello di bruciatore. In particolare, si è utilizzata la tecnica Particle Image Velocimetry (PIV) per la misura di campi bidimensionali di velocità e un array di microfoni per la misura delle fluttuazioni di pressione a parete in più punti. Per la messa a punto di entrambe le tecniche sono state condotte campagne di misura preliminari. Nella Figura 119 si riporta una foto del set up di prova per le misure PIV (a) e microfoniche (b).

***Misure di velocità e pressione* -** Sono state effettuate campagne di misura in varie condizioni di flusso secondo valori delle portate dei condotti di alimentazione preventivamente concordate con ENEA. Si sottolinea che i risultati ottenuti sono in buon accordo con quanto ottenuto dalle simulazioni numeriche a freddo. L'analisi degli spettri di pressione ha consentito di individuare le principali frequenze caratteristiche legate sia alla destabilizzazione del flusso entrante dai fori di diverso diametro (fenomeni di piccola e grande scala) che alle tipiche frequenze di risonanza della cavità, e di determinare l'influenza delle condizioni di funzionamento in termini di portate/pressioni di alimentazione.

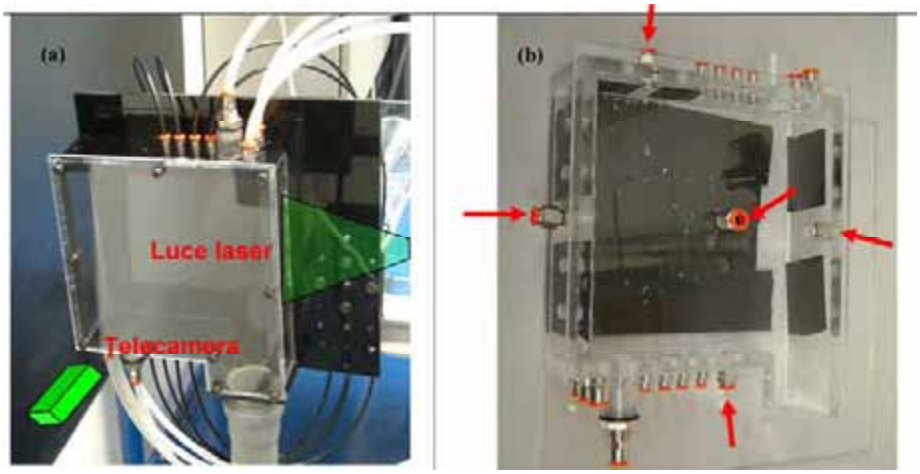


Figura 119. Schema del set-up di prova per le misure PIV (a) e microfoniche (b). Le frecce indicano la posizione dei 5 microfoni utilizzati

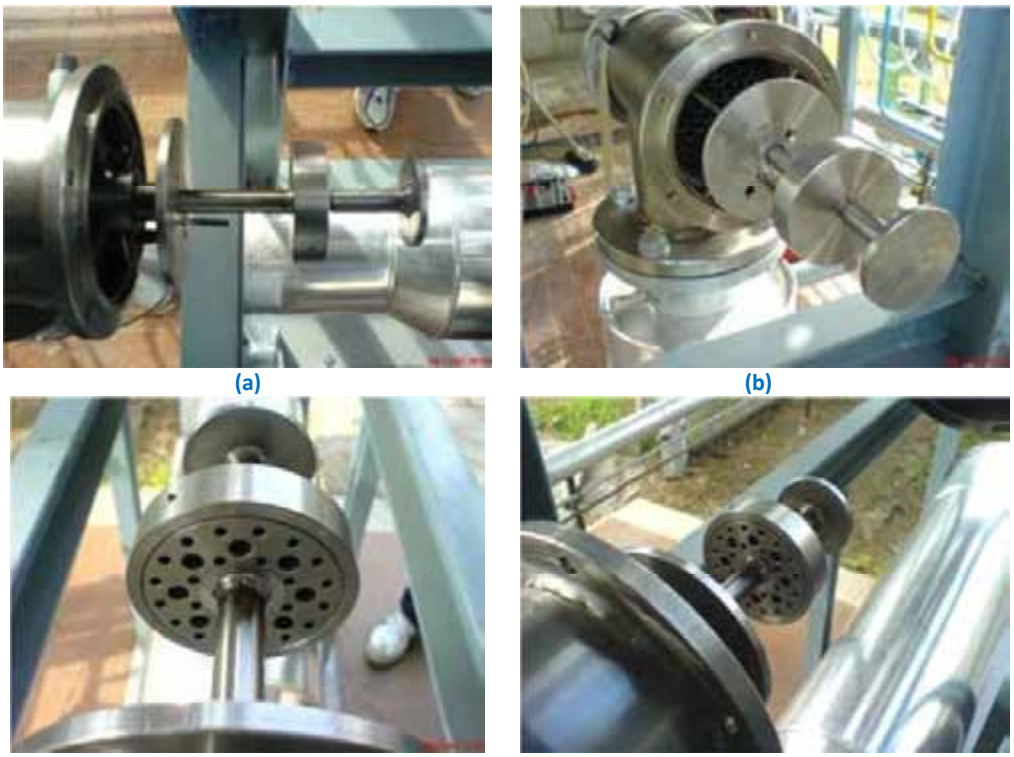
Sperimentazione ENEA su impianto MICOS di un bruciatore TVC – La realizzazione di un bruciatore TVC, in grado di operare in modalità flameless (ovvero senza fronte di fiamma, con basse emissioni ed alfa efficienza) impone che siano verificati particolari rapporti dimensionali della cavità, che vanno preventivamente individuati, in relazione alla configurazione geometrica del bruciatore. Al fine di fornire gli opportuni data fisici per la progettazione e la stima sperimentale dell'influenza di importanti parametri e rapporti dimensionali si è deciso di effettuare un'accurata sperimentazione su di una facility disponibile (impianto MICOS) con un bruciatore TVC di prima generazione, inadatto all'obiettivo ultimo di sviluppare un bruciatore per turbina con camera anulare, ma idoneo alla generazione di regole di scalatura.

Oggetto della sperimentazione è un bruciatore TVC di prima generazione**,** in cui vi è l'intrappolamento di due vortici (a valle dei due corpi usati come bluff-body (il *first after-body* e il *second after-body*). Il corpo centrale è costituito da un asse tubolare al cui interno sono posizionati i tubi concentrici coassiali di alimentazione aria (detta *"aria primaria"*), e combustibile. Su questo asse tubolare è calettato un primo disco (*forebody*) e un secondo disco che costituisce il *first after-body*. Questo primo disco è di spessore elevato in quanto l'interno cavo presenta intercapedini realizzate allo scopo di alimentare gas ed aria primaria agli ugelli ricavati sulla faccia interna. La distanza tra il *forebody* e il *first after-body* è variabile e determina la cavità entro cui è intrappolato il primo vortice.

Il combustibile (metano o idrogeno) giunge nella cavità attraverso 8 getti prodotti da altrettanti fori ricavati nel *first after-body*. L'aria comburente (detta *"aria primaria"*) fluisce dal *first after-body* attraverso 16 fori circolari di più piccolo diametro. La regione di scia dietro l'*after-body* forma una zona a bassa velocità che consuma l'eccesso di combustibile. La letteratura mostra che l'aggiunta un *second after-body* permette una forte diminuzione nella resistenza perché esso riduce il moto della scia non stazionaria. Il secondo vortice riduce anche lo spegnimento locale della fiamma limitando le interazioni vortice-fiamma. E' stato quindi calettato sullo stesso asse tubolare un *second after-body*, più piccolo che permette l'intrappolamento di un secondo vortice con funzioni di stabilizzazione fluidodinamica. Anche la distanza tra il *first after-body* e il *second after-body* è una variabile di sistema. La Figura 120 mostra alcuni particolari della realizzazione. Il bruciatore TVC è inserito all'interno di un *tubo di quarzo* (Figura 121), che permette la visualizzazione del flusso e il possibile utilizzo di tecniche ottiche quali: ODC, PIV, LDA, CARS.

Un flusso di "aria secondaria o anulare" fluisce tra la parete della camera trasparente in quarzo e il diametro esterno del forebody. I vortici che si formano nella prima cavità possono produrre shedding (cioè distacco) di altri vortici dallo spigolo del first after-body oppure avere un moto in avanti e all'indietro al suo interno. Tali fenomeni possono dar luogo alla presenza di picchi negli spettri di energia cinetica e quindi anche energia radiante.

Per riuscire meglio ad intrappolare il vortice nella prima cavità e quindi ottenere un migliore mescolamento del comburente e combustibile si è pensato di aumentare il diametro del first after-body inserendo una corona circolare .



(a) (b) (c) (d)

Figura 120. Immagini di particolari del bruciatore TVC. Nelle fotografie (b) e (d) sono evidenti i fori da cui il combustibile (CH_4 o H_2; grandi) e il comburente (Aria, piccoli) vengono iniettati

Figura 121. Bruciatore TVC inserito all'interno del liner in quarzo ottico che ne costituisce la camera di combustione

Analisi visiva delle fiamme **-** Dall'analisi dell'ampia matrice sperimentale, la migliore condizione di combustione si verifica per una portata di aria secondaria di 160 Nm^3/h e Φ_1=1,83 (Figura 122) evidenziando un probabile comportamento Flameless, caratterizzato da una combustione volumetrica. Andando verso valori di miscela grassi la combustione peggiora, si evidenziano zone ad alta concentrazione di incombusti e la corona circolare e il *second after-body* diventano incandescenti. Un comportamento analogo è possibile riscontrarlo per una portata di aria secondaria di 120 Nm^3/h (Figura 123).

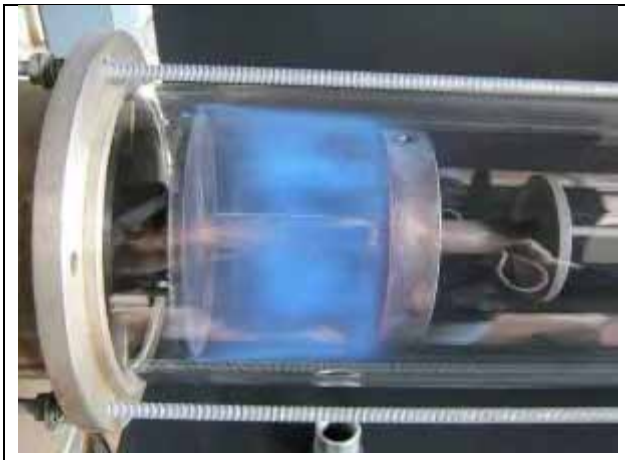


Figura 122. Immagini con la corona circolare aggiuntiva al *first after-body*, portata di Aria Primaria (O_{v_1}) di 10,5 Nm^3/h e Aria Secondaria (O_{v_2}) di 160 Nm^3/h

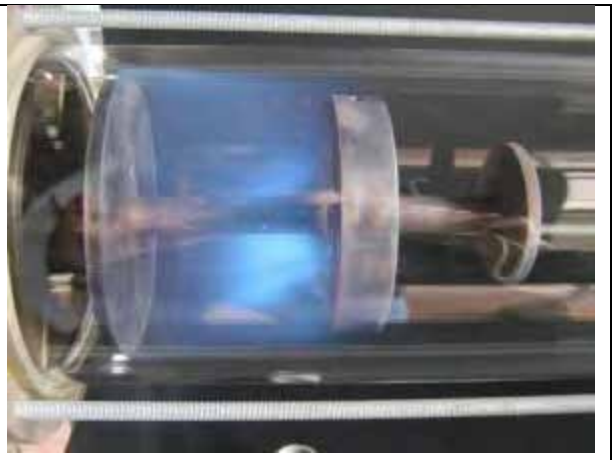


Figura 123. Immagini con la corona circolare aggiuntiva al first after-body, portata di Aria Primaria (Ov_1) di 10,5 Nm^3/h e Aria Secondaria (Ov_2) di 120 Nm3/h

Analisi delle fiamme con ODC - Nell'analisi di tipo statistico dei dati acquisiti con ODC, si sono prese in considerazione l'autocorrelazione, la cross-correlazione, gli auto-spettri e i cross-spettri. Queste analisi permettono di evidenziare: frequenze fondamentali, dipendenti da periodicità legate a vortici; l'inerzia del sistema se sottoposto a dinamiche di processo; fluttuazioni del fronte di fiamma; componenti predominanti della velocità di propagazione. Un'analisi più accurata ha permesso di osservare quanto segue:

- l'inserimento di una corona circolare che allarga il diametro del primo aftebody determina la scomparsa di alcuni picchi indici di instabilità;
- altri picchi rilevati, grazie all'analisi incrociata operata con i due distinti sistemi di misura ODC, paiono essere dovuti alla fluttuazione del vortice principale nella cavità e non all'eventuale shedding (distacco di vortici) dal bordo del *forebody;*
- le velocità di rotazione del vortice principale misurate, sembrerebbero confermare le previsioni numeriche.
- nella condizione Φ_1=1,83 e Φ_{TOT}= 0,11 con una portata di aria secondaria di 160 Nm^3/h e con la corona circolare sul *primo after-body*, l'analisi dell'*auto-correlazione* e della *cross-correlazione* degli ODC1 e ODC2, evidenzia la formazione di un vortice stabile nella cavità senza shedding periodico (distacco di vortici), infatti non si rilevano picchi nello spettro o formazione di vortici multipli, avvicinandosi quindi ad un comportamento flameless già evidenziato dalle analisi visive;
- anche l'analisi degli *auto-spettri* e del *cross-spettro* non presentano picchi rilevanti e quindi in questa condizione di funzionamento non si ha una periodicità del segnale, con shedding periodico, fluttuazioni del fronte di fiamma o formazione di vortici multipli, avvicinandosi quindi ad una combustione distribuita di tipo flameless;
- del *secondo after-body* è utile alla stabilizzazione del vortice nella prima cavità.

Poiché numericamente si è pensato di aumentare il flusso di aria primaria nella prima cavità, in modo che la reazione proceda il più possibile prima che i gas parzialmente combusti vengano in contatto con la corrente anulare, non potendo confidare troppo sull'ingresso dell'aria anulare nella cavità, si è ipotizzato di addurre una maggiore quantità di aria primaria fino ad ottenere rapporti di equivalenza primari circa stechiometrici. I dati sperimentali raccolti supportano questa ipotesi. Si è potuto constatare però che l'incremento della portata d'aria primaria oltre un certo limite, che corrisponde chiaramente ad un incremento della velocità di ingresso, porta allo spegnimento della fiamma. L'unico modo di ovviare a questo inconveniente è di invertire i fori di adduzione dell'aria primaria e del combustibile. Infatti la superficie dei fori grandi è circa una volta e mezzo quella dei fori piccoli. Così facendo, per portate di combustibile corrispondenti a circa 50 kWt, si riesce a contenere la velocità di uscita dell'aria a valori accettabili anche per rapporti stechiometrici, senza spegnere la fiamma. L'inversione dei fori comporta un incremento della velocità di uscita del combustibile, che però rimane intorno a valori comunque bassi, tali da non pregiudicare la stabilità della fiamma. Le prestazioni incrementano sensibilmente con efficienze di combustione pari circa il 98%.

Messa a punto delle migliori tecnologie per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone

Simulazione numerica

Simulazioni CFD RANS e LES - L'attività ha avuto come obiettivo lo sviluppo di strumenti numerici per la simulazione non stazionaria di flussi multifase in dispositivi di combustione di interesse industriale. In particolare tutti gli sviluppi modellistici fisico-numerici sono stati finalizzati allo sviluppo del codice CFD-LES HeaRT di proprietà ENEA. Come caso studio di riferimento è stato considerato un combustore con tecnologia ISOTHERM ed in particolare lo studio di un getto di slurry e vapore e l'interazione di questo con i prodotti di combustione. Nel corso di quest'anno si è proceduto ad applicare al caso test ISOTHERM i modelli implementati nel codice HeaRT, messi a punto nel corso del secondo anno e validati con un caso test accademico (Sommerfield &Qiu).

Una delle difficoltà che si incontrano nella simulazione LES di combustori di interesse industriale riguarda l'esigenza di elevatissime potenze di calcolo per la grande dimensione e la complessità geometrica dei dispositivi; per questo, accanto allo sviluppo di modelli per la fisica delle miscele multifase è stato necessario affrontare lo sviluppo di tecniche numeriche che rendessero fattibili in tempi ragionevoli le simulazioni necessarie per lo studio delle fenomenologie. Si è pertanto proceduto allo sviluppo di una tecnica numerica di modellazione di un dominio fisico complesso, denominata *Immersed Volume* e di una tecnica di integrazione numerica basata su Mesh Refinement che consenta di connettere zone del combustore ad elevata risoluzione spaziale (ad es. zone vicine ad iniettori) a zone a bassa risoluzione spaziale, evitando la nascita di elementi di discontinuità che sarebbero distruttivi per una simulazione di tipo LES.

Attualmente è già stata sviluppata ed integrata in HeaRT la tecnica di modellazione Immersed Volume Method (IVM), che utilizza un approccio ai volumi finiti per la simulazione LES di flussi comprimibili in geometrie complesse descritte attraverso griglie non uniformi cartesiane. La presenza di parti solide di qualunque forma all'interno del dominio fa sì che molte celle di calcolo siano "tagliate" e quindi sono caratterizzate dalla compresenza di una zona solida ed una vuota; la tecnica consiste nell'applicazione ad ogni scalare delle equazioni di Navier-Stokes di un metodo ai volumi finiti in corrispondenza delle celle cartesiane "tagliate". La descrizione accurata di una geometria reale tridimensionale all'interno del volume della cella è preservata mediante una descrizione triangolare della superficie (STL stereolithography) piuttosto che approssimata con un piano. Una fase di pre-processing, mediante un codice sviluppato ad hoc, è necessaria per il calcolo delle quantità geometriche delle celle "tagliate" (area delle facce, volume, centroide del volume, centroide delle faccie) che servono per applicare la tecnica ai volumi finiti. Il calcolo dei flussi attraverso queste celle viene eseguito usando una versione modificata del metodo AUSM *(Advection Upstream Splitting Method)*, mentre la ricostruzione delle variabili sulle interfacce delle celle viene fatta per mezzo di un interpolatore al terzo ordine (TVD,*Total variation Diminishing*). In questo modo l'accuratezza del secondo ordine del solutore è preservata. La robustezza e precisione del nuovo metodo è stata validata con simulazioni LES di un flusso turbolento attorno ad una sfera con Re=5000 di cui sono disponibili dati DNS.

Lo sviluppo di una tecnica di Mesh Refinement per il codice HeaRT ha richiesto una fase preliminare piuttosto lunga, durante la quale si è cercato, mediante un'attenta analisi del problema in esame, di definire un algoritmo di soluzione utilizzabile in presenza di combustione turbolenta di fluidi comprimibili.

Dopo un'analisi delle ricerche presenti in letteratura riguardanti tecniche *multigrid*, *multilevel*, *adaptive* e *non adaptive mesh refinement*, è stato scelto un algoritmo di soluzione che prevede la presenza di griglie su vari livelli di risoluzione spaziale, con raffinamento crescente, che risolvono in maniera indipendente il campo di moto, eccezion fatta per la zona posta sul bordo di ogni griglia, nella quale le condizioni al contorno sono imposte dalla griglia di livello superiore. La parte sicuramente più complessa è stata la scelta degli operatori di "*restriction*" e "*prolongation*", necessari per la comunicazione tra i vari livelli di griglia.

Al fine di integrare la tecnica di *mesh refinement* in HeaRT si sono dovute apportare notevoli integrazioni e modifiche al codice, in particolare per la generazione automatica della '*topologia*' del dominio di simulazione dovendo prevedere la presenza di zone a diversa risoluzione spaziale. Ciò ha anche permesso l'eliminazione all'interno del codice stesso le 'personalizzazioni' legate alla simulazione e che dovevano essere modificate al cambiare della geometria del caso da simulare. Inoltre è ora possibile trattare geometrie che prevedono ingressi e uscite multiple nelle tre direzioni coordinate. La parte più consistente dell'attività è consistita nella implementazione di un nuovo *solutore* basato sull'integrazione di zone a diversa risoluzione spaziale.

E' stata quindi generata una nuova versione del codice HeaRT che integra il nuovo solutore e la tecnica IVM; il codice attuale permette di trattare geometrie cartesiane o cilindriche con mesh di tipo strutturato multi-livello e, nel caso di geometrie particolarmente complesse, consente di adottare la tecnica IVM. Ciò faciliterà la conduzione di simulazioni di combustori di interesse industriale quali il combustore ISOTHERM. Contemporaneamente alle

attività di sviluppo numerico ed informatico di HeaRT si è proceduto nello sviluppo ulteriore della modellistica multi-fase sulla base dei risultati di validazione ottenuti nell'anno precedente simulando un caso test accademico.

I primi tentativi di simulazione LES su un combustore di tipo ISOTHERM hanno messo in luce problematiche che hanno portato ad una rivisitazione dei modelli numerici implementati e l'introduzione di ulteriori tecniche numeriche per poter procedere a simulazioni di *slurry* di carbone. Non potendo ottenere, nei tempi previsti dal programma, una simulazione LES con HeaRT, si è proceduto ad un primo studio investigativo con FLUENT.

L'esperienza condotta all'inizio dell'anno ha messo in evidenza la tendenza del codice multi-fase a divenire instabile. Per questo, è stato necessario introdurre nel codice una tecnica per il controllo delle oscillazioni nelle equazioni di trasporto degli scalari passivi, delle specie chimiche e dell'energia per quanto riguarda la *fase continua* (gas); per quanto concerne la *fase dispersa* si è invece sostituita l'equazione della temperatura della fase dispersa con un'equazione scritta in termini di entalpia sensibile. Accanto a ciò, si sono inoltre messi a punto gli opportuni limitatori sui termini sorgente che tengono in conto le interazioni tra le fasi, al fine di non indurre instabilità nel calcolo.

Le equazioni per gli scalari passivi sono state implementate per simulare la dispersione dell'acqua contenuta nello *slurry* di carbone come quella dei composti non volatili(*tar*) rilasciati nella fase di devolatilizzazione. Questo senza appesantire eccessivamente il calcolo introducendo un ulteriore fase dispersa. La simulazione dell'evoluzione dell'acqua nebulizzata dallo *slurry* in particolare, ha presentato notevoli problemi. Nelle condizioni di pressione e temperatura tipiche del processo ISOTHERM (p=4 atm e T=1600 K in camera) l'acqua nebulizzata subisce un repentino cambio di fase. Dal punto di vista della soluzione numerica questo si traduce nella presenza di termini di scambio di massa particolarmente elevati, che accoppiati ad una numerica non sufficientemente robusta portano la soluzione a divergere rapidamente. Inoltre, la procedura di avvio del calcolo ha messo in evidenza la criticità del trattamento della discontinuità di contatto presente tra il vapore iniettato in equilibrio con la fase nebulizzata (Tev=412 K) ed i prodotti di combustione (T=1600 K).

L'introduzione della tecnica del controllo delle oscillazioni nell'equazione degli scalari passivi, in quella delle specie chimiche ed in quella dell'energia ha stabilizzato questo aspetto. Per quanto riguarda la fase dispersa, la sostituzione dell'equazione in termini di temperatura con quella in termini di entalpia sensibile ha permesso di introdurre, nella maniera più semplice possibile, un legame costitutivo più complesso per quanto riguarda la capacità termica del carbone. Questa varierà ora in funzione dell'evoluzione della composizione chimica della particella di carbone, espressa in termini di frazione in massa dei gruppi funzionali presenti.

Al fine di avere quanto meno una simulazione LES di riferimento, si è provveduto a simulare il combustore ISOTHERM con tale approccio per mezzo del codice commerciale FLUENT. Al fine di minimizzare il costo computazionale, tale simulazione è stata condotta su una geometria semplificata. Sebbene l'accuratezza di tale simulazione sia da verificare, in mancanza di dati sperimentali accurati, con nuove soluzioni da ottenersi su griglie di calcolo maggiormente raffinate, il risultato ottenuto può essere considerato un primo termine di paragone per le future attività da completare con il codice HeaRT.

Cinetica chimica **-** Nell'ambito del presente obiettivo, un'importante attività ha riguardato la Modellazione della volatilizzazione e ossidazione di carbone del Sulcis dal punto di vista cinetico, attività in vero intrapresa nel precedente biennio e, per la sua complessità ed articolazione portata a compimento solo ora. L'attività si è incentrata su due aspetti fondamentali:

1. definizione di un unico modello cinetico in grado di simulare la volatilizzazione del carbone, attraverso la perdita in peso, la formazione del char e il rilascio dei prodotti in fase gassosa. La realizzazione è stata condotta partendo da 3 differenti modelli cinetici dettagliati di pirolisi, specifici per le specie idrocarburiche (CHO), per le specie azotate e per le specie solforate. Si è arrivati a definire un meccanismo complessivo per la sola fase di volatilizzazione del solido formato da 59 specie e 70 reazioni.
2. Sviluppo di un modello cinetico semplificato *One Step* specifico per ciascun carbone, in grado di essere utilizzato all'interno di codici di fluidodinamica computazionale. Il modello semplificato è stato ottenuto partendo dai risultati del sistema dettagliato, ricavando attraverso processi di semplificazione, una formulazione estremamente ridotta e di validità parziale, legata alle condizioni operative, in termini di temperatura e di velocità di riscaldamento, tipiche di un bruciatore a polverino di carbone. I parametri cinetici, fattore di frequenza ed energia di attivazione, sono stati ottenuti attraverso un processo di regressione non lineare. L'obiettivo prefissato e raggiunto, è stato quello di sviluppare delle semplici regole per la determinazione dei coefficienti stechiometrici e delle semplici correlazioni empiriche per la determinazione dei parametri cinetici, specifici per carbone. Con un solo atto reattivo, si riesce a descrivere l'evoluzione temporale dei composti idrocarburici, dei composti azotati e dei composti solforati.

Il modello realizzato e proposto è in grado di caratterizzare il comportamento della fase solida (CHAR), della fase tar e della fase gassosa, sia in termini di ripartizione nelle differenti fasi sia in termini di composizione delle stesse. In particolare, il modello prevede il rilascio di differenti specie gassose, sia di natura inorganica (CO, CO_2, H_2O, H_2, H_2S) sia di natura organica (C_2H_4, HCN). Il confronto con i risultati del modello completo hanno confermato la validità dell'approccio.

Analisi delle strutture reattive locali **-** Un altro importante aspetto di ricerca ha riguardato l'analisi delle strutture reattive locali da prodotti di devolatilizzazione/gasificazione in un bruciatore a polverino di carbone operante in condizione "flameless". La composizione della miscela combustibile reagente, derivante dalla devolatilizzazione e dalla gasificazione del polverino di carbone nella camera di combustione, dipende fortemente dalle condizioni operative. E' ben noto, infatti, che la temperatura e la composizione della corrente ossidante influenzano la percentuale relativa dei prodotti di gasificazione che, a loro volta, rappresentano il combustibile del processo ossidativo che avviene in fase omogenea. Dopo aver caratterizzato le differenti tipologie di strutture che possono stabilizzarsi considerando come combustibile il metano, sono state analizzate le strutture reattive derivanti dalla ossidazione di miscele combustibili che rappresentano tipicamente i prodotti della devolatilizzazione-gasificazione, e quindi presenti localmente in un bruciatore a polverino di carbone.

Sono state, quindi, reperite in letteratura le informazioni necessarie per la valutazione della composizione e della temperatura delle correnti di combustibile ed ossidante nella regione in cui il combustibile stesso viene formato e successivamente ossidato, in prossimità delle particelle di carbone all'interno della camera di combustione. In questo modo è stato possibile identificare le condizioni di riferimento rappresentative delle condizioni locali, in corrispondenza delle quali sono state realizzate le analisi numeriche.

Sulla base dell'esperienza maturata nello studio di tali sistemi, l'esemplificazione della struttura locale che si crea nelle zone di interesse è stata effettuata considerando uno strato diffusivo stazionario derivante dalla interazione di due getti contrapposti. In particolare, i due flussi gassosi, l'uno contenente la miscela combustibile e l'altro contenente la miscela comburente, sono preriscaldati e/o diluiti in modo tale da ottenere differenti condizioni iniziali. Facendo riferimento alla temperatura di preriscaldamento e alla diluizione di uno o entrambi i flussi, l'ignizione e la struttura reattiva che ne deriva è identificata in letteratura come Hot Diluted Diffusion Ignition (HDDI).

Lo studio è stato affrontato con un approccio di tipo numerico, utilizzando codici di calcolo commerciali (ChemKin) e modelli cinetici presenti in letteratura. Sulla base della esperienza maturata nel corso dell'attività sulle strutture ossidative in condizioni MILD, è stato scelto il meccanismo di ossidazione da utilizzare per miscele CO/H_2.

E' stata condotta una analisi dettagliata della dipendenza dell'ignizione e della relativa struttura reattiva che si stabilizza in funzione delle grandezze locali quali temperatura, composizione del combustibile e del comburente, velocità. In particolar modo è stato valutato l'effetto della presenza di CO_2 ed H_2O nella corrente ossidante sulla struttura in esame. E' stato rilevato che tali composti hanno un duplice effetto, dovuto sia alla differente capacità termica rispetto ad una corrente ossidante standard, sia alla partecipazione diretta alla cinetica del processo reattivo. Sono stati quindi individuati i campi dei parametri (temperature di preriscaldamento e diluizione) in corrispondenza dei quali l'ossidazione di miscele CO/H_2 determina la formazione di strutture reattive assimilabili a quelle tipiche della combustione "flameless".

<u>Attività sperimentale</u>

Dal punto di vista sperimentale, l'obiettivo prevede l'acquisizione di dati sull'impianto sperimentalo di IFRF "IPFR". Le campagne sperimentali sono state fondamentalmente indirizzate all'acquisizione di dati relativi ad aspetti di stabilità in ossi-combustione di polverino di carbone e comunque caratterizzanti il processo, o alla caratterizzazione di dati chimico-fisici relativi ai processi di volatilizzazione e combustione del "char" in condizioni "oxy **.** Questi ultimi dati risultano utili alla validazione dei modelli sia fisici che chimici, parallelamente sviluppati.

L'impianto IPFR, è una facility utilizzata per uno studio elementare della combustione (air o oxy) di polverino di carbone (grana media 40-125 μm), e in grado di caratterizzare le concentrazioni di componenti TAR (volatile) e CHAR (solido). L'impianto è costituito da un bruciatore (gas metano, premix) e da un reattore verticale (4 m). Il polverino di carbone viene dosato tramite una coclea ed immesso nella parte alta del reattore via flussaggio di azoto. La parte di ossigeno necessario alla combustione del carbone viene fornita come eccesso d'aria nel combustore. La temperatura del reattore è omogenea e tenuta intorno ai 900 °C. La parte volatile, TAR, del carbone brucia e si esaurisce subito, mentre la parte solida brucia lentamente ed il residuo incombusto dipenderà dal tempo di permanenza nel reattore (gestibile tramite la regolazione della portate aria, gas e gas combusti) . Stimando il peso delle scorie residue ed il tempo di permanenza nel reattore, si definiscono le caratteristiche del CHAR. Conoscere la dinamica del processo combustivo permetterebbe di stimare meglio la struttura del carbone (TAR e CHAR). Le sonde ODC usate in questa esperienza sono per alta temperatura (Max 1800 °C) e vengono

inserite direttamente nell'ambiente del processo (camera di combustione [sonda CC] e reattore [sonda AD]). In contemporanea vengono registrate le variabili di processo in modo da valutare (off-line) la coerenza temporale dei dati acquisiti.

L'obiettivo della sperimentazione è stato duplice:

1. Verificare l'osservabilità del processo tramite strumentazione ottica ODC (brevettato ENEA)
2. Caratterizzare la dinamica del processo, fornendo una diagnostica on-line che caratterizzi la combustione tradizionale e quella Oxy, rilevando:
   - Velocità di flusso;
   - Tempi di innesco relativi alle fasi gas e solido;
   - Durata dei processi.

L'acquisizione è stata eseguita in modo da poter osservare le fenomenologie con il più ampio spettro possibile. Le altre variabili chimico-fisiche acquisite sono state: temperatura, tenore di ossigeno e composizione dei gas di trasporto. Le matrici sperimentali, per ciascuna delle granulometrie in esame, implicano:

- la variazione delle variabili di processo (temperatura reattore, % O_2 nei gas combusti in ingresso, tipologia della miscela aria-azoto di trasporto) al fine di valutarne l'influenza;
- la modulazione del flusso di immissione, al fine di stimare: velocità, tempi di residenza, tempi di combustione delle diverse fasi (gas, Tar, Char).

Successivamente sono state svolte attività sull'impianto FOSPER, impianto di scala semi-industriale, anch'esso sito presso il Centro Ricerca ENEL di Livorno, consistente in un forno Oxy da 5 MWt massimi, con un bruciatore a polverino di carbone di taglia industriale, e possibilità di ricircolo interno ed esterno dei fumi di combustione. La matrice sperimentale delle campagne di acquisizione è stata finalizzata allo studio dei comportamenti dinamici del processo ossi-combustivo. Il setup strumentale prevede l'uso del sistema Enea ODC, per diagnostica ottica della combustione, e della strumentazione Enea Elpy ed Airsense, per l'analisi dei fumi (particolato e chimica). Sono state effettuate misure:

- in condizioni di processo diffusivo, oxy e durante il transitorio diffusivo-oxy;
- a diversa concentrazione di ossigeno nei fumi: da 0% al 6 -7 %.

Le sonde sono state disposte tre radialmente al processo ed una assial-frontale. Questo ha permesso di rilevare non solo la dinamica della processo, ma anche la variazione della posizione di fiamma, durante le variazioni delle condizioni processo. Interessante è notare come il sistema ODC rilevi anche il trend termico del bruciatore quando si passa dal 3,5 al 6-7% di O_2: la miscela è più reattiva, la fiamma retrocede e tende ad attaccarsi al bruciatore (condizione di pericolo). Interessante è anche evidenziare la capacità del sistema ottico a rilevare la differenza dinamica del processo oxy passando da una concentrazione del 7 allo 0,2% di O_2. Questo evidenzia come il sistema, monitorando il processo, ha sensibilità diagnostica alle variazioni della concentrazione di ossigeno.

Tecnologie di sequestro e utilizzo della CO_2 e progettazione di un impianto dimostrativo

Questa parte del progetto si articola su due linee principali:

- Studi su tecnologie di utilizzo e fissaggio della CO_2 - l'attività riguarda studi sperimentali relativi alla sintesi di combustibili liquidi o gassosi da CO_2 e lo studio cinetico e termodinamico della reazione di metanazione.
- Studio e definizione preliminare di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2, con sperimentazione e ottimizzazione di una rete di monitoraggio geochimica.

Studi su tecnologie di utilizzo e fissaggio della CO_2

L'attività svolta durante la seconda annualità, ha in parte sviluppato lo studio relativo alla metanazione affrontato in precedenza, ed in parte si è rivolta a nuove tematiche relative ai solventi per l'assorbimento della CO_2 presente negli effluenti gassosi provenienti dai grossi impianti di combustione.

Metanazione. Per la metanazione, dopo l'allestimento dell'apparato sperimentale, e dopo le prime indagini effettuate utilizzando gas (CO_2 ed H_2) non diluiti, si è passati ad alimentare il metanatore con miscele contenenti i due gas reattivi diluiti in azoto. Sono stati effettuati studi sull'effetto della concentrazione della CO_2 e dell'H_2 nella miscela di alimentazione, sulla resa finale della reazione.

L'attività si è quindi indirizzata alla caratterizzazione cinetica del nostro sistema attraverso la misura del numero di siti attivi presenti sulla superficie del catalizzatore e dell'ordine della reazione rispetto all'H_2 ed alla CO_2. Un'importante attività ha riguardato infine la valutazione degli effetti di avvelenamento, da parte di composti solforati (SO_2 ed H_2S), sul catalizzatore.

Assorbimento con con H_2: nuovo solvente. Per quel che riguarda l'assorbimento della CO_2 è stato ideato e testato un nuovo solvente che fa uso di resorcina in ambiente basico. La resorcina, o resorcinolo, è un composto organico che è in grado di reagire, in condizioni piuttosto blande, con la anidride carbonica. Il prodotto della reazione è un acido idrossicarbossilico dotato di apprezzabile stabilità. Questo prodotto è il risultato della fissazione della CO_2 nell'anello aromatico della resorcina. Quando l'acido idrossicarbossilico viene scaldato, rilascia la CO_2 e ripristina la resorcina. La semplicità delle fasi del processo lo rendono particolarmente adatto all'impiego ciclico poiché alla fine delle due fasi di assorbimento-desorbimento il reagente viene ripristinato. Le fasi del processo messo a punto possono essere schematizzate alla seguente maniera:

1. Assorbimento della CO_2 mediante reazione a caldo (100 – 200 °C) con la resorcina sciolta in una soluzione acquosa di un idrossido alcalino (NaOH o KOH). Il prodotto della reazione è un acido diidrossibenzoico chiamato acido resorcinico.
2. Interruzione del flusso di CO_2 ed aumento della temperatura (200 – 300 °C) per desorbire la CO_2 e ripristinare la resorcina.

La reazione di desorbimento può essere effettuata sia nello stesso reattore della reazione di assorbimento che in altro ambiente; inoltre può essere effettuata sia direttamente sul prodotto della carbossilazione (il sale dell'acido resorcinico) che sul'acido resorcinico (solido) ottenuto per acidificazione della miscela di reazione.

Sono state studiate, in un sistema *home-made*, le condizioni sperimentali per operare tanto l'assorbimento quanto il desorbimento della CO_2. I primi risultati, ottenuti in un sistema non ottimizzato, hanno consentito di raggiungere una capacità di carico del 39,5% ed una efficienza di assorbimento del 15,5%; dove per capacità di carico si intende il rapporto molare fra la CO_2 assorbita e la resorcina presente e per efficienza di assorbimento si intende il rapporto molare fra la CO_2 assorbita e quella inviata.

Studio e definizione preliminare di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2

Sono state in quest'ambito sviluppate presso Sotacarbo attività relative allo studio e alla definizione preliminare di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2 in modo da pervenire alla predisposizione di uno studio preliminare per la definizione da un punto di vista tecnico, ambientale ed economico di una nuova centrale termoelettrica dotata di sistema dimostrativo di cattura e confinamento geologico della CO_2.

Il lavoro si articola sull'esame degli aspetti normativi per il ricorso alle agevolazioni previste dal DPR 28.01.1994 e sulle successive disposizioni legislative e sul nuovo quadro normativo. Vengono valutate le soluzioni tecnologiche presenti sul mercato per la produzione di energia elettrica e la riduzione delle emissioni di CO_2 con una caratterizzazione dal punto di vista tecnico, ambientale ed economico. Vengono altresì individuate le principali alternative tecnologiche per la produzione di energia elettrica da carbone Sulcis e le diverse opzioni alternative per la cattura ed il confinamento della CO_2. Non da ultimo viene svolto l'esame degli aspetti ambientali per le soluzioni tecnologiche individuate in relazione anche alle procedure di autorizzazione.

Sempre nell'ambito degli studi di analisi e modellazione dei processi di conversione termica del carbone con trattamento e conversione degli effluenti gassosi prodotti è stato condotto da parte del DIMECA dell'Università di Cagliari uno studio sulle prestazioni di impianti di produzione di energia elettrica da carbone basati sulle più moderne tecnologie di conversione dell'energia e di protezione ambientale. Lo studio concerne, in particolare, gli impianti a vapore ultrasupercritici (USC) e gli impianti integrati di gassificazione e ciclo combinato (IGCC). Sono state valutate le prestazioni degli impianti considerati sia nella configurazione base più convenzionale, senza sistema di rimozione della CO_2, sia nella configurazione complessa con l'integrazione dei sistemi di rimozione e compressione della CO_2. Lo studio delle soluzioni tecnologiche considerate si basa su complessi modelli di simulazione appositamente sviluppati, basati sui codici Aspen-Plus e Gate-Cycle. Più specificamente il codice Aspen-Plus è stato utilizzato per la simulazione dei processi di gassificazione e di trasformazione dei prodotti della gassificazione e della combustione, mentre il codice Gate-Cycle è stato utilizzato per la simulazione delle sezioni di potenza. I simulatori realizzati sono stati applicati allo studio di due impianti USC e IGCC alimentati a carbone e dimensionati con riferimento ad una uguale potenza primaria in ingresso pari a 1000 MW. Entrambi gli impianti considerati vengono alimentati con un carbone commerciale a basso tenore di zolfo.

Dapprima è stata affrontata l'analisi e la modellazione dei processi di produzione elettrica da carbone in impianti basati su cicli a vapore USC completi delle sezioni di desolforazione e di denitrificazione, e di cattura della CO_2 a bassa temperatura. La configurazione scelta per l'impianto USC è quella tipica degli impianti a vapore di grossa taglia con potenze dell'ordine dei 400-600 MW. In particolare l'impianto si basa su un ciclo con surriscaldamento del vapore, un solo risurriscaldamento e sette spillamenti di vapore. A valle dell'impianto USC si considera un sistema di depurazione dei gas reflui prodotti basato sulla tecnologia SNOX per la rimozione combinata della SO_2 e

degli NOx. L'impianto SNOX presenta minori assorbimenti energetici rispetto ad altri sistemi più tradizionali, permette un ulteriore preriscaldamento dell'aria in ingresso al generatore di vapore e soprattutto non presenta scarti di processo. E' stata poi valutata l'opportunità di integrazione dell'impianto USC con un sistema di rimozione della CO_2 basato su un processo di assorbimento chimico con una soluzione acquosa di MEA (Metil-Etanolammina). La sezione di cattura della CO_2 è completata da una sezione di compressione e condizionamento della miscela ricca in CO_2, che, per esigenze di trasporto, necessita di essere portata ad elevate pressioni (nel caso in esame 110 bar) ed ad elevati valori di purezza (frazione massica della CO_2 superiore al 99,5%).

L'impianto USC integrato con il processo SNOX analizzato nel presente rapporto in condizioni nominali è caratterizzato da una potenza effettiva pari a circa 460 MW, con un rendimento globale del 45,5% (l'impianto privo della sezione SNOX di purificazione dei gas di scarico avrebbe un rendimento del 45,9%). L'integrazione con la sezione di rimozione e compressione della CO_2 comporta una riduzione delle prestazioni dell'impianto, funzione dell'efficienza di rimozione, a causa dello spillamento di vapore di bassa pressione dall'impianto a vapore destinato al processo di rigenerazione del solvente e per la richiesta di energia elettrica nella sezione di compressione della CO_2.

La seconda fase dello studio ha riguardato l'analisi e la modellazione dei processi di produzione elettrica da carbone in impianti IGCC completi delle sezioni di desolforazione e cattura della CO_2 a bassa temperatura. La configurazione scelta per l'impianto IGCC è basata su un gassificatore a letto trascinato di tecnologia Texaco, su una sezione di abbattimento pre-combustione dei composti acidi dal gas di sintesi in pressione e su un impianto combinato.

L'analisi delle prestazioni dell'impianto IGCC e delle sezioni di condizionamento e purificazione del syngas è stata condotta al variare dei principali parametri operativi. Le prestazioni del gassificatore sono state valutate per diversi valori del rapporto ossidante/carbone α e della composizione massica nello slurry. Nelle condizioni operative di riferimento, il syngas prodotto dal gassificatore è caratterizzato da una temperatura di 1400 °C, da un potere calorifico pari a 7,75 MJ/kg ed è composto da CO (38%), vapore (24%), H_2 (24%) e CO_2 (12%). La sezione di desolforazione permette di ridurre la concentrazione dell'H_2S nel syngas sino a 70 ppm. Sono state considerate due possibili modalità di integrazione dell'impianto combinato con la sezione di gassificazione. Nella prima configurazione l'acqua viene estratta direttamente a valle dell'economizzatore di alta temperatura della linea ad alta pressione e si trova in condizioni molto prossime alla saturazione; nella seconda l'acqua viene invece estratta in condizioni di liquido sotto raffreddato dal penultimo economizzatore della linea ad alta pressione. La prima soluzione consente di ottenere potenze e rendimenti leggermente superiori rispetto alla seconda (415 MW e 41,5%, contro 411 MW e 41,1%), però si caratterizza per un accoppiamento più critico delle curve di scambio termico del gas e del vapore. E' stata pertanto adottata la seconda configurazione che permette di operare con maggior sicurezza nelle condizioni di off-design.

Il confronto tra le due differenti tecnologie di produzione elettrica da carbone mostra come, nella configurazione più convenzionale senza sistema di rimozione della CO_2, l'impianto USC permetta di ottenere maggiori rendimenti (45,5% contro 41,1%). E' opportuno ricordare però che questa differenza è anche dovuta all'adozione di livelli tecnologici superiori per l'impianto USC rispetto all'impianto IGCC. Al contrario le penalizzazioni dovute alla sezione di rimozione della CO_2 sono leggermente inferiori nel caso di impianto IGCC, ma potrebbero ulteriormente diminuire se l'impianto IGCC venisse specificatamente progettato per il funzionamento in integrazione con la sezione di rimozione della CO_2.

Per quanto riguarda lo sviluppo e la sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimica si è dato corso al proseguo di attività da parte del CERI dell'Università di Roma La Sapienza. L'attività di ricerca è stata svolta effettuando la realizzazione, l'installazione e l'esercizio in continuo, presso l'area del bacino carbonifero del Sulcis gestita dalla società Carbosulcis SpA, di una serie di centraline di monitoraggio geochimico con misura diretta delle concentrazioni e/o di flusso della CO_2, del CH_4 e di altri parametri di interesse (quali temperatura, umidità, pH, Eh, concentrazioni in falda, etc) al fine di:

a) definire le variazioni naturali dei valori di flusso e/o di concentrazione nei suoli della CO_2 prodotta da processi biologici (background o baseline) quali termini di riferimento per l'individuazione di eventuali fughe di CO_2 profonda;
b) individuare in futuro eventuali fughe di CO_2 anche durante le prime fasi dello stoccaggio in maniera tale da poter attuare azioni di rimedio in tempi rapidi.

I sistemi sono costituiti da una unità di controllo centrale responsabile dell'approvvigionamento energetico (pannelli solari e batterie), dell'immagazzinamento e del trasferimento dei dati e dell'interrogazione dei sensori connessi via cavo. Il trasferimento dei dati avviene in tempo reale tramite sistema GPRS con un server installato su una scheda modem che permette il controllo in remoto via web di tutti i parametri.

Le prime operazioni per l'istallazione in situ del sistema di monitoraggio sono state effettuate a fine aprile, dopo la conferma da parte di Carbosulcis S.p.A. che le perforazioni necessarie all'ubicazione delle sonde erano state correttamente ultimate. Inizialmente è stata prevista l'istallazione di un solo sistema di monitoraggio con 3 punti di misura. Tale scelta è stata suggerita dalla necessità di verificare sul posto che l'intervallo di calibrazione utilizzato per il monitoraggio sulla base dei risultati ottenuti in superficie fosse corretto e che, nelle condizioni presenti in situ, non si presentassero problemi imprevisti. Durante questa istallazione il sito non era completamente ultimato ed è stato quindi possibile mettere in posto e testare i sistema, senza però il fissaggio definitivo dell'unità centrale e del pannello solare. Essendo necessario per il completamento dell'istallazione attendere il completo consolidamento del cemento di fissaggio dei pali di sostegno, il perfezionamento di tali operazioni è stato curato direttamente dai tecnici della Carbosulcis S.p.A., adeguatamente istruiti per il corretto collegamento di tutte le componenti.

L'istallazione non ha presentato problemi e il sistema ha immediatamente iniziato a funzionare correttamente misurando la concentrazione di anidride carbonica ogni 2 ore e aggiornando il database presente sui nostri server ogni 4 misure. Le verifiche effettuate hanno quindi confermato il corretto funzionamento sia della parte analitica sia della parte di memorizzazione e trasmissione dei dati raccolti. Le concentrazioni misurate si sono mostrate in linea con quanto previsto dopo le indagini precedenti e, considerando il corretto funzionamento del primo sistema installato, nel mese di settembre è stata completata la rete di monitoraggio che è attualmente costituita da 3 stazioni di misura equipaggiate complessivamente con 18 sonde.

E' stato effettuato uno studio di analisi delle potenzialità di confinamento della CO_2 all'interno del bacino minerario del Sulcis. L'obiettivo di tale attività riguarda lo sviluppo e l'ottimizzazione di tecnologie di stoccaggio della CO_2 per via geologica e mineralogica, al fine di individuare e caratterizzare possibili processi e materiali idonei alla mineralizzazione a ridotto impatto economico ed ambientale.

Sono state effettuate in questo ambito delle prove in laboratorio utili per la stima della capacità di adsorbimento di anidride carbonica del carbone Sulcis, proveniente dalla miniera di Nuraxi Figus e l'influenza che esercitano, pressione, temperatura e umidità sul processo di adsorbimento. Si è voluta simulare inoltre un'intrusione marina nel bacino carbonifero, particolare situazione che, verosimilmente, si può riscontrare nelle aree costiere attraverso l'imbibizione del carbone con acqua marina.

Date le caratteristiche del carbone Sulcis, classificato come un carbone di rango medio basso, mediante la sperimentazione effettuata sono state ricavate indicazioni utili sulla capacità di adsorbimento della CO_2. Considerando la vastità del problema dello stoccaggio e la grande variabilità dei parametri operativi (quali ad esempio, l'influenza della granulometria o il contenuto in umidità), si può facilmente immaginare quanto siano ampie le prospettive per chi intende dedicarsi ad uno studio di questo tipo. A causa della complessità e dell'importanza della materia oggetto di studio, i risultati raggiunti consentono soltanto una prima stima che naturalmente non fornisce risposte definitive sulla questione che va comunque ulteriormente approfondita con il perfezionamento dell'apparato sperimentale finalizzato all'ottenimento di nuovi dati e analisi.

Principali soggetti esterni coinvolti

Sotacarbo S.p.A.

SOTACARBO è una società di ricerca e sviluppo nel campo delle tecnologie di utilizzo pulito del carbone per la produzione di energia elettrica; dispone di un adeguato supporto logistico per lo sviluppo delle attività sperimentali, consistente nel proprio Centro Ricerche sulle tecnologie di utilizzo carbone ed in una piattaforma pilota per la produzione di idrogeno e gas combustibili puliti da carbone mediante gassificazione. Le attività ad essa affidate riguardano essenzialmente la sperimentazione in scala significativa dei processi di produzione e trattamento di syngas da carbone per la produzione di energia elettrica e idrogeno, la sperimentazione in laboratorio di processi di cattura della CO_2 attuata con solventi a base di ammine e la predisposizione di uno studio di prefattibilità verso l'elaborazione di un unico sistema comprendente generazione elettrica e sequestrazione definitiva della CO_2 da realizzarsi nell'area del Sulcis.

Università de L'Aquila

Ha collaborato attivamente alla progettazione ed alla realizzazione dell'impianto Zecomix, occupandosi in particolare della sezione di cattura della CO_2 basata su un reattore a letto fluido (decarbonatatore) funzionante in cicli alternati di decarbonatazione/calcinazione. Il Dipartimento ha effettuato dapprima un approfondimento dell'indagine sulla cinetica della cattura a caldo dell'anidride carbonica, in un processo ciclico di carbonatazione–calcinazione. E' stato inoltre implementato un modello chimico-fisico per la simulazione del reattore a letto

fluidizzato per la separazione di CO_2 da syngas proveniente da un processo di gassificazione del carbone, in cui la cattura della CO_2 e lo steam reforming degli idrocarburi possono essere condotti simultaneamente attraverso un processo integrato. Uno studio specifico è stato infine rivolto alla ottimizzazione di schemi di processo per la gassificazione del carbone con simultanea cattura dell'anidride carbonica, e riutilizzo in loco della CO_2 prodotta come agente gassificante. In parallelo agli studi modellistici e di laboratorio illustrati, è stata garantita la necessaria collaborazione ad ENEA per curare le fasi di collaudo e avviamento dell'impianto di gassificazione–decarbonatazione ZECOMIX della Casaccia.

Università degli Studi di Cagliari

Ha partecipato alla progettazione di processo della piattaforma pilota; ha inoltre sviluppato numerose attività di modellistica sulla combustione e gassificazione del carbone nonché sul trattamento del syngas. Disponendo pertanto delle conoscenze e competenze per lo sviluppo di attività di ricerca sulle tematiche di interesse è stato coinvolto su attività che vanno a concentrarsi sulla modellazione dei processi di generazione elettrica con cattura della CO_2 e sull'ottimizzazione del processo di WGS. Ha operato principalmente sulla modellistica con codici commerciali basati sull'analisi termodinamica.

E' stato 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.

Si è occupato degli aspetti più legati all'ingegneria mineraria e alle tematiche di confinamento. Il suo contributo è stato 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 relative alla valutazione della capacità di stoccaggio di CO_2 nell'area del Sulcis.

Università di Roma "La Sapienza"

Si è occupato degli aspetti specifici legati alla pulizia e al condizionamento del syngas prodotto negli impianti di gassificazione con prove e test volti ad acquisire dati e competenze sul processo di pulizia, lavaggio, separazione e campionamento delle polveri e tar presenti nel syngas con particolare attenzione ai sistemi elettrostatici a umido.

E' stato coinvolto per gli aspetti più legati allo stoccaggio sotterraneo della CO_2. In particolare, oggetto delle attività di studio presso il CERI sono state la predisposizione e la gestione di una rete di monitoraggio geochimico, costituita da una batteria di centraline di misura delle concentrazioni di gas migranti dal sottosuolo.

Ha sviluppato una tecnica numerica di modellazione di un dominio fisico complesso, tipico dei sistemi ossi-combustione industriali, denominata "Immersed Volume", e una tecnica di integrazione numerica basata su Mesh Refinement , che consente di connettere zone del combustore ad elevata risoluzione spaziale (ad es. zone vicine ad iniettori) a zone a bassa risoluzione spaziale, evitando la nascita di elementi di discontinuità che sarebbero distruttivi per una simulazione di tipo LES. Contemporaneamente alle attività di sviluppo numerico ed informatico connesse allo sviluppo del codice ENEA HeaRT, si è proceduto nello sviluppo ulteriore della modellistica multi-fase sulla base dei risultati di validazione ottenuti nell'anno precedente.

Università di Roma Tre

Il gruppo di ricerca ha condotto un'attività sperimentale a supporto e per la validazione del progetto. In tale ambito è stato realizzato un modello per prove a freddo e sono state effettuate campagne di misura in varie condizioni di flusso secondo valori delle portate dei condotti di alimentazione preventivamente concordate con ENEA.

Università di Roma Tor Vergata

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

Inoltre I temi sviluppati sono quelli finalizzati all'utilizzo, in processi di pirolisi e gassificazione, del carbone del Sulcis. Le attività del Partner hanno riguardato la valutazione della fattibilità di un processo di carbonatazione di diverse tipologie di residui industriali alcalini, da realizzarsi utilizzando direttamente sorgenti diluite di anidride carbonica, quale gas di sintesi o in subordine fumi di combustione, evitando il processo intermedio di cattura normalmente previsto nella filiera del CCS per la concentrazione della CO_2.

Università degli Studi di Pisa

L'attività di studio è stata la modellazione e la simulazione del comportamento del reattore Fisher Tropsh di produzione di combustibili liquidi da carbone elemento cruciale per tutte le attività connesse al funzionamento degli impianti CTL.

Inoltre ha condotto lo studio in cui è stata utilizzata una apparecchiatura pilota (IPFR) su cui mettere a punto metodologie diagnostiche per la valutazione dell'"*ignition delay*" di *"stream"* di particelle di carbone in diverse condizioni di atmosfera controllata $CO_2/O_2/N_2$. Successivamente tali metodologie sono state ottimizzate su un impianto di taglia significativa (3 MW_t) operante in ossi-combustione, in unione con strumentazione sviluppata da IFRF, allo scopo di sviluppare metodologie diagnostiche per il monitoraggio delle prestazioni di sistemi innovativi a carbone oxy-fuel. Il sistema proposto è stato testato nel corso delle campagne sperimentali ed è risultato molto promettente, non solo per mettere in evidenza transizioni di regime di combustione tra convenzionale e "*flameless"*, ma anche per fornire informazioni sulle dinamiche di interazione tra le particelle di carbone e il campo di moto del getto in cui sono inserite.

Politecnico di Milano

Per quanto riguarda i processi CTL ci si è avvalsi della collaborazione sulla base di una indiscutibile esperienza sui temi legati ai processi sintesi di Fischer-Tropsch, di sintesi di metanolo e alcoli superiori da CO/H_2, ossidazione parziale catalitica e ossidazione selettiva sia in fase liquida che gas, sviluppata anche grazie alla passata collaborazione pluridecennale con ENI, ha condotto presso i suoi laboratori attività di analisi e sperimentazione legate all'utilizzo di sistemi catalitici a base di ferro.

Ha definito e sviluppato un unico modello cinetico in grado di simulare il complesso processo di volatilizzazione del carbone. È stato poi sviluppato un modello cinetico semplificato *One Step,* specifico per ciascun carbone, in grado di essere utilizzato all'interno di codici di fluidodinamica computazionale (tipo FLUET). Il modello semplificato è stato ottenuto partendo dai risultati del sistema dettagliato, ricavando attraverso processi di semplificazione, una formulazione estremamente ridotta e di validità parziale, legata alle condizioni operative, in termini di temperatura e di velocità di riscaldamento, tipiche di un bruciatore a polverino di carbone.

Università "Federico II" di Napoli

Ha condotto un'importante analisi delle strutture reattive locali da prodotti di devolatilizzazione/gassificazione del polverino di carbone operante in condizione "flameless". E' stata inoltre condotta una analisi dettagliata della dipendenza dell'ignizione e della relativa struttura reattiva che si stabilizza, in funzione delle grandezze locali quali temperatura, composizione del combustibile e del comburente, velocità. In particolar modo è stato valutato l'effetto della presenza di CO_2 ed H_2O nella corrente ossidante sulla struttura in esame. Sono stati infine individuati i campi dei parametri (temperature di preriscaldamento e diluizione) in corrispondenza dei quali l'ossidazione di miscele CO/H_2 determina la formazione di strutture reattive assimilabili a quelle tipiche della combustione "flameless".

EN.SY.EN Srl

L'attività effettuata dalla EN.SY.EN Srl si è articolata sulle seguenti linee:

1. Determinazione dei parametri chimico-fisici che caratterizzano il processo di devolatilizzazione del carbone e successiva combustione della fase Tar e di quella Char, fornendo informazioni sulle dinamiche di interazione tra le particelle di carbone e il campo di moto del getto di gas in cui sono inserite, da utilizzare per lo sviluppo di modelli cinetici;
2. Messa a punto delle metodologie volte a monitorare il funzionamento di un bruciatore oxy a carbone di taglia industriale, in diverse condizioni di rapporto di ricircolo dei fumi, tali da favorire l'instaurarsi delle combustione "flameless";
3. monitoraggio delle transizioni tra i diversi regimi di combustione (convenzionale ad aria, ossicombustione);
4. sviluppo delle metodologie di analisi di tipo "doppler" per la determinazione del campo di moto; valutare della possibilità di utilizzo della tecnica per la validazione di approcci modellistici avanzati (LES, interazione cinetica/turbolenza).

Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica dei servizi

(Referente I. Bertini)

Il piano di ricerca sul settore elettrico ha dato molta rilevanza al tema degli usi finali dell'elettricità, con l'obiettivo sia di individuare come le proposte di innovazione si calino e si adattino ai bisogni ed alle condizioni d'uso dei consumatori, sia per far emergere dal comportamento quotidiano degli utilizzatori le esigenze di ricerca da riportare al mondo produttivo.

E' l'utilizzatore finale che decreta il successo di un prodotto o di una proposta sulla base non solo delle prestazioni formali ma anche della flessibilità e della facilità d'uso, ugualmente anche il prezzo viene spesso percepito in rapporto stretto alle prestazioni. Questa miscela di motivazioni tecniche, economiche e di prestazioni percepite rende complesso il passaggio delle innovazioni dal laboratorio all'utente finale, problema questo sempre più rilevante oggi quando la grande industria, con le sue scelte formalizzate, perde il ruolo di consumatore principale di elettricità, sorpassata dal settore civile, servizi e residenziale.

L'obiettivo è promuovere e diffondere l'implementazione di tecnologie efficienti per la riduzione dei consumi elettrici nel settore dei servizi. Il riferimento programmatico è il Piano di Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica che intende mobilitare la società civile, i responsabili politici e gli operatori del mercato e trasformare il mercato interno dell'energia, in modo da fornire ai cittadini infrastrutture, prodotti, processi e servizi energetici che siano globalmente i più efficienti sul piano energetico. Il Piano mette in luce l'importanza di applicare norme minime di rendimento energetico ad un ampio ventaglio di apparecchiature e prodotti (dagli elettrodomestici come i frigoriferi ed i condizionatori, televisori, scalda-acqua, ecc., fino ai motori e agli inverter industriali), per gli edifici e per i servizi energetici. In questo contesto verranno proseguite le attività per l'adeguamento della normativa nazionale alla legislazione europea in merito a requisiti minimi (Eco-Design) e etichettatura.

Inoltre, un ruolo principale viene assegnato alla promozione dell'autoproduzione di energia e diffusione della cogenerazione nel settore terziario e dei servizi allo scopo di abbattere gli ostacoli e le barriere che ancora si frappongono all'estensione del mercato, anche attraverso l'analisi di meccanismi di incentivazione normativi ed economici.

Infine, un altro aspetto cruciale affrontato dal presente progetto riguarda lo sviluppo di strumenti e servizi per l'efficienza energetica con il duplice scopo di contribuire a ridurre i consumi aggiungendo "intelligenza" a sistemi complessi (sistemi di controllo per ecobuildings, reti attive di distribuzione, integrazione di sistemi di produzione di energia basati su fonti rinnovabili) oltreché sui singoli componenti consentendo di ottimizzare le operazione nell'ottica di un minore consumo.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

L'obiettivo finale del progetto consiste nello sviluppo di strumenti e metodi, che mirano alla promozione di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di favorire il mercato di prodotti più performanti sia a livello di componenti, che consumano energia, sia a livello di sistemi che la producono, e all'integrazione di tali tecnologie e all'ottimizzazione della loro gestione in un contesto territoriale circoscritto per mezzo di una configurazione di rete secondo il modello di generazione distribuita orientata al settore dei servizi. A tal fine il progetto è stato articolato attraverso quattro diverse linee di attività:

- Sviluppo delle specifiche per la progettazione eco-compatibile: promozione della nuova etichetta energetica.
- Implementazioni e controllo dell'etichettatura energetica e dei requisiti di Ecodesign.
- Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi.
- Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio-impianto in un contesto di rete complessa.

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

Le direttive 2009/125/EC e 2010/30/EU prevedono l'emanazione di misure di implementazione che contengono i requisiti minimi di efficienza energetica/eco-progettazione e le etichette energetiche dei prodotti relativi all'energia, cioè beni e servizi che consumano energia nella fase d'uso o che hanno influenza sul consumo di energia quando installati. L'azione di ENEA si è concretizzata nel supporto tecnico al Ministero sia durante le

riunioni che periodicamente si sono tenute a Bruxelles che per la preparazione dei documenti contenenti la posizione nazionale sulle specifiche proposte di politiche.

L'Italia è fra i maggiori paesi produttori di tali beni, soprattutto nel campo degli apparecchi domestici e professionali per la refrigerazione (frigoriferi e congelatori), il lavaggio (lavatrici, lavastoviglie, asciugatrici), la cottura (forni, cucine e cappe aspiranti), il condizionamento e la ventilazione (condizionatori d'aria e ventilatori) e per gli apparecchi ed impianti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale.

In ambito nazionale, nel periodo 2010- 2011 è continuata la stretta collaborazione con le Associazioni di categoria dei produttori di apparecchi domestici e professionali con il duplice scopo di:

- spingere l'industria nazionale a realizzare le innovazioni tecnologiche necessarie a mantenere e migliorare le attuali quote di mercato di prodotti energeticamente ed ambientalmente innovativi;
- derivare da queste innovazioni dei criteri di ecodesign/etichettatura da presentare agli altri Stati Membri anche come proposte alternative a quelle della Commissione Europea.

Proposte di etichettatura e requisiti di ecodesign

Sono state discusse proposte di misure di implementazione di etichettatura/ecodesign per i seguenti prodotti:

Cappe aspiranti: la Commissione Europea ha proposto di definire l'etichetta energetica e i requisiti di ecodesign delle cappe in modo analogo a quelli per i sistemi per la ventilazione domestica, per i quali si prevede l'obbligatorietà di un sistema di recupero di calore, basato sul consumo specifico per m^3 di aria estratta. Questo avrebbe comportato che le cappe di maggior dimensioni fossero avvantaggiate (in quanto intrinsecamente più efficienti come estrattori) a scapito degli apparecchi più piccoli tipicamente installati nelle case italiane. ENEA si è attivata con i produttori nazionali di cappe per raccogliere i dati necessari a supportare una proposta alternativa, che prevede invece la definizione di requisiti di efficienza energetica basati su uno specifico algoritmo di calcolo dell'Indice di Efficienza Energetica definito ad hoc solo per le cappe e che tenesse conto del consumo annuo di energia. Lo stesso algoritmo è utilizzato anche per definire le classi di efficienza energetica della nuova etichetta.

Apparecchi di condizionamento: la proposta di requisiti minimi di ecodesign è stata positivamente votata dagli Stati Membri il 31 maggio 2011 (ed è ora in fase di approvazione finale da parte di Parlamento e Consiglio) mentre il Regolamento sull'etichetta energetica (Regolamento delegato 626/2011/UE) è stato pubblicato nel luglio 20011. L'etichetta si applicherà a decorrere dal 1 gennaio 2013 ai condizionatori d'aria di tipo aria/aria con potenza di raffreddamento/riscaldamento fino a 12 kW. A seconda della tipologia di condizionatore e in base agli schemi riportati dal Regolamento, l'applicazione dell'etichetta avverrà in maniera graduale. Le nuove etichette terranno conto sia dell'indice di efficienza energetica stagionale (valore SEER), che del coefficiente di prestazione stagionale (valore SCOP) per glia apparecchi tipo split, mentre si baseranno sull'EER (l'indice di efficienza energetica non stagionale) per gli apparecchi a condotto singolo o doppio che sono adatti a condizionare localmente piccoli spazi. L'etichetta include inoltre l'indicazione del consumo annuo di energia (in kWh/anno) per il riscaldamento e il raffreddamento e i livelli di potenza sonora delle unità interne ed esterne, espressi in dB(A).

Scaldacqua e boiler: la proposta della Commissione Europea per gli apparecchi ed impianti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale prevede di definire requisiti minimi di efficienza energetica e una etichetta energetica comune a tutte le tipologie di apparecchi e le fonti energetiche, permettendo solo agli apparecchi con contributo solare (o di altre RES) di raggiungere le massime classi di efficienza energetica. L'azione di ENEA si è concentrata sulla richiesta di definire scale di efficienza energetica per ciascuna fonte energetica, per evitare l'influenza sul mix energetico nazionale e per garantire ai consumatori di trovare comunque sul mercato prodotti di sostituzione per gli apparecchi attualmente installati senza dover ricorrere ad opere murarie (per es. nuove canne fumarie) ed elettriche per installare nuovi apparecchi anche se più efficienti.

Proposte per l'utilizzo delle specifiche tecniche per il green procurement

Allo scopo di diffondere l'impiego di "acquisti pubblici verdi" ENEA ha seguito la realizzazione di quattro progetti pilota relativamente a due impianti di illuminazione presso la sede centrale ENEA di Roma e due progetti sviluppati presso i comuni di Ottone (PC) e Marcallo con Casone (MI). I criteri alla base della scelta dei prodotti coinvolti nei progetti pilota sono stati derivati per quanto possibile dai requisiti di eco progettazione e dall'etichettatura energetica.

Comune di Ottone

Nel 2010 il Consiglio Comunale di Ottone ha deliberato all'unanimità l'adesione e all'iniziativa comunitaria "Patto dei Sindaci" e al "protocollo di intesa per gli Acquisti Verdi". Attraverso tale cooperazione il comune si impegna a superare gli obiettivi fissati per l'UE al 2020, riducendo le emissioni di CO_2 di oltre il 20% attraverso l'attuazione di un Piano di Azione per l'Energia Sostenibile e azioni di acquisti verdi. In particolare la firma del "protocollo" è stata

promossa e supportata dagli incontri che il Sindaco di Ottone ha avuto con ENEA nell'ambito del progetto Buy Smart. Gli Enti locali che aderiscono all'intesa si impegnano a:

- utilizzare criteri di preferibilità ambientale nell'acquisto di beni/servizi per gli uffici;
- eliminare, progressivamente, l'acquisto di prodotti tossici, pericolosi o difficilmente smaltibili e quelli ad elevato impatto ambientale;
- prediligere prodotti a più lunga durata che siano facilmente smontabili e riparabili, o prodotti ottenuti con materiali riciclati/riciclabili/recuperati o da materie prime rinnovabili;
- preferire prodotti ad alta efficienza energetica, facilmente separabili a fine vita e che minimizzano la produzione di rifiuti;
- incoraggiare nelle proprie scelte di acquisto la diffusione di tecnologie a basso impatto ambientale e sistemi pubblici di etichettatura ecologica dei prodotti che si basano su un analisi del loro intero ciclo di vita;
- introdurre, nei criteri di aggiudicazione, elementi ambientali che tengano conto dei costi sostenuti lungo l'intero ciclo di utilizzo del prodotto.

Comune di Marcallo con Casone

E' stato realizzato un appalto conseguente ad un accordo di parternariato tra Comune di Marcallo con Casone e ENEA avente per oggetto l'esecuzione delle attività di ricerca per la progettazione esecutiva finalizzata alla realizzazione di almeno un impianto di illuminazione pubblico programma finanziato dai fondi comunali. Il Comune si proponeva di realizzare/riqualificare più impianti di illuminazione, comprese tutte le opere correlate, nel territorio comunale attraverso l'individuazione di un soggetto che progetti e realizzi gli impianti e le opere correlate.

ENEA Sede, Roma

ENEA ha acquistato un nuovo impianto di illuminazione esterna ad elevata efficienza per sostituire l'attuale sistema basato su quattro fari alogeni da 250 W ciascuno, anche per partecipare alla campagna "M'illumino di meno". La scelta tecnologica è caduta su un impianto formato da 3 fari a LED lineari con possibilità di cambiare colore da 70 W ciascuno, per un totale di 210 W, completi dei sistemi di regolazione e programmazione dei colori. I tre fari, che possono essere programmati per emettere luci anche di altri colori. Il 18 febbraio 2011 alle ore 18.00 sono state spente tutte le luci dell'edificio della Sede di Roma e nello stesso momento si è acceso il tricolore alto 20 metri sulla facciata dell'edificio. I fari a LED sono stati accesi tutte le sere fino al 17 marzo, festa dell'Unità d'Italia e poi sono stati riposizionati per sostituire i 4 fari alogeni da 250 W che illuminavano la facciata dell'edificio, per un totale di 1000 W, con un risparmio di circa l'80% sui consumi elettrici. Sono, inoltre, stati effettuati una serie di interventi strutturali per ridurre il consumo energetico dei suoi edifici. Un intervento particolare riguarda la produzione di acqua calda, che viene ora fornita da un unico scaldabagno centralizzato, che ha sostituito 40 scaldabagni elettrici per un volume totale di circa 1800 litri. Lo scaldabagno centralizzato è dotato di triplo scambiatore di calore per poter ricevere il contributo dei pannelli solari e recuperare il calore proveniente dal sistema di condizionamento dell'edificio. Il risparmio energetico ottenibile è stato per il momento stimato dai dati di progetto pari al 15% del consumo energetico, di cui circa la metà deriva dal contributo solare e l'altra metà dal recupero di calore del sistema di condizionamento.

Partecipazione ai comitati CEI ed IEC per la definizione dei metodi di misura per gli elettrodomestici del lavaggio

ENEA partecipa da anni al SC 59/61G *Lavabiancheria e lavastoviglie* del TC 59/61 *Apparecchi utilizzatori elettrici per uso domestico e similare*, che si occupa delle norme e dei progetti normativi di sicurezza e prestazioni relativi a macchine lavatrici, centrifughe, asciugabiancheria a tamburo, lavastoviglie, comprese tutte le problematiche inerenti il collegamento di queste macchine e degli altri elettrodomestici alla rete idrica. Nel 2011 sono stati poi attivati due nuovi Gruppi di Lavoro all'interno dell'59/61G, uno specifico per il rumore e l'altro per discutere i temi dell'accessibilità a cui ENEA partecipa con suoi esperti. In questo sottocomitato sono discusse le posizioni nazionali e preparati i commenti ai metodi di misura messi a punto dalla IEC a livello mondiale e dal CENELEC a livello europeo per gli elettrodomestici del lavaggio. In ambito standardizzazione ENEA ricopre poi dal 2003 la carica di Segretario del SC 59D Home *laundry appliances* della IEC il cui scopo è definire metodi di misura di valore globale per lavatrici, asciugatrici e lavasciugatrice.

Progettazione di azioni di comunicazione per la diffusione del nuovo schema di etichettatura energetica a partire dai principali elettrodomestici

La campagna di informazione sul nuovo schema di etichettatura energetica è iniziata dopo la pubblicazione dei primi Regolamenti delegati sull'etichetta energetica degli elettrodomestici e si è concentrata sui primi prodotti etichettati: TV, frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie, la cui etichetta è applicabile in modo volontario a partire dal dicembre 2010. La campagna si è articolata in una serie di azioni complementari:

- pannelli espositivi sia generali sulla nuova etichetta che specifici per i prodotti etichettai
- articoli su giornali e riviste specializzate
- interviste radiofoniche o riportate su riviste specializzate
- presentazioni a seminari informativi.

I temi di queste azioni di disseminazione sono stati la descrizione delle caratteristiche della nuova etichetta energetica e delle specifiche etichette di prodotto e la spiegazione del ruolo che l'etichettatura energetica gioca per il miglioramento dell'efficienza energetica dei prodotti a livello nazionale in sinergia con i requisiti di ecodesign.

Pubblicazione dei metodi di misura per gli elettrodomestici del lavaggio a supporto della legislazione comunitaria

Nel corso del 2011 è stato pubblicato a livello IEC e CENELEC il metodo di misura del consumo energetico e delle prestazioni per le lavatrici: IEC 60456 Ed. 5 2011. ENEA ricopre da anni la segreteria del Sottocomitato 59D – *home laundry appliances* della IEC che è incaricata di preparare i metodi di misura per le lavatrici, le asciugatrici e le lavasciugatrici.

A livello europeo lo standard sopra citato è stato modificato da parte del Comitati Tecnico CENELEC TC 59X, *Performance of household and similar electrical appliances*,per rendere il metodo di misura adatto a supportare a legislazione comunitaria (etichettatura ed ecodesign). Le procedure di prova definite dalla IEC sono state modificate a livello europeo per poter essere utilizzate come metodo di misura per il regolamento di ecodesign 1015/2010/CE e il regolamento delegato per l'etichetta energetica 1061/2010/UE per le lavatrici. A questo proposito lo standard europeo EN 60456:2011, pubblicato l08 luglio 2011 contiene:

a) una procedura di prova per il ciclo standard per il cotone a 60°C e 40°C a pieno carico e a carico parziale;
b) un procedura di prova per la misura della potenza nelle modalità "left-on" e "off";
c) una formula per calcolare il consumo energetico annuale delle lavatrici;
d) il corretto dosaggio del detersivo e la macchina di riferimento utilizzabile in Europa;
e) la procedura di controllo per le verifiche di conformità delle dichiarazioni dei costruttori.

Implementazione e controllo dell'etichettatura energetica e dei requisiti Ecodesign

Le misure di implementazione definite nell'ambito delle Direttive Quadro "Ecodesign" ed "Etichettatura Energetica" prevedono che gli Stati Membri debbano svolgere azioni di sorveglianza del mercato ovvero effettuare verifiche di conformità dei prodotti alla suddetta legislazione. L'Italia dovrà pertanto effettuare tra l'altro controlli a campione dei prodotti sul mercato avvalendosi dei Laboratori in grado di svolgere tali tipi di verifiche.

L'ENEA ha supportato dal 2010 la creazione di una rete di laboratori sul territorio nazionale che rispondono, o si sono impegnati, ad adeguarsi rapidamente a requisiti di affidabilità e capacità di prova, ed è stata avviata una attività di comunicazione dei criteri/protocolli. I laboratori hanno fornito contributi attivi per l'implementazione del Network con suggerimenti sull'opportunità di organizzare ring test, definire le modalità di prelievo a campione dei prodotti da testare, identificare un format condiviso per i report dei risultati delle prove e sulla formazione del personale. Al fine di consolidare i contatti sono state organizzate visite ENEA ai laboratori del Network.

Sul sito ENEA è disponibile il rapporto finale contenente elenco di laboratori, ciascuno con le sue caratteristiche, tipo di apparecchi su cui è possibile eseguire test, la capacità di prova ed i riferimenti.

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

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

- sono state elaborate proposte di miglioramento del meccanismo dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE) e le linee guida per la definizione di schede tecniche a consuntivo per la stima dei risparmi nei centri di calcolo (CED), con valutazione di casi studio;
- è stato effettuato uno studio sugli strumenti per un concreto sviluppo delle ESCo e dei contratti di rendimento energetico;
- è stata elaborata una linea guida sulla costituzione di fondi di garanzia e fondi di rotazione che possono essere utilizzati da Regioni e EELL come valida alternativa ai finanziamenti in fondo capitale.

Studio degli impatti dei TEE e delle relazioni fra gli operatori, il mercato e i progettisti

Il meccanismo dei "Titoli di Efficienza Energetica" (TEE) è stato introdotto con lo scopo di promuovere interventi di miglioramento dell'efficienza energetica e sono lo strumento che attesta il conseguimento di risparmi energetici

attraverso l'applicazione di tecnologie e sistemi efficienti. Le basi su cui è stato fondato il meccanismo non sono mere basi di incentivazione degli interventi, ma di promozione del risparmio e dell'efficienza da raggiungere, presso gli utenti finali, attraverso l'adozione di tecnologie all'avanguardia migliorando l'efficienza energetica negli usi finali, limitando le perdite di energia ed adottando fonti rinnovabili.

Un elemento introdotto nella normativa che evidenzia in modo molto forte come questo meccanismo sia volto al risparmio ed al miglioramento tecnologico è quello della definizione di una *baseline* per ogni progetto presentato. Essa rappresenta il riferimento per la valutazione dei risparmi e, quindi, rappresenta la "pratica corrente" o la di "media di mercato" nello specifico settore merceologico di riferimento.

Sono diversi i casi in cui i proponenti hanno presentato all'AEEG proposte a consuntivo che prevedevano sistemi innovativi che, in alcuni casi, erano in fase di ottenimento di brevetto. Ciò evidenzia come il meccanismo stia contribuendo anche ad una evoluzione del campo della ricerca. Uno degli intenti del meccanismo è, infatti, quello di favorire la nascita di nuovi operatori indipendenti e competitivi, specializzati nell'offerta di servizi energetici integrati e a grande valore aggiunto per gli utenti finali. Un ruolo importante di questi operatori è stato quello svolto nei confronti degli enti pubblici; molti Comuni, ad esempio, grazie agli accordi sottoscritti con queste società, sono riusciti ad ottenere il duplice vantaggio di poter realizzare interventi di risparmio prima ritenuti impensabili, a causa degli alti costi, e allo stesso tempo di poter migliorare la qualità di vita dei propri cittadini.

E' molto importante precisare che, dal suo avvio, il meccanismo ha prodotto un risparmio superiore a 8 Mtep, dei quali circa il 72% come risparmi associabili a titoli di tipo I (elettricità). Emerge, dunque, chiara la necessità di insistere sulla predisposizione di nuove schede standardizzate che, eventualmente, abbraccino nuovi settori. Anche in questo senso abbiamo provato ad ascoltare la voce dei soggetti interessati che hanno dato delle indicazioni precise su quali interventi potrebbero aiutarli ad intraprendere nuove strade di risparmio. Le principali criticità insorgono, soprattutto per la tipologia di progetti a consuntivo, sono numerosi, sia di tipo tecnico che meramente "burocratico" , perciò diventa indispensabile per l'utente sapere di poter trovare un aiuto tecnico-amministrativo che risolva in tempi brevi ogni dubbio. Le soluzioni possibili in questo caso potrebbero muoversi lungo due direttive, una immediata ed una a lungo termine:

- Soluzione immediata: istituzione di un numero verde attivo in orario d'ufficio cui possa rivolgersi il proponente per chiedere chiarimenti ed informazioni sia dal punto di vista burocratico che per piccoli problemi di natura tecnica.
- Soluzione a lungo termine: in questo caso la soluzione è un po' più complessa e riguarda l'eventuale istituzione di un centro di informazione con una ubicazione "fisica" cui il proponente possa rivolgersi, previo appuntamento, per chiarimenti di natura tecnica più complessi rispetto a quelli evidenziati nella precedente soluzione.

Il problema che viene evidenziato con maggiore forza da parte degli operatori del mercato è che molto spesso ci si ritrova nella condizioni di dover presentare delle proposte di progetto di risparmio per le quali non esistono schede standardizzate.

I contatti tenuti in questi ultimi mesi con gli operatori del settore (progettisti, imprese ed ESCo) hanno fato emergere interessanti spunti di discussione su quella che potrebbe essere una forte spinta per l'evoluzione del mercato grazie all'applicazione del meccanismo dei TEE. Gli operatori chiedono a gran voce nuove opportunità che in maniera innovativa incentivino nuove tecnologie, la ricerca e l'applicazione di sistemi sempre più efficienti che forniscano risparmi sempre più apprezzabili. A tal proposito abbiamo provato a chiedere quali siano i settori che vengono considerati di maggior interesse secondo il loro modo di "vivere" il mercato. Ne è nata una stimolante serie di consigli, spunti e idee che ha condotto a stilare il seguente "elenco delle opportunità", che servono ad aumentare la conoscenza degli stakeholders:

- corsi di formazione
- creazione di una scheda specifica che utilizzi la norma UNI-CEN 16001
- creazione di una scheda specifica per gli acquedotti
- parametrizzazione del periodo riconosciuto in funzione della vita utile degli interventi
- finanziamento Tramite Terzi (FTT)
- acquisti verdi

In sintesi è possibile affermare che il sistema dei certificati bianchi funziona positivamente, che incentiva l'uso efficiente dell'energia attraverso strumenti di mercato ed è stato oggetto già nel passato di positivi interventi di miglioramento ed affinamento (per esempio l'allungamento della vita utile dei progetti con cogenerazione ad alto rendimento fino a 10 anni), e sicuramente potrà essere anche per il futuro uno strumento fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi nazionali di riduzione dei consumi di energia e, conseguentemente, anche per quelli

di contenimento delle emissioni e di aumento della quota di fonti rinnovabili. Proprio per questi motivi si è cercato di analizzare, con l'aiuto degli operatori del settore, nuove strade che possono aprirsi per il settore.

Schemi contrattuali tipo per l'esecuzione di contratti di rendimento energetico per l'inclusione in un albo delle società che operano come ESCo

L'azione è stata finalizzata alla messa a punto di schemi contrattuali tipo per l'esecuzione di contratti di rendimento energetico al fine di avere un riferimento per l'inclusione in un albo delle società che operano come ESCo. Si è inteso redigere una lista di requisiti che i contratti proposti dalle aspiranti ESCo devono rispettare al fine di consentire loro di essere incluse nell'albo delle ESCo qualificate secondo quanto previsto dall'art. 16 del d. lgs. 115/2008. A tal fine, sono state individuate una serie di clausole standard che consentono di evidenziare il nesso causale tra il risultato in termini di maggior efficienza energetica ed economica e la responsabilità contrattualmente assunta dalle ESCo. Inoltre, si è prodotta una relazione sulla strutturazione di un Albo nazionale delle ESCo, organizzato per aree territoriali, sotto coordinamento di un ente pubblico, sia in funzione del dettato normativo che per la garanzia di controllo tecnico e di coerenza. I principali requisiti dei soggetti che possono partecipare ad un albo consistono nella:

- capacità di eseguire contratti che prevedano una performance energetica e ambientale pressoché globale, in cui, larga parte dei ricavi derivi dalla conversione tecnico economica delle materie prime usate nonché dall'applicazione delle tecnologie più innovative disponibili. I ricavi della ESCo sono in larga misura i risparmi del cliente, che vede così finanziato uno strumento di futuro reddito/risparmio personale, convertendo a tal fine, parte dei costi energetici correnti;
- capacità di gestire, o far gestire da un soggetto terzo più qualificato, l'aspetto e il rischio finanziario di un progetto di efficienza energetica su un periodo normalmente lungo (dai 10 ai 20 anni), sia che si tratti di contratti in cui la ESCo sostiene il ruolo integrale del FTT, sia che la ESCo formuli contratti di sharing saving o granted saving;
- capacità di valutare il grado di efficienza possibile, su un determinato cliente o progetto e che quindi disponga nel proprio organico di soggetti in grado di avere una visione d'insieme e di formulare degli Audit energetici ad hoc;
- capacità di fornire un percorso temporale entro il quale ritiene di ammortizzare il proprio investimento eil percorso finanziario con i partner possibili, specie quando il percorso prevede l'impiego di risorse finanziarie importanti e tempi di rientro particolarmente lunghi (in quasi tutti i contratti).

È utile tenere sempre in dovuta considerazione che la qualificazione di tali soggetti, ai fini della definizione di un punteggio di premialità, può essere eseguita secondo le variabili del meccanismo EPC, quali:

- durata del contratto;
- importo investito;
- valore e completezza delle prestazioni rese e delle garanzie tecniche, economiche e finanziarie date;
- modalità di rientro del capitale investito.

Algoritmi che potranno fornire un indice utile per la definizione di eventuali aspetti di selettività/premialità che potrebbero essere utilizzati per incentivarne l'attività.

Considerata la loro altissima specializzazione nel settore tecnico coniugata con quello finanziario ne consegue che il creare uno strumento comune che coordini e soddisfi le loro esigenze, sia come imprese che come parte di un meccanismo di efficienza che cerca le norme adatte ad agevolare simili soggetti, per l'utilità comune che se ne trae, è quanto meno opportuno. Un albo delle ESCo ha funzione di aggregazione dei soggetti che vi partecipano, dettando regole di comportamento tecnico contrattuali ed etiche, che possono dare un proprio contributo alla soluzione di problemi evidenziatisi negli ultimi decreti legislativi. Il decreto 28/2011 ha evidenziato, tra gli altri, tre punti problematici ai quali le ESCo, l'Albo e l'etica che ne deriva come disciplina negli affari, possono realisticamente contribuire a:

- rendere efficiente l'intero processo amministrativo,
- accelerare la realizzazione degli impianti
- contrastare attività speculative nelle diverse fasi di autorizzazione, connessione, costruzione esercizio degli impianti e rilascio degli incentivi.

Uno dei passaggi possibili è quello di snellire le procedure di gara semplificando la selezione dei soggetti di riferimento *ab initio*, dotandoli di una certificazione specifica; certificazione che può essere accettata dal sistema finanziario abbreviando quindi, notevolmente, i tempi di gara. Tale effetto lo si ottiene creando una rete di soggetti certificati tra cui selezionare il fornitore. Creando le premesse che a tale selezione, ed alla qualità delle certificazioni, che porta in gara corrispondano aspetti di premialità, vuoi per il fine, vuoi per il possibile alleggerimento dei costi amministrativi correlati.

Il fattore rischio finanziario, connesso ed insito nelle operazioni ESCo, è di per sé stesso un elemento che ha la facoltà di accelerare notevolmente per raggiungere il break-even di qualsiasi operazione. In modo particolare quelle delle ESCo che sono, o possono essere, sottoposte a fattori esogeni al progetto stesso.

Il contratto EPC rappresenta una forma di garanzia in sé, in quanto l'effetto stesso della valutazione del costo connesso al rischio finanziario, può contribuire a ridurre l'incidenza delle attività speculative che, di norma, trovano sede, in tutto o in parte, nella parte di finanza pubblica disponibile. Ulteriore garanzia viene data dal fattore selezione per la registrazione in un albo e di eventuali sanzioni aggiuntive, quale ad esempio l'espulsione con la conseguenza diretta di vedersi esclusi dal mercato.

I fattori di rischio cui sono sottoposte le ESCo sono di due tipologie: economico e finanziario. Si ha rischio economico quando il suo andamento incide sui risultati reddituali, quindi legato all'equilibrio costi ricavi; si ha invece rischio finanziario un rischio finanziario quando il suo recupero è collegato all'andamento dei flussi di cassa incidendo sulla liquidità del contratto stesso presente sia per costruzione contrattuale sia per filosofia operativa, nei contratti ESCo più che in altre forme contrattuali. Ed è questa capacità il vero nesso causale tra ESCo e cliente per la formazione del contratto EPC; lo slittamento di tale rischio dal semplice cliente alla società ad alta specializzazione. Nella Tabella 32 viene riportata una valutazione dei rischi contrattuali in funzione della tipologia di servizio.

Tabella 32. Valutazione dei rischi contrattuali in funzione della tipologia di servizio

	RISCHIO FINANZIARIO	RISCHIO ECONOMICO	FORME CONTRATTUALI	EFFETTI SULLE SCELTE DI MERCATO
ESCo	ALTO	ALTO	PPP - CONCESSIONI	Forte Selezione Utenti
SERVIZIO ENERGIA	MEDIO BASSO	MOLTO BASSO	FORNITURA	Selezione Utenti in rapporto al loro rischio

Il Servizio Energia si configura come contratto definito a tutti gli effetti, e la norma è precisa in questo, portante la soddisfazione contrapposta dei contraenti, individuando con precisione chi paga e per cosa paga, motivo che porta a valutare negativamente il rischio economico che dipende abitualmente ed esclusivamente dalla capacità tecnica dell'offerente.

Il contratto ESCo risulta molto più duttile in quanto non è, per sua natura, strumento di gestione di interessi contrapposti, ma piuttosto di interessi convergenti. Infatti la ricerca e la copertura dell'investimento fatto dalla ESCo e del relativo rischio assunto avviene, in tutto o in parte, con l'acquisizione dei *negawatts*, ovvero dei risparmi energetici (o dei *newwatts* se la produzione è fatta con tecnologie environment friendly, ma che devono comunque corrispondere a un plus derivante da miglioramenti ambientali ed un *minus* per la perdita dell'inquinamento). Tutti meccanismi che trovano un loro valore. In molteplici casi il contratto a livello di pubblica amministrazione si è sviluppato, nei vari paesi, in termini di concessioni o, altrimenti, PPP contrattuali o societarie con una previsione di durata ben oltre i limiti del servizio di energia. Tra l'altro si riferiscono a due mercati identici nell'obiettivo, l'efficienza energetica, ma diversi nel modo di raggiungerla. Per questo motivo si ritiene abbiano egual diritto di essere considerati in un Albo delle ESCo, in due categorie specificate separatamente per la chiarezza e trasparenza dovuta al cliente.

Un soggetto tenuto ad assumere un rischio finanziario, totale o parziale, per il pagamento dei servizi resi per le operazioni che propone ai clienti, che mettono a sua disposizione le proprie installazioni o i propri locali, dovrebbe essere un soggetto che ha caratteristiche di unicità per la sua selezione.

Linee guida per la creazione di bandi di gara per interventi di efficientamento energetico

Nell'ottica di utilizzare al meglio i fondi previsti all'art. 9 del D. lgs. 115/2008 e di accelerare la maturazione dei prodotti finanziari associati agli interventi di efficienza energetica, sono state messe a punto delle linee guida di tutela per gli investitori e i finanziatori per i contratti di rendimento energetico, accentuando l'impatto del valore della certificazione, in termini di garanzia, anche economica, del risultato collegato agli interventi ESCo. Tali linee guida sono orientate alle nuove indicazioni del recente documento *Energy Efficiency: Accelerating the Agenda*, presentato ad inizio 2011, tengono in considerazione l'effetto delle revisione degli standard IAS e FASB a livello di contabilizzazione del *performance contract* nel settore di "green lease contract". Fermo restando i termini imposti dall'applicazione del D.lgs. 163/2006 (Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture), esistono dei fattori che possono contribuire all'accelerazione voluta, quali:

- la selezione del soggetto cui riferirsi grazie all'attivazione dell'albo delle ESCo;
- la scelta di procedure aperte;
- una diversa e più snella valorizzazione di standard contrattuali di riferimento collegati ai format definiti dall'Albo;

- la valorizzazione della certificazione economica del rischio assunto da una ESCo certificata, coadiuvata dalla garanzia dei risultati tecnici supportati dai relativi documenti (quali possono essere i “Granted” con annesso Performance Bond dal FTT, ovvero gli “Shared” anch’essi assistiti da performance bond).

In altri termini esternalizzare la procedura verso i documenti certificati e i performance bond rilasciati dalle ESCo, sono elementi che possono snellire la procedura esistente.

Indagini realizzate nel settore specifico hanno evidenziato che il mercato dei servizi energetici in Europa non abbia raggiunto il suo potenziale. Clienti potenziali nel settore pubblico e privato spesso mancano di informazioni sistematiche sulla disponibilità di servizi ESCo o nutrono dubbi sulla qualità dei servizi offerti. Per rimuovere questi ostacoli e aumentare la trasparenza del mercato delle ESCo, la Commissione proporrà che gli Stati membri forniscano panoramiche del mercato, elenchi dei fornitori di servizi energetici accreditati e contratti tipo. A tale riguardo si provvederà a garantire che il rinnovo degli edifici sia effettuato in modo completo (ossia rinnovo profondo) per evitare interventi ripetuti. Anche il centro europeo di consulenza per i partenariati pubblico-privato (EPEC) può fornire utili informazioni.

Per poter svolgere il loro ruolo, le ESCO devono avere accesso alle risorse finanziarie. Finanziamenti innovativi caratterizzati da un effetto moltiplicatore significativo a livello nazionale ed europeo, rappresenterebbero un modo adeguato per catalizzare lo sviluppo di questo mercato, ad esempio ampliando l'accesso al “finanziamento per progetto”, tramite strumenti fra i quali l'apporto di liquidità e di garanzie, linee di credito e fondi di rotazione.

Vi è poi una sottoclasse di moltiplicatori definita dal termine "*derivati*". Nel caso delle ESCo questi strumenti possono essere utilizzati per la copertura di un rischio (*hedging*). Un derivato utilizzabile potrebbe essere la garanzia fornita da una regione o provincia, senza incorrere in quegli effetti speculativi che generarono il caso ENRON, ma come veri e propri strumenti moltiplicatori della finanza disponibile per le ESCO, sfruttando l'effetto leva.

Nel progetto del Consorzio dei comuni trentini, recentemente presentato al workshop dell’Unione europea sulle ESCo tenutosi a Firenze, si era richiesto la disponibilità di strumenti innovativi dal punto di vista macro e micro finanziario. Oltre ad evidenziare l'opportunità dell'attivazione, da parte della provincia, di una forma di garanzia degli investimenti in efficienza energetica rimborsabili tramite i risparmi conseguiti dagli investimenti stessi. In pratica un Fondo di rotazione dei Comuni assistito da un derivato, la garanzia della Provincia. Perché questo potesse funzionare correttamente, si era prevista la costruzione di un Albo Territoriale delle ESCo che provvedesse a due certificazioni estremamente importanti:

- Certificazione delle ESCo come forma di garanzia della qualità tecnica e finanziaria dell'offerta fatta ai clienti, che, come correttamente dice la commissione europea, non sono sufficientemente informati. Obiettivamente, un mero elenco di prestatori d'opera non ha un senso realmente compiuto a meno che non sia collegato a una forma governata da un soggetto in grado di valutarne e disciplinarne i comportamenti all'interno di uno schema di regole che ne rappresentino le linee guida.
- Certificazione dei risultati da assicurare e/o scontare. Anche in questo caso, poiché il fondo garantito dalla provincia doveva essere alimentato con fondi derivanti da parti terze, coperte dalla garanzia provinciale. Il rischio esistente era che, la garanzia data, essendo terza rispetto le operazioni effettuate ed i relativi finanziamenti, risultasse un “derivato” che non si limitasse a fare *hedging*, ma assistesse anche operazioni speculative o ad alto tasso di rischio tecnico-economico non in grado di garantire un rientro degli investimenti come da programma. Da qui la necessità di certificazione dei risultati, offerta ovviamente da soggetti in grado di prestarla e onorarla in caso di necessità (inadempienza della ESCo).

Due entità che eliminano le dicotomie tra diversi tipi di ESCo oggi operanti sul mercato, che possono creare confusione nella scelta e nei diversi indirizzi che possono essere dati (vedi task su albo delle ESCo).

L’idea-progetto presentata si indirizzava verso le nuove forme di finanziamento, per grandi progetti e progetti aggregativi che partono da una discussione su strumenti di microcredito avviabili da strutture commerciali, largamente diffuse, come le cooperative. Tra questi, una concreta possibilità può essere offerta dall’introduzione di una *Energy Credit cards* destinata ai consumatori minori e medi, di micro progetti singoli per l’efficienza energetica, per aggregare una filosofia comportamentale dei singoli indirizzandola all’efficienza. Le *Energy Credit cards* si possono caricare con i risparmi conseguiti dai singoli. Questi possono essere spesi, idealmente, per il pagamento dei micro tributi che il federalismo non mancherà di creare, o alternativamente, spendibili per altri oneri. Un sistema semplice per dare agli utenti la percezione di un ritorno piacevole dei loro investimenti e che incentivi i successivi comportamenti virtuosi. L’amplificazione maggiore si avrebbe ipotizzando una fattispecie in cui gli utenti si aggreghino tra loro, innalzando così l’effetto moltiplicativo abbinato a un nuovo strumento finanziario, composto dagli elementi riportati in nota, ferma restando la possibilità di creare una nuova ESCo per soddisfare i target dell’aggregazione.

A tale scopo sono stati definiti le principali funzioni dell'albo, i criteri di adesione, la struttura e una modalità operativa innovativa che vedrebbe il concretizzarsi di un'aggregazione di interessi pubblici e privati, tali da coinvolgere anche le PMI del territorio, e che potrebbe contribuire a modificare i comportamenti.

Studio sui fondi di garanzia e di rotazione

Il settore dell'energia è uno dei pochi caratterizzato da una crescita importante negli ultimi anni. Il mercato si è sviluppato in parte grazie alla spinta degli incentivi (fonti rinnovabili, residenziale), in parte per l'aumento dei costi dell'energia uniti, dopo il 2007, alla ricerca di competitività seguita alla crisi finanziaria. Se il comparto delle fonti rinnovabili elettriche ha prevalentemente riguardato aziende di produzione estere – per cui si sono sviluppati per lo più gli intermediari legati alla progettazione, all'installazione, alla vendita e alla gestione e manutenzione degli impianti – nel caso dell'efficienza energetica l'industria produttiva italiana è ben rappresentata. Pertanto favorire la crescita del mercato presenta molteplici benefici: riduce la dipendenza dall'estero, riduce l'esposizione alla fuel poverty e all'aumento dei costi di produzione industriali, riduce le emissioni nocive e climalteranti, promuove lo sviluppo dell'industria nazionale in un settore destinato a crescere sempre più a livello internazionale.

L'efficienza energetica, pur essendo caratterizzata dall'esistenza di varie soluzioni corrispondenti a buoni o ottimi investimenti, è però rallentata da una serie di barriere, prevalentemente non economiche. Fra quelle principali si segnala l'assenza di conoscenza degli utenti finali, di alcuni operatori di mercato (in particolare installatori e piccole imprese coinvolte nelle ristrutturazioni edilizie) e delle banche, che ne frena lo sviluppo in quanto si riflette in una domanda inferiore ai potenziali e nella difficoltà di accesso agli investimenti. Questi ultimi sono in genere di modesta entità – normalmente comprese fra le decine di migliaia e le centinaia di migliaia di euro – e dunque passano per il finanziamento di agenzia, in assenza di prodotti finanziari dedicati, non potendo così beneficiare di una valutazione tecnica. In altri termini il finanziamento tiene difficilmente in conto le caratteristiche di questi investimenti, in grado di ripagarsi in tempi interessanti grazie ai flussi di cassa generati dai risparmi energetici.

Le imprese per intraprendere i loro progetti e iniziare un'attività necessitano infatti di capitali. Di norma le piccole e medie imprese hanno una scarsa capacità finanziaria, specie se operano da poco tempo sul mercato, e si trovano costrette a ricorrere al capitale di rischio. Le banche, da parte loro, richiedono quasi sempre adeguate risorse finanziarie che le imprese devono presentare a garanzia del capitale richiesto. Questo frena il sistema, dal momento che troppe società si trovano sia senza risorse finanziarie, sia senza le garanzie che gli istituti di credito vogliono al momento della richiesta di un finanziamento.

La difficoltà nel reperire le risorse necessarie per iniziare un'attività sono particolarmente elevate per le società che operano in ambito energetico, in particolare per le ESCo che necessitano di ingenti capitali per intraprendere iniziative anche non ripetitive, a favore di una clientela eterogenea e con lunghi tempi di ritorno dell'investimento. Le società di servizi energetici non hanno capitali o altri beni da dare a garanzia dei finanziamenti richiesti e i loro investimenti si ripagano anche in 10-15 anni, mentre generalmente le banche concedono loro prestiti a breve.

A livello comunitario, nazionale e regionale troviamo numerosi programmi e iniziative a sostegno delle PMI in generale e, più in particolare, di sviluppo delle energie rinnovabili e dell'efficienza energetica. Le fonti rinnovabili hanno beneficiato negli ultimi anni di certificati verdi, tariffe onnicomprensive e conti energia – tutti meccanismi che hanno facilitato l'intervento delle banche in virtù dell'entità del supporto e della possibilità di utilizzare gli incentivi stessi come garanzia degli investimenti. L'efficienza energetica, invece, è caratterizzata da una molteplicità di interventi diversi, in genere di dimensioni economiche contenute, e sebbene risultino normalmente interessanti anche in assenza di incentivi, la scarsa conoscenza da parte degli istituti di credito – ossia l'elevata percezione del rischio di finanziamento – e la necessità di passare per finanziamenti di agenzia, viste le somme in gioco, rendono fondamentale intervenire sia per diffondere la conoscenza da parte degli istituti di credito, favorendo la produzione di pacchetti finanziari dedicati, sia l'introduzione di strumenti a garanzia degli interventi stessi, aspetto che rappresenta il tema centrale del presente documento. In tale contesto sono stati analizzati i vantaggi e gli svantaggi della costituzione di fondi di garanzia e fondi di rotazione, che possano essere utilizzati da Regioni ed EELL come valida alternativa ai più conosciuti finanziamenti in fondo capitale. I risultati dell'analisi si possono riassumere attraverso le seguenti sintetiche osservazioni:

- Un fondo di garanzia è più complesso da predisporre rispetto ad un finanziamento in conto capitale, a causa della necessità di coinvolgere dei partner bancari, mentre risulta simile sul fronte delle valutazioni tecniche e ha il vantaggio di poter essere rotativo, garantendo una continuità temporale, e di essere più efficace, in quanto il coinvolgimento iniziale degli istituti di credito facilita l'accesso ai finanziamenti e dunque favorisce gli investimenti. Risulta inoltre più difficile attivare azioni fraudolente.
- Il coinvolgimento degli istituti di credito, aiutandoli a conoscere meglio gli interventi proposti nel bando e a valutarne meglio i rischi, ha anche il beneficio indiretto di portare ad una maggiore facilità di accesso al credito anche interventi simili che non rientrano nel bando, con i conseguenti effetti positivi sul mercato.
- Molti interventi di efficientamento energetico e di generazione distribuita beneficerebbero dalla disponibilità

di fondi di garanzia e di rotazione, anche in conto interesse, più di quanto non accada con i contributi in conto capitale. In particolare questi fondi sono adatti a promuovere il mercato delle ESCo – ossia delle società di servizi energetici in grado di operare offrendo la garanzia sulle performance sui servizi energetici erogati partecipando al rischio finanziario –, su cui puntano molto sia l'Energy efficiency plan pubblicato dalla Commissione europea ad inizio 2011, sia il Piano di azione per l'efficienza energetica varato dal Ministero dello Sviluppo Economico a luglio 2011. Per questi motivi si suggerisce alle amministrazioni di prendere in considerazione questo tipo di agevolazioni.

La maggiore complessità in fase di creazione e di gestione può essere ripagata dai maggiori benefici conseguibili, dalla possibilità di dare continuità ai programmi di supporto e dalla possibilità di mettere in campo programmi di finanziamento con fattori moltiplicatori maggiori, in grado di promuovere maggiormente il mercato a parità di risorse disponibili.
Il contributo della FIRE sul tema *"Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi"* si è focalizzato sulla definizione di linee guida per costituzione di fondi di garanzia e fondi di rotazione, che possano essere utilizzati da Regioni ed EE.LL. come valida alternativa ai più conosciuti finanziamenti in fondo capitale.

In primo è stata svolta un'accurata analisi degli strumenti finanziari attualmente disponibili a livello europeo, in seguito sono state sono state definite le fasi da seguire nella predisposizione di un bando per la concessione di agevolazioni e gli aspetti che il proponente deve tenere presenti nella predisposizione della domanda di accesso ai fondi. Basandosi su dati di letteratura e su interviste condotte su i soggetti deputati alla gestione dei fondi in vigore sono state inoltre messe in evidenza le criticità relative all'ammissibilità delle domande al fondo, per comprendere meglio quali siano le problematiche più comuni che vengono riscontrate. Sono state inoltre riportate alcune considerazioni sintetiche su programmi realizzati di recente, al fine di evidenziare l'importanza delle misure di accompagnamento e l'esigenza di dedicare a tale scopo una parte delle risorse dei fondi disponibili (in genere 3-5% a livello europeo). Per concludere, grazie al contributo delle interviste svolte, sono state selezionate alcune esperienze significative di istituti bancari e amministrazioni locali e nazionali.

Fondo di garanzia

Il fondo di garanzia è uno strumento finanziario che agevola l'accesso al credito per le PMI. Il fondo interviene emettendo garanzia a favore delle PMI per consentire loro l'accesso al finanziamento esterno, a fronte di una commissione che copra i rischi e i costi amministrativi e di gestione. Le imprese che necessitano di capitali per i propri investimenti possono chiedere alle banche, o agli altri istituti di credito, un finanziamento che viene garantito direttamente dal Fondo di garanzia. Le imprese saranno quindi sgravate dall'obbligo di presentare le garanzie collaterali (garanzie reali e personali, garanzie reddituali, fidejussioni, polizze assicurative, etc) generalmente richieste dalle banche. Lo strumento della garanzia è tipicamente impiegato da nuove imprese in fase di avvio e società innovative e in rapida crescita.

Le garanzie si basano sul principio della condivisione del rischio tra gli istituti che erogano il prestito e i soggetti garanti (ad esempio lo Stato, un gruppo di enti locali, delle fondazioni, etc), che coprono in genere il 40-80% del valore del prestito, riducendo in modo significativo il livello di rischio a carico dell'istituto di credito.

A differenza dei prestiti agevolati, concessi a tassi inferiori alla media di mercato, che prevedono periodi di preammortamento e la richiesta di garanzie reali, e dei contributi a fondo perduto, per i quali non è prevista la restituzione del capitale o della quota interessi, i fondi di garanzia non concedono contributo in denaro, bensì offrono una agevolazione sotto forma di garanzia in quanto il Fondo fa da garante alla banca che concede il finanziamento all'impresa, nel caso di mancata restituzione del capitale.

I fondi di garanzia possono essere gestiti dall'Unione europea oppure, a livello nazionale, dallo Stato o dalle singole Regioni. Generalmente, a copertura dei fondi di garanzia sono utilizzate le somme stanziate nel bilancio di una istituzione o pubblica amministrazione e messe a disposizione a garanzia dei finanziamenti richiesti alle banche dalle imprese o altri soggetti pubblici e privati. Le fonti di finanziamento possono essere:

- Capitale dai Fondi strutturali comunitari;
- Capitale da fonti pubbliche nazionali e regionali;
- Capitale privato, prestiti da privati;
- Sottoscrizioni di fondi di mutua garanzia delle PMI;
- Fondi basati su componenti tariffarie quali gli oneri sul sistema elettrico.

I vantaggi offerti dai fondi di garanzia sono:

- per le imprese, la possibilità di accesso facilitato al finanziamento o la disponibilità di migliori condizioni rispetto a quelle di mercato;
- per gli istituti finanziari, la condivisione del rischio col fondo di garanzia, che di fatto riduce il rischio e favorisce la crescita della concessione di credito da parte del settore privato.

Fondo di rotazione

Anche i fondi di rotazione sono strumenti finanziari a sostengo delle imprese. Tali fondi sono detti rotativi perché vengono alimentati, oltre che dagli stanziamenti pubblici, anche dalle somme restituite ciclicamente dalle imprese beneficiarie. Vengono quindi utilizzati permanentemente nel tempo le risorse finanziarie di cui esso viene dotato in quando, man mano che i beneficiari restituiscono il capitale che hanno ricevuto, questo tornerà disponibile nelle casse del fondo e potrà essere riutilizzato per finanziare nuovi programmi di intervento.

Generalmente i finanziamenti richiesti dai soggetti beneficiari del fondo di rotazione sono coperti per una determinata quota percentuale dal fondo stesso, senza la corresponsione di nessuna quota interessi, e la restante parte viene concessa dagli istituti finanziari alle normali condizioni di mercato (quota capitale più quota interessi). In alternativa possono essere concessi finanziamenti a tassi agevolati.

I vantaggi dei fondi di rotazione sono l'autoalimentazione del fondo attraverso il rimborso delle rate a beneficio di un più ampio numero di imprese e la riduzione del tasso di interesse sui prestiti erogati (attraverso provvista pubblica a tasso zero e provvista delle banche a tasso convenzionato). Senza concedere contributi a fondo perduto, che sono un costo secco per lo Stato e non alimentano il tessuto produttivo nazionale, i fondi rotativi, così come i fondi di garanzia, premiano le migliori realtà produttive: solo chi è veramente remunerativo riesce ad usufruire del fondo, mentre chi utilizza i contributi a fondo perduto non necessariamente ha una buona performance di rendimento.

Considerazioni sui due strumenti

In generale lo svantaggio principale dei finanziamenti indiretti, come i fondi di garanzia e i fondi di rotazione, è che il fondo copre solo parte del finanziamento richiesto, la parte restante è lasciata alla libera contrattazione delle parti e quindi alle normali regole di mercato. Può dunque accadere che, riducendosi l'esposizione al rischio, le banche prestino minore attenzione alla solvibilità dell'impresa che richiede loro un finanziamento, ma anche che le condizioni richieste sulla parte di finanziamento bancario rimangano onerose e dunque poco adatte alle società costituite di recente, che è poi il caso di interesse nell'analisi di questo studio.

Un punto importante da evidenziare, con riferimento agli altri meccanismi di incentivazione, è che i fondi di garanzia e di rotazione, rispetto ai contributi in conto capitale, sono meno esposti agli usi illeciti dei fondi, come le sovrafatturazioni da parte di aziende che aprono una nuova società e che poi chiudono una volta utilizzato il contributo, ossia il connubio fra criminalità organizzata e società fantasma.

La principale differenza tra i fondi di rotazione e i fondi di garanzia è che i primi mettono a disposizione dei beneficiari solo le risorse finanziarie allocate dalle istituzioni senza alcun ulteriore stimolo agli istituti di credito, che comunque si esporranno quasi completamente sui prestiti erogati; i fondi di garanzia invece funzionano come un'assicurazione per gli istituti di credito e quindi favoriscono la crescita economica grazie all'effetto moltiplicatore di sviluppo.

Un'altra differenza sta nel fatto che il fondo di rotazione può essere utilizzato per coprire la sola quota interessi dei prestiti, mentre i fondi di garanzia devono per forza riferirsi a una parte consistente dell'investimento considerato. Ciò fa sì che a parità di risorse disponibili l'effetto leva dei fondi rotativi possa essere decisamente maggiore, potendosi applicare al finanziamento di interventi percepiti a basso rischio dalle banche.

Non è dunque un caso, quando si cerca di promuovere interventi se non innovativi, quantomeno poco conosciuti dagli istituti di credito, che i fondi di garanzia siano anche fondi di rotazione, come ad esempio il Fondo di Garanzia per le PMI di cui si parlerà nel prossimo capitolo, proprio perché se sommano i benefici dei due strumenti e alle disponibilità iniziali si aggiungono le quote restituire dai beneficiari, che liberano altre somme impiegabili per la concessione di nuove garanzie.

Linee guida per l'applicazione dello strumento dei fondi di garanzia a livello nazionale e locale

Al fine di dare un supporto a chi, ente pubblico o amministrazione, voglia proporre un particolare incentivo (soggetto attuatore) o a chi voglia beneficiare di queste agevolazioni (soggetto proponente), si riporta nel documento un elenco delle fasi da prendere in considerazione nella predisposizione di un bando o regolamento di attuazione, e del suo corretto utilizzo.

Soggetto attuatore

L'amministrazione che intende sfruttare i fondi europei, o gli altri fondi che ha a disposizione, deve saper creare il giusto programma di agevolazioni o finanziamenti.

Sono necessarie ottime capacità tecniche e organizzative per riuscire a individuare e scegliere il modo migliore per impiegare le risorse disponibili. Nella stesura del bando o del decreto attuativo dell'incentivo che si vuole proporre, è necessario tenere conto innanzitutto della disponibilità dei fondi e di come li si vuole impegnare. È opportuno in tale sede definire una percentuale di fondi da destinare a misure di accompagnamento, quali azioni informative, gestionali, di monitoraggio, etc. Usualmente questa può essere nell'ordine del 3-5%. Nel caso si abbia a disposizione 1 milione di euro, ad esempio, si può pensare di destinare alle misure citate dai 30000 ai 50000 euro. Si dovrà, quindi, fare una descrizione sommaria del programma che si vuole attuare, individuando:

- le fonti di finanziamento del programma, la loro entità e le caratteristiche;
- i destinatari (imprese, cittadini, enti locali, etc.) al fine di quantificare le domande potenziali oltre a valutare benefici e ricadute sul territorio;
- gli obiettivi generali del programma (promozione generale dell'efficienza energetica e della generazione distribuita, diffusione di particolari tecnologie, contrasto alla fuel poverty o all'inquinamento, etc.);
- le soluzioni da incentivare, ponendo attenzione al rapporto con le risorse disponibili;
- i termini dell'agevolazione, ossia le percentuali sul costo di investimento e la durata dell'agevolazione ;
- gli accordi di gestione;
- i vantaggi che ne deriveranno (per l'ente proponente, per il territorio, per le banche coinvolte, per i beneficiari dei finanziamenti).

Soggetto beneficiario

Nel caso in cui sia il cittadino, l'unica preoccupazione è verificare se il bando è in linea con le sue esigenze e che non ci siano incompatibilità con altri incentivi eventualmente richiesti, e quindi procedere alla predisposizione della domanda; si tratta di una funzione che sarebbe bene fosse supportata da sportelli energetici dedicati, con il duplice vantaggio di orientare correttamente il cittadino e di evitare di dover gestire pratiche scritte male, incomplete o irricevibili per incompatibilità con altri incentivi o altri motivi. Si tratta di un tipico esempio in cui investire nelle attività preparatorie informative e di supporto si rivela in seguito vincente per l'amministrazione.

Nel caso delle imprese, il soggetto che voglia ottenere dei finanziamenti deve essere in grado di saper scegliere lo strumento più adatto alle proprie esigenze e alle sue caratteristiche aziendali. Dovrà quindi porsi una serie di domande atte a verificare:

- il possesso dei requisiti richiesti dal bando, dal programma di incentivazione, o dall'agevolazione finanziaria considerati, attraverso l'individuazione della propria realtà organizzativa tra le figure ammissibili (impresa, ente pubblico, ente di ricerca, società di consulenza o di ingegneria, libero professionista, associazione di categoria, etc.) e del tipo di attività svolta (settore di appartenenza);
- la tempistica per la presentazione della domanda e i relativi tempi burocratici per l'ottenimento del finanziamento, in modo da poter programmare i propri progetti di investimento; è altresì necessario verificare che la durata del progetto venga interamente coperta dal finanziamento che si vuole ottenere, in modo da garantire la copertura finanziaria durante il periodo di pay back;
- il tipo di sostegno conseguibile (contributi in conto capitale e in conto interessi, capitale di rischio, aiuti di Stato, prestiti, garanzie, sovvenzioni, agevolazioni fiscali, etc.);
- se vengono coinvolti altri soggetti nel programma e che ruolo hanno (facilitatori e di supporto, informativo, di valutazione, di controllo, etc);
- se il finanziamento è promosso a livello nazionale o regionale.

Anche nel caso delle imprese una struttura informativa di supporto è utile. In assenza di una struttura territoriale disponibile (e.g. un'agenzia) si possono predisporre accordi con le associazioni, le università o l'ENEA.

Problemi di accessibilità

Un fondo ha per sua natura dei limiti di disponibilità, per questo è necessario verificare che le risorse vengano spese bene dai soggetti beneficiari. In primo luogo occorre confrontare la somma disponibile con la soluzione che si intende promuovere e con il risultato che si intende conseguire. Da questo punto di vista i fattori da considerare sono:

- la numerosità delle realizzazioni (se si considerano progetti di innovazione industriale o la cogenerazione industriale, ad esempio, possono essere interessanti anche dieci realizzazioni in un anno, se si vuole promuovere le pompe di calore, il solare termico o i motori elettrici efficienti è evidente che l'ordine di grandezza deve crescere di uno o due fattori per avere un effetto utile);

- il costo medio delle realizzazioni (si passa dalle migliaia di euro ai milioni di euro a seconda di quello che si considera);
- la percentuale coperta dal fondo.

In relazione al secondo punto, molti programmi ammettono diverse soluzioni al finanziamento. Ciò è naturale e in genere logico, ma occorre prestare attenzione quando i costi delle soluzioni ammesse differiscono in modo considerevole.

Ammissibilità della domanda al fondo

Questo tema purtroppo ha degli aspetti di dinamica temporale: è diversa la situazione di un bando *una tantum* e che viene visto dagli operatori come ultima e unica chance, da un bando che si rinnova annualmente su tempi lunghi. Nel primo caso ci sarà la tendenza, da parte dei potenziali beneficiari, di presentare domande anche se incomplete e non sviluppate, pur di riuscire ad accedere al bando e a garantirsi un diritto. Nel secondo caso il proponente sarà disponibile a presentare la domanda quando effettivamente pronto e avrà la certezza di presentare la domanda nel rispetto delle regole previste dal bando e, quindi, avere maggiori possibilità di vedere accolta la propria proposta.

Mentre l'Unione europea, con piani quinquennali in esercizio da decenni, ha sviluppato una metodologia ormai acquisita dai proponenti, in Italia non si è mai riusciti ad andare a regime. Un esempio sono la legge 9/91 e Industria 2015, che non hanno avuto continuità, e talvolta nemmeno l'applicazione iniziale, dimostrandosi fallimentari rispetto alle previsioni. Il risultato è stato che i programmi lanciati hanno portato a una quantità di risposte poco strutturate e documentate, dunque difficili da valutare, o in numero eccessivo rispetto alla disponibilità delle risorse.

La Commissione europea prevede programmi di finanziamento garantito all'interno di un macro obiettivo definito ogni cinque-sei anni, con call tipicamente annuali, i cui obiettivi specifici vengono definiti alcuni mesi prima, in funzione di quanto emerso da analisi e studi di mercato. Il macro programma non è sottoposto a revisioni annuali (come successe alla legge 308/82 e alla legge 10/91).

Quando un programma parte da zero, vi è la tendenza ad essere molto larghi nei parametri di ammissibilità delle proposte, mentre poi, in corso di valutazione, si scopre che sarebbe stato logico indicare delle priorità in base alle concrete situazioni dal punto di vista tecnico ed economico, con l'obiettivo di stimolare i temi energetici più interessanti e di contribuire alla soluzione delle contingenze di sviluppo economico del momento (settori in crisi, imprese in difficoltà, etc.). Non esiste un'indicazione unica al riguardo, ma dall'analisi delle esperienze passate, anche su tipologie di bandi differenti (ad esempio in conto capitale), si possono estrarre utili suggerimenti per evitare di trovarsi in difficoltà e per scrivere un bando di successo. Nell'ammissibilità in genere si può valutare:

- la congruenza del tema rispetto a quello previsto;
- il grado di innovazione della proposta, se il bando affronta questo tema (incentivi al mercato, incentivi alla dimostrazione, incentivi all'innovazione);
- il rispetto delle norme vigenti (legislazione primaria, secondaria, regionale, delibere dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas e norme tecniche);
- le previsioni di successo economico a valle dell'incentivo;
- l'adeguatezza della struttura, da un punto di vista economico, operativo e tecnologico, a realizzare il progetto.

Quest'ultimo punto, fortemente discrezionale, va visto in previsione di come funzioneranno le forme di garanzia che dovranno essere fornite da chi parteciperà al Fondo, che vanno delineate prima ancora del bando in collaborazione con i partner bancari.

Dal punto di vista operativo, una selezione approfondita, in fase di ammissione, semplifica i problemi della valutazione, ma richiede che sia già presente una struttura tecnica adeguata all'analisi, mentre l'ammissibilità troppo allargata mette in difficoltà la commissione di valutazione che si trova a discutere di proposte, che, senza entrare troppo nel merito, si sarebbero dovute respingere per motivi di ammissibilità. La selezione per l'assegnazione dei fondi può utilizzare in linea di principio due meccanismi diversi:

1) il primo arrivato, il primo servito, fino ad esaurimento dei fondi annuali;
2) graduatoria unica per tutte le domande arrivate entro la scadenza prevista.

Alcuni esperti interessati hanno segnalato che il primo meccanismo, che è stato ad esempio usato nell'attuazione della legge 308/82, ed è utilizzabile quando le disponibilità sono ampie, ha il vantaggio di portare all'assegnazione dei primi fondi con una certa rapidità, senza attendere i lunghi tempi che invece sono necessari per le graduatorie. Come inconveniente principale vi è il fatto che le imprese sono stimolate a presentare progetti di scarsa qualità pur di prenotare delle posizioni (problema verificatosi di recente nell'invio delle domande per l'accesso al Quarto

Conto Energia per il fotovoltaico, per il quale esiste un tetto massimo di spesa). Un secondo inconveniente è la possibilità che varie proposte vengano valutate in tempi diversi e quindi con logiche diverse. Infine, c'è la possibilità che la selezione dipenda eccessivamente da un parametro spesso casuale e non ben controllato, come l'assegnazione del numero di protocollo o tempistiche di presentazione di dubbia validità.

La classificazione a graduatoria, d'altro canto, richiede la formalizzazione degli indici di merito e del loro peso relativo, il che si presta bene nei casi in cui l'ammissibilità sia stata liberale e si debba operare una drastica riduzione delle proposte.

Un aspetto da non sottovalutare nella predisposizione di un bando è la capacità di riuscire a tenere in considerazione vari fattori che garantiscano la buona riuscita del bando stesso. Parametri troppo larghi e poco selettivi rischiano di attivare un numero di domande troppo elevato rispetto ai fondi disponibili. Un numero ridotto di partecipanti al bando indica criteri di ammissibilità troppo restrittivi e/o incentivi poco allettanti.

Gli indici di merito possono essere di vario tipo, secondo gli obiettivi primari e secondari assegnati nel programma:

1) Indici di replicabilità legati sia al risultato economico dell'investimento, sia alla rilevanza che quel settore economico ha sul mercato. Un programma di intervento sull'efficienza energetica dovrebbe selezionare interventi che abbiano due funzioni:
   - un effetto immediato di riduzione dei consumi, legato sia alla velocità di realizzazione delle opere, sia all'assenza di percorsi autorizzativi complessi o alla disponibilità pregressa delle autorizzazioni richieste;
   - la capacità di essere replicato e diffuso.
2) Indice di qualità tecnica e di innovazione. Il bando dovrebbe indicare esplicitamente se è rivolto a progetti su tecnologie standard e se i progetti innovativi godranno di vantaggi nell'entità dell'incentivazione o nella valutazione comparativa delle proposte ammesse al finanziamento.
3) Probabilità di realizzare il progetto in tempi brevi. Il legislatore si aspetta che il provvedimento abbia effetto immediato, quindi, già all'atto dell'ammissibilità sarebbe utile poter escludere quei progetti che sono delle mere prenotazioni.
4) Adeguatezza del proponente e dei suoi alleati ad affrontare le possibili difficoltà tecnologiche. Moltissime piccole imprese in passato hanno partecipato a bandi per interventi in questi settori, ma la continua evoluzione normativa, le difficoltà dei processi autorizzativi, la nascita di comitati locali contro, gli esempi più stringenti richiesti di misurazioni e di processi depurativi degli effluenti fino alle normative fiscali sui prodotti di recupero hanno impedito ai proponenti di arrivare al risultato finale, con spreco di risorse pubbliche e private. Sarebbe logico un collegamento con altri programmi di ricerca e sviluppo, nazionali e locali.

Entità dell'incentivo

Si tratta di uno dei punti più delicati. Qualitativamente è evidente che se l'incentivo è troppo basso risulterà poco interessante e dunque poco usato, se al contrario risulta eccessivo finisce per innescare fenomeni speculativi. Fatta questa premessa, si possono fare alcune considerazioni.

Nel caso specifico dei fondi il problema è per certi versi più semplice. Se il fondo è di garanzia, infatti, si tratta di scegliere una quota percentuale del costo di investimento da garantire, aspetto da concordare con le banche e con esperti di settore o associazioni di categoria. Spesso il valore si aggira intorno al 70-80%. Occorre porre attenzione, nel caso di incentivi rivolti alle spese, a non superare le soglie del regime de minimis.

Nel caso di un conto interessi si tratta di decidere la quota di interesse da coprire col fondo (tutta nel caso si intenda offrire ai beneficiari l'accesso ad un prestito a tasso zero). Ai valori attuali dei tassi si tratta di un valore inferiore al 10%. In questo caso l'effetto moltiplicatore del fondo sarà molto elevato, potendo superare di dieci volte la somma stanziata.

Definizione di algoritmi e indicatori per l'efficientamento dei centri elaborazione dati (CED)

Il tema dell'efficienza energetica nel settore delle Tecnologie dell'Informazione e Comunicazione (in inglese *Information and Communication Technology*, il cui acronimo è ICT), e in particolare nelle attività computazionali tipicamente svolte nei centri di calcolo (CED), è di grande attualità a livello europeo e mondiale. I centri di calcolo sono la tipologia di infrastruttura ICT nella quale è possibile realizzare interventi particolarmente significativi relativamente al tema delle efficienza energetica. Si è riconosciuto, infatti, come in termini di risparmio energetico, esistono margini molto consistenti di miglioramento delle soluzioni tecnologiche oggi in uso. Il Piano Nazionale per l'Efficienza Energetica 2011 dedica una sezione specifica alle potenzialità degli interventi nel settore informatico con particolare riguardo all'utilizzo dei server e servizi remoti. In tale contesto si articolano le attività svolte da ENEA che hanno conseguito i risultati di seguito riportati. In primo luogo è stato costruito un quadro dettagliato dei consumi energetici nei centri di calcolo partendo dalla descrizione delle varie parti di cui generalmente sono composti:

- IT (Information Technology) Equipment, che comprende server, desktop, monitor, stampanti, ecc … per

l'elaborazione ed il trattamento dei dati;
- Sistemi di alimentazione o power che garantiscono continuità e qualità elettriche alle apparecchiature IT quali unità UPS (Uninterruptible Power Supply o gruppi di continuità), PDU (Power Distribution Unit o unità di distribuzione dell'alimentazione) e PSU (Power supply Unit o alimentatori);
- Sistemi Ausiliari che comprendono gli impianti di raffreddamento o cooling della sala, l'illuminazione, sistemi di sicurezza come quelli antincendio e quelli a garanzia della continuità elettrica (gruppi elettrogeni).

Ogni parte è costituita da svariati componenti ognuno dei quali da una propria efficienza che si riflette su quella totale del centro di calcolo. E' quindi fondamentale non solo usare macchine ad alto rendimento, ma assicurare un'ottima gestione del centro di calcolo. Questo può avvenire a più livelli: posizionamento dei server all'interno della sala per migliorare i flussi di aria di raffreddamento, conduzione dei processi IT in corso di esecuzione ed in coda, analisi della memorizzazione e trasmissione dei dati, ecc. La divisione principale è tra la gestione dell'infrastruttura (edificio e sala macchine) e la gestione delle apparecchiature IT (server). E' importante che queste due aree tecnologiche interagiscano e si relazionino nel migliore dei modi. Una delle operazioni fondamentali per ottenere un'elevata efficienza energetica del centro di calcolo è la stima dei consumi delle apparecchiature che lo compongono. In una normale sala CED circa la metà dell'energia elettrica utilizzata viene assorbita dai carichi IT. L'altra metà della spesa per il consumo di energia elettrica è costituita dall'acquisto di elettricità destinata a far funzionare il sistema di alimentazione, di raffreddamento e quello di illuminazione. E' quindi molto importante che la parte dei consumi relativi alla continuità elettrica e al raffreddamento siano i minori possibili, in quanto l'attività principale è rappresentata dagli apparati elettronici. La componente all'interno delle apparecchiature IT che richiede la maggiore potenza è la CPU.

L'energia consumata dalle macchine elettriche e dalle apparecchiature elettroniche si trasforma in buona parte in calore che deve essere dissipato; aumentando l'efficienza di questi dispositivi oltre a diminuire i consumi diretti si riduce anche la richiesta degli impianti di raffreddamento. L'installazione di strumenti di misura è essenziale per evidenziare quali sono gli apparati più energivori, guidando così la scelta per effettuare degli interventi mirati all' efficienza energetica. Per calcolare l'efficienza energetica di un centro di calcolo, sebbene si tratti di un'operazione complessa, è stato individuato un indice, il PUE (Power Usage Effectiveness), che valuta il lavoro utile in uscita dal CED in rapporto all'energia consumata.

PUE = Potenza totale/Potenza IT

La scelta delle strategie che consentono di raggiungere gli obiettivi di efficienza energetica- quindi di un indice PUE pari al suo valore ottimale di 1,2 - nel CED si basano su analisi energetiche complete a partire dai dati derivanti da misure sul campo.

La seconda parte del lavoro presenta uno scenario completo su quelle che sono le *best practice* volte al miglioramento dell'efficienza energetica nei CED. I paragrafi sono dedicati alle scelte "energeticamente più efficienti" in ambito:
- degli IT Equipment;
- dei Sistemi di alimentazione;
- del Sistema di condizionamento e raffreddamento,

che devono essere prese in considerazione nella progettazione di un nuovo datacenter o nella ristrutturazione di uno esistente.

Nell'ambito degli IT equipment, particolare attenzione è stata dedicata alle tecniche di virtualizzazione e di cloud-computing. Nel paragrafo riguardante i sistemi di alimentazione viene fornito un esempio di calcolo del risparmio di energia con l'utilizzo di un nuovo sistema UPS; l' arco temporale è quello di un anno e come costante (per il vecchio ed il nuovo sistema di UPS) è fornita una potenza attiva in uscita pari a 10 kW. Nell'ambito, del condizionamento e del raffreddamento sono state inserite delle tabelle che sintetizzano i parametri di temperatura ed umidità che sono stati identificati dall'Ente europeo ETSI (European Telecomunications Standards Institute - norma ETSI EN 300 019-1-3) e dall'associazione ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning*) per la regolazione della temperatura e umidità all'interno dei centri di calcolo.

Un capitolo è poi dedicato ad alcune recenti iniziative dell'EU ed ai vari interventi della Commissione Europea che hanno messo in luce la necessità di conferire maggiore attenzione al tema dell'efficienza energetica nei CED. In particolare, si fa riferimento al Codice di Condotta per l'Efficienza Energetica nei Data Centre pubblicato dal JRC (Join Research Centre, Institute for Energy), si parla di diverse normative europee che si sono poste come obiettivo la riduzione dei consumi energetici per prodotti ICT (esempio: Energy star, EuP - Energy-using products – ecc…).

Il lavoro svolto oltre a fornire un quadro sul tema dell'efficienza energetica dei CED presenta una procedura per la determinazione del risparmio energetico conseguibile a seguito di interventi che prevedono la sostituzione di alcuni degli elementi installati nella sala CED. Il centro di calcolo è per sua definizione un sistema complesso ed il calcolo del consumo di energia elettrica totale è dato dalla somma dei consumi di tutti i dispositivi installati nella sala CED. La metodologia di valutazione definita dalla scheda si sofferma, però, sui tre elementi chiave di un CED che contribuiscono maggiormente all'inefficienza elettrica: i *server* per quanto riguarda i carichi IT, l' *UPS* ed il *condizionamento* per la parte riguardante l'infrastruttura fisica. La sostituzione degli elementi abbatte fortemente l'inefficienze presenti nella sala CED producendo in questo modo un miglioramento in termini di efficienza energetica. La procedura permette di calcolare l'energia risparmiata nell'arco temporale di un anno sostituendo rispettivamente i vecchi server, i sistemi UPS ed i sistemi di condizionamento, con i nuovi più efficienti. Per il calcolo vengono utilizzate le curve di efficienza dei vecchi e dei nuovi elementi sopra elencati e come condizione iniziale viene fornita una costante che è pari alla potenza attiva (kW) in uscita. Una panoramica sui server di ultima generazione è presente all'interno della scheda e per quanto riguarda i sistemi di condizionamento sono presentati calcoli sia nel caso che essi siano a pompa di calore sia se, invece, sono di altra natura ad esempio se viene utilizzato il free-cooling.

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

Nello svolgimento delle attività della precedente annualità del presente progetto, si è sviluppato un ambiente di progettazione dinamica per i sistemi edificio-impianti (piattaforma ODESSE), nella presente annualità si è realizzato l'integrazione nella piattaforma di vari modelli di diverse tipologie d'impianti

Allo scopo di validare il comportamento della piattaforma ODESSE con particolare focalizzazione al modello dell'edificio, si sono eseguite delle attività volte all'individuazione di nuovi edifici benchmark che, a differenza di quelli considerati nell'attività della precedente annualità, sono per profili di utilizzo, forma e caratteristiche strutturali rappresentativi del parco edilizio.

Infine, allo scopo di stimolare le potenzialità di contenimento dei consumi energetici dei dispositivi di poligenerazione distribuita, dovute prevalentemente dalla riduzione delle "perdite" energetiche legate al vettoriamento dell'energia ad elevata distanza ed ai frequenti funzionamenti a carichi parziali tipici degli impianti di taglia elevata, è stato affrontato lo studio di soluzioni sperimentali per il monitoraggio in rete dei consumi nel settore terziario e lo sviluppo di metodologie per il loro contenimento, attraverso modelli di simulazione per l'attuazione di strategie di controllo e ottimizzazione dei flussi energetici, provenienti anche da fonti non programmabili in un contesto di distretto energetico.

Definizione degli edifici

Allo scopo di validare il modello dell'edificio, realizzato ed integrato nelle annualità precedenti, sono stati definiti nuovi edifici (ovvero dimensioni e pacchetti costruttivi), affinate le procedure di calcolo e di comparazione con gli strumenti TRNSYS ed EnergyPlus (valutandone in maniera approfondita gli algoritmi di calcolo) e definite le condizioni di gestione degli edifici (nelle precedenti annualità analizzati sempre in assenza di carichi interni), individuando dei plausibili profili di occupazione, ventilazione e domanda elettrica.

Dopo diverse considerazioni, si è deciso di implementare tre edifici-tipo differenti per dimensioni, fattore di forma (variabile tra 0,37 m^{-1} o 0,73 m^{-1} a seconda dell'edificio), percentuale di superficie vetrata e destinazione d'uso. Al fine di verificare come gli algoritmi di calcolo dei software affrontino soluzioni costruttive diverse, per ogni edificio sono state considerate due versioni:

- una caratterizzata da soluzioni d'involucro leggere, quali muratura con soluzione a sandwich isolato e copertura poco massiva;
- una caratterizzata da soluzioni d'involucro pesanti, quali muratura in mattoni pieni con cappotto esterno e copertura molto massiva.

In conformità alle percentuali di superficie finestrata considerate, agli edifici sono state anche assegnate le destinazioni d'uso residenziale o terziaria (ad uso uffici).

Gli edifici sono stati introdotti come semplici parallelepipedi; i volumi sono stati modellati come singole zone termiche; non si è provveduto quindi a una ripartizione vera e propria in piani e zone termiche (scelta conforme all'obiettivo di testare il modulo ODESSE monozona). I solai intermedi presenti negli edifici sono stati presi in considerazione soltanto in quanto massa termica interna (Tabella 33).

Tabella 33. Caratteristiche principali degli edifici analizzati

	Unità di misura	Edificio "piccolo" (A)		Edificio "In linea" (B)		Edificio "In linea" (C)	
Geometria							
Superficie utile	m^2	200		1800		1800	
Volume netto	m^3	600		5400		5400	
Superficie disperdente	m^2	440		1980		1980	
Rapporto S/V	m^{-1}	0,73		0,37		0,37	
Superficie finestrata:							
Nord/Sud	m^2	6,25		112,50		285,00	
Est/Ovest	m^2	6,25		0,00		0,00	
Caratteristiche termofisiche medie dell'involucro							
		Pesante (AP)	**Leggero (AL)**	**Pesante (BP)**	**Leggero (BL)**	**Pesante (CP)**	**Leggero (CL)**
Trasmittanza	$W/(m^2 K)$	0,50	0,50	0,62	0,62	0,96	0,96
Massa superficiale	kg/m^2	529	160	519	133	392	126
Capacità termica	$kJ/(m^2 K)$	467	160	456	133	347	126
Occupazione							
Destinazione d'uso		Residenziale		Residenziale		Uffici	

Analisi delle procedure di simulazione dei software dinamici TRNSYS ed EnergyPlus

Dalle simulazioni effettuate, si è rilevato che, nonostante gli input relativi al clima e all'edificio siano identici nei due casi, si possono ottenere risultati diversi in termini di domanda di *heating* e *cooling* per tutti gli edifici e tutte le località esaminate. Per comprendere meglio le motivazioni di tali differenze, è stata fatta un'accurata analisi di sensitività in relazione ai principali parametri che caratterizzano la termo-fisica degli edifici.

Un aspetto rilevante degli algoritmi riguarda l'elaborazione dei dati di radiazione solare per ottenere le quantità incidenti sulle diverse superfici dell'edificio. Le differenze sono minime se:

- il coefficiente di assorbimento delle pareti è il più basso possibile (compatibilmente con le condizioni reali);
- i coefficienti convettivi sono il più possibile controllati e costanti;
- il time-step di EnergyPlus è sufficientemente piccolo.

Tali risultati sono stati ottenuti a valle di un'accurata analisi delle prestazioni degli strumenti analizzati, da cui si è appresa la profonda importanza della scelta della lunghezza degli intervalli di simulazione sul modo in cui EnergyPlus elabora i dati di radiazione solare.

Definizione dei carichi e dei profili elettrici e valutazione dei guadagni interni relativi a persone, luci e apparecchiature nel modello dell'edificio

La piattaforma ODESSE permette la progettazione di alcune configurazioni d'impianto-tipo rappresentative della messa a sistema degli edifici, con le relative domande energetiche, e dei sistemi di generazione e distribuzione dell'energia. I diversi componenti di impianto devono essere in grado di soddisfare le domande di:

- elettricità (valori derivanti dai profili di uso e gestione degli edifici, con particolare riferimento all'impiego di luci e apparecchiature; vedere paragrafo successivo);
- riscaldamento (valori derivanti dalla simulazione del comportamento energetico degli edifici);
- raffrescamento (valori derivanti dalla simulazione del comportamento energetico degli edifici);
- acqua calda sanitaria (valutazioni statistiche effettuate da Enea conformi alla normativa).

Le domande elettriche contribuiscono, nell'ambito delle simulazioni energetiche, alla determinazione dei guadagni interni che hanno effetto su *heating* e *cooling* e, nell'ambito delle configurazioni energetiche di distretto, alla definizione dei profili di domanda che dovranno essere supportati dagli impianti di generazione simulati e/o da microreti elettriche ulteriori e/o dalla rete elettrica nazionale.

La definizione dei profili di carico elettrico per gli edifici residenziali e terziari ha comportato una lunga fase di ricerca dettata principalmente dalla difficoltà di definire, in maniera sufficientemente affidabile e generale, l'energia oraria richiesta per unità di superficie. È noto infatti che i profili di domanda elettrica possono essere molto differenti per numerosi fattori che dipendono dalle caratteristiche dell'edificio, dalle attività ivi previste, dal numero di occupanti, dalle modalità di gestione e dalle caratteristiche qualitative e quantitative delle luci e delle apparecchiature presenti. I dati sono stati elaborati in termini di profili orari, considerando per le apparecchiature:

- i valori di potenza elettrica installata, che può essere minima, massima o media in funzione della tipologia/efficienza degli elementi presenti nel locale;
- il profilo medio orario giornaliero;
- il fattore di simultaneità che può essere specifico per ogni mese o espresso come media annuale e che prende in conto gli eventuali periodi di vacanza distribuiti nel corso dell'anno;

mentre per l'illuminazione artificiale si sono considerati:

- i valori di potenza elettrica installata massima, che corrisponde all'uso di lampade standard (utilizzate nella pratica diffusa) per coprire il fabbisogno di illuminamento, e minima, calcolata sulla base delle caratteristiche di lampade ad alta efficienza;
- il numero di ore di funzionamento giornaliere;
- un fattore di correzione legato al daylighting; vengono suggeriti un valore standard, che corrisponde alle condizioni tipiche della pratica diffusa, e un valore ottimizzato, che presuppone una progettazione finalizzata alla valorizzazione della componente naturale per l'illuminazione.

Sulla base delle elaborazioni condotte, delle simulazioni in precedenza eseguite ai fini dell'analisi del comportamento energetico complessivo degli edifici e degli obiettivi complessivi del lavoro, si è scelto di assumere il profilo medio in riferimento all'edificio B (Tabella 35), presumibilmente occupato da appartamenti, e il profilo minimo in riferimento all'edificio A (Tabella 34), che potrebbe rappresentare un'abitazione mono o bifamiliare con unità residenziali di superficie superiore, e quindi caratterizzate da una densità di domanda elettrica inferiore.

Tabella 34. Caratteristiche complessive del profilo elettrico selezionato per l'edificio A

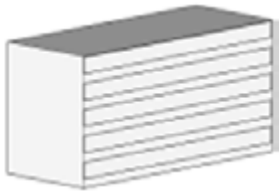
	EDIFICIO A	Luci	Apparecchiature	TOTALE
	Potenza installata [W/m^2]	6,95	3,81	10,76
	Consumo annuo [kWh/m^2]	18,10	9,74	27,84

Tabella 35. Caratteristiche complessive del profilo elettrico selezionato per l'edificio B

	EDIFICIO B	Luci	Apparecchiature	TOTALE
	Potenza installata [W/m^2]	10,20	5,50	15,71
	Consumo annuo [kWh/m^2]	37,73	14,53	52,26

Nel caso degli edifici a destinazione d'uso terziario (uffici), si è seguita una procedura del tutto analoga. I dati di consumo elettrico per illuminazione e apparecchiature d'ufficio derivate dal progetto El-Tertiary (2008) si attestano ad un valore che si avvicina a quello massimo previsto dalla SIA 2024 (2006), che può essere perciò preso come riferimento per l'edificio C (Tabella 36).

Tabella 36. Caratteristiche complessive del profilo elettrico selezionato per l'edificio C

	EDIFICIO C	Luci	Apparecchiature	TOTALE
	Potenza installata [W/m^2]	15,90	15,00	30,90
	Consumo annuo [kWh/m^2]	31,50	15,21	46,71

In modo simile a quanto fatto per gli edifici a destinazione d'uso residenziale, anche per gli edifici del terziario è stato verificato il contributo termico legato alla presenza di occupanti e all'impiego di luci e apparecchiature, mettendo a confronto la procedura suggerita dal quaderno tecnico 2024 e quella della UNI TS 11300-1.
Concludendo, sulla base delle elaborazioni condotte, delle simulazioni precedentemente effettuate ai fini dell'analisi del comportamento energetico complessivo degli edifici e degli obiettivi complessivi del lavoro, si è optato di assumere il profilo massimo definito sulla base del quaderno tecnico SIA 2024 in riferimento all'edificio C

a destinazione d'uso terziaria.

Modello in ambiente Simulink

E' stato realizzato il modello in ambiente Simulink della configurazione d'impianto composta da generatore dati climatici (NWG) + edificio + caldaie di back-up (riscaldamento e ACS) + collettore solare termico ("flat plate" o "evacuated tube") + sistema fotovoltaico + accumuli termici + pompa di calore (2 modelli, per funzionamento invernale ed estivo) + sistemi di controllo + collegamento a curve di domanda di elettricità, acqua calda sanitaria, riscaldamento e condizionamento è stata implementata in ambiente Simulink.

Tale lavoro ha implicato l'analisi dei moduli relativi ai diversi componenti di impianto, la loro verifica e messa a sistema, e lo sviluppo dei moduli del controllo, mirato al mantenimento delle temperature di target degli accumuli e alla minimizzazione dei consumi di energia primaria. Il controllo seleziona, a seconda delle condizioni operative, gli impianti che garantiscano la migliore efficienza energetica. E' diviso in due fasi, "in", per valutare la domanda e decidere conseguentemente l'attivazione degli impianti, "out" per valutare le prestazioni degli impianti così attivati, e confermarne o annullarne quindi l'attivazione. Ad esempio, sulla base delle temperature degli accumuli si può decidere che i collettori siano attivati per produrre ACS, quindi lavoreranno sui livelli di temperatura previsti per l'ACS. Ciò comporta una certa efficienza dei collettori, che dipende dalla radiazione disponibile e dalle temperature (ambiente e del fluido). Il controllo "out" valuta se tale efficienza sia sufficiente a giustificare l'attivazione dei collettori. E' implementata una logica a relè per limitare i cicli di on/off degli impianti. La funzione dei diversi elementi è riportata nella Tabella 37.

Tabella 37. Configurazione Simulink implementata

Elemento	***Funzione prioritaria***	***Funzione secondaria***
Edificio	Calcolo del carico termico ed elettrico per gli impianti	
NWG (weather generator)	Fornisce i dati di radiazione e temperatura ambiente per il calcolo dei carichi e delle prestazioni degli impianti	
Caldaia	Riscaldamento ambienti	
Caldaia ACS	Produzione ACS	
Collettore solare termico	Produzione ACS	Riscaldamento ambienti
Sistema fotovoltaico	Generazione elettricità	
Accumulo termico	Accumulo termico per riscaldamento/condizionamento ambienti	
Accumulo ACS	Accumulo termico ACS	
Pompa di calore, funzion. invernale	Riscaldamento ambienti	Produzione ACS
Pompa di calore, funzion. estivo	Condizionamento ambienti	
Controllo "in"	Valutazione domanda e relativa attivazione degli impianti	
Controllo "out"	Valutazione delle performance dei componenti attivati dal controllo "in", e relativo secondo livello di attivazione	

Attività di assessment sul modello di simulazione dell'edificio

Il modello che simula il comportamento dell'edificio è rimasto inalterato. Sono state apportate delle modifiche nel calcolo di alcuni parametri fondamentali che hanno affinato il calcolo del bilancio energetico e dell'andamento della temperatura interna. In particolare le modifiche riguardano la determinazione delle resistenze dell'aria, della capacità termica dell'involucro, l'introduzione di un algoritmo per la simulazione dell'ombreggiamento e l'introduzione dei profili di utilizzo.

Resistenze dell'aria

Il modello matematico dell'edificio calcola la dispersione di calore tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno in funzione della trasmittanza termica di ciascuna chiusura opaca e trasparente e della temperatura esterna. Nella determinazione dei valori della trasmittanza termica dell'involucro, calcolata secondo la norma UNI EN ISO 6946, sono state fatte delle considerazioni e apportate delle modifiche relativamente all'introduzione dei valori delle resistenze termiche superficiali e di intercapedini d'aria rispetto ai valori dei coefficienti di scambio termico *hi* e *he* precedentemente considerati costanti indipendentemente dalla direzione del flusso termico.

Per quanto riguarda le *resistenze termiche superficiali* (liminari) si è tenuto conto degli scambi di calore per convezione e per irraggiamento che avvengono tra la superficie e l'aria interna (Rsi) e la superficie e l'aria esterna (Rse) e che dipendono essenzialmente dal grado di esposizione e dalla qualità delle superfici, a seconda della direzione del flusso di calore (ascendente, orizzontale o discendente).

Le *resistenze termiche delle intercapedini d'aria*, anch'esse dipendenti da scambi termici per irraggiamento e convezione, sono determinate a seconda dello spessore e della direzione del flusso del calore; secondo quanto previsto dalla norma si distinguono tre casi: 1) intercapedini d'aria non ventilate; 2) intercapedini d'aria debolmente ventilate; 3) intercapedini d'aria fortemente ventilate.

Capacità termica dell'involucro

La capacità termica nella precedente versione era calcolata solo per gli strati dell'involucro compresi fra l'isolante e la parete interna, mediante la relazione fornita dalla UNI 10379 (appendice H); tale approccio è stato abbandonato perché prevede una metodologia di individuazione dello strato a partire dal quale effettuare il calcolo di non semplice implementazione software; si è deciso, quindi, di implementare il procedimento descritto dalla norma UNI EN ISO 13786, che seppure oneroso dal punto di vista computazionale, consente un calcolo più preciso e più vicino con il carattere non stazionario di ODESSE. Infatti la suddetta norma introduce metodi per il calcolo del comportamento termico in regime dinamico dei componenti edilizi e, fra questi, definisce la capacità termica areica interna ed esterna; nel preprocessore di ODESSE è stata, quindi, definita come capacità termica, la somma delle due componenti areiche interna ed esterna.

Ombreggiamento

Nel calcolo del bilancio termico di un edificio è necessario conoscere bene i fattori che influenzano l'equilibrio termico dell'ambiente; è quindi importante tenere conto delle ombre generate su un edificio da altri edifici, o da parti dell'edificio stesso.

L'algoritmo considerato permette di calcolare i profili delle ombre proiettate da edifici di forma parallelepipeda su superfici piane orizzontali o verticali. I dati di ingresso necessari alla elaborazione del calcolo sono in gran parte quelli già forniti tramite interfaccia per la determinazione delle caratteristiche dell'edificio: sito geografico, dimensione e orientamento dell'edificio. Poiché la posizione del sole in una data località (latitudine) è nota in funzione del tempo (ora e giorno), è possibile definire un algoritmo che confronti tale posizione con le proiezioni rappresentate da altri edifici, e da parti dell'edificio, e porti così a definire i contorni delle zone d'ombra sulle facciate, o su parti di esse, dell'edificio in esame.

In tal modo si possono valutare ombre risultanti dalla sovrapposizione di ombre proiettate da geriche ostruzioni e le condizioni di comfort interno, in funzione delle caratteristiche dell'edificio stesso, delle condizioni climatiche e del grado di esposizione alla radiazione solare dell'involucro dell'edificio. Inoltre, possono essere stimate le ombre proiettate sulle diverse facciate di un edificio, o su parti di esse, ora per ora, e in ogni giorno dell'anno.

Profili di utilizzo

Per rendere più reale la simulazione, è stata introdotta in ODESSE la possibilità di inserire profili di carico orari, differenziati per giorni lavorativi, sabato e domenica/festività mediante l'interfaccia riportata di seguito; in particolare tale possibilità riguarda il carico termico generato dagli occupanti, dalle luci artificiali e dalle apparecchiature elettriche. Analogamente, con un'interfaccia simile è possibile inserire un profilo orario di ricambio d'aria per la ventilazione e l'infiltrazione.

Lay-out impiantistici

Nel presente capitolo è descritta l'attività di costruzione di lay-out d'impianto caratterizzati da mix energetici complessi e soluzioni tecnologicamente avanzate a servizio delle utenze termiche ed elettriche dell'edificio simulato. In particolare dopo aver definito le soluzione impiantistiche che l'utente potrà simulare all'interno della piattaforma ODESSE, sono stati integrati i modelli matematici dei singoli componenti, sviluppati nelle precedenti annualità, necessari a riprodurre le prestazioni energetiche del sistema edificio – impianto su scala oraria, mensile e annuale nelle condizioni più prossime a quelle reali. In particolare i lay-out di impianto sviluppati sono:

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

E' stata mantenuta anche una configurazione in cui è possibile simulare il solo edificio senza impianti per valutarne il fabbisogno energetico da richiedere all'impianto. La costruzione dei singoli lay-out impiantistici è stata effettuata

seguendo un obbiettivo comune: minimizzare la richiesta di dati quantitativi in input senza tuttavia rinunciare all'accuratezza del risultato. Per tale motivo alcuni parametri impiantistici secondari sono invisibili all'utente e fissati in valore costante o determinati tramite apposito algoritmo all'interno dell'ambiente di sviluppo. Inoltre ciascun lay-out preconfigurato è anche gestito da un proprio sistema di controllo, che ne determina l'accensione, lo spegnimento e la regolazione dei principali componenti di impianto seguendo le logiche che normalmente caratterizzano gli impianti reali.
ODESSE si candida ad essere non solo un software per la valutazione rapida di mix energetici innovativi, ma anche uno strumento di divulgazione tecnica di soluzioni impiantistiche che non trovano ancora nel mercato un referente unico per la commercializzazione e che necessitano quindi di una figura capace di metterle a sistema (es. il solar cooling, il DEC sia in configurazione solare sia in configurazione ibrida, sistemi trigenerativi. ecc). Nei seguenti paragrafi è descritta sinteticamente l'implementazione dei singoli lay-out di impianto all'interno della piattaforma di simulazione.

Impianto di distribuzione dell'energia termica e frigorifera

Ciascun lay-out impiantistico implementato in ODESSE mantiene le condizioni di comfort termico all'interno dell'edificio tramite un proprio impianto di distribuzione del calore e dell'energia frigorifera la cui implementazione in Simulink è stata effettuata utilizzando sia modelli già sviluppati e validati nel corso delle precedenti annualità (accumulo termico) sia nuovi modelli disponibili nelle librerie del toolbox Simbad (fancoil, radiatore, ventilatore).

La regolazione della potenza erogata dai terminali è affidata a un controllo a relè, implementato nel blocco "termostato", il quale provvede ad azionare la pompa di circolazione dei radiatori o la ventola del fancoil quando la temperatura interna dell'edificio scende sotto il valore di riferimento (20 °C in inverno). In tal modo il terminale inizia a erogare potenza termica all'edificio con una efficienza che dipende dalla temperatura e portata dell'aria ambiente e dalla temperatura dell'acqua di ingresso coincidente con la temperatura istantanea dell'accumulo termico. La totale potenza termica trasferita all'ambiente è data dal numero complessivo di fancoil presenti all'interno dell'edificio indicato nell'interfaccia utente.

L'accumulo termico è mantenuto alla temperatura di riferimento dall'impianto scelto dall'utente (caldaia, cogeneratore, pompa di calore…); se quest'ultimo risulta essere sottodimensionato rispetto alla potenza erogata istantaneamente dai terminali (fancoil, radiatori), la temperatura dell'acqua all'interno del accumulo si abbassa con la conseguente perdita di efficienza del sistema di emissione e la riduzione di temperatura all'interno dell'edificio rispetto alle condizioni di comfort termico.

In Figura 124 si è riportata l'interfaccia utente utilizzata per selezionare e configurare il tipo di terminale del sistema di distribuzione. I parametri richiesti per ciascuna tipologia sono facilmente reperibili nelle schede tecniche fornite dai costruttori.

Figura 124. ODESSE interfaccia utente sistema di distribuzione

Lay-out tradizionale

Il lay-out tradizionale prevede l'utilizzo di tecnologie consolidate e diffuse sul mercato per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio. L'utente, da apposita interfaccia software, potrà scegliere se utilizzare la sola pompa di calore per la climatizzazione invernale e estiva o utilizzare la caldaia a gas come generatore di calore invernale o come backup (Figura 125).

Figura 125. ODESSE interfaccia utente lay-out tradizionale

La temperatura di riferimento a cui far lavorare l'accumulo termico dipende, come descritto in dettaglio nel report esteso, dalla scelta del sistema di distribuzione ed emissione (radiatori, fancoil) rappresentante il punto di connessione tra il modello matematico dell'edificio e il lay-out di impianto.

Particolare attenzione è stata data allo sviluppo di un modello semplificato di pompa di calore elettrica (tipo aria–acqua e acqua-acqua) capace di valutare, con la sola definizione dei dati di targa, le prestazioni orarie al variare delle condizioni al contorno e in qualsiasi condizione di carico reale. In particolare, obbiettivo dello studio è stato la definizione di "matrici di correzione" delle prestazioni nominali della pompa di calore (Potenza termica, COP, EER) operante in condizioni di off design.

Lay-out trigenerativo

La scelta del lay-out "trigenerativo" consente di simulare il comportamento orario e stagionale di un impianto di co-trigenerazione di piccola taglia a servizio di una utenza reale (edificio) e connesso in parallelo con la rete elettrica. L'utente, da apposita interfaccia, potrà personalizzare la configurazione impiantistica scegliendo e dimensionando, in maniera del tutto intuitiva, i principali componenti che caratterizzano il sistema (Figura 126).

Figura 126. ODESSE interfaccia utente lay-out trigenerativo

Lo sviluppo del sistema di controllo ad alto livello gestisce l'accensione del motore e dell'assorbitore in funzione della stagionalità (inverno, estate) oltre a regolare le temperature di target degli accumuli termici.

Lay-out Desiccant Cooling (DEC)

ODESSE consente di simulare complesse tecnologie per il trattamento dell'aria e la climatizzazione degli edifici come il sistema Desiccant Cooling basato sull'utilizzo di un rotore adsorbente capace di deumidificare adiabaticamente l'aria esterna da trattare grazie alla sua struttura a nido d'ape contenete gel di silicio.

Integrazione dell'interfaccia utente del solar DEC all'interno della piattaforma ODESSE

Allo scopo di consentire la valutazione dei risultati da parte dell'utente e definire univocamente il contenuto dei vettori di dati input-output dei diversi sottomodelli di ODESSE, si è proceduto alla scelta delle variabili più significative relative al funzionamento dell'impianto.

Per ciò che concerne l'utilizzo da parte dell'utente di tali informazioni, tramite apposite funzioni implementate nell'interfaccia, esso potrà scegliere di generare alcuni grafici con cadenza oraria o, tramite dei formati predefiniti di report, effettuare valutazioni integrate su base mensile o stagionale. Attraverso l'interfaccia l'utente ha la possibilità di selezionare diverse configurazioni di impianto. In funzione della scelta effettuata dall'utente,

l'algoritmo genera un vettore di configurazione che la descrive. Per ciascuna di esse si è proceduto ad un aggiornamento delle strategie di controllo.

Calcolo potenze elettriche

Ai fini dell'analisi energetica del funzionamento dell'impianto rivestono particolare importanza gli assorbimenti elettrici da parte dei componenti (ventilatori, chiller, pompe, etc) sia a livello istantaneo che con integrazione in determinati periodi di tempo. Il calcolo delle potenze dei ventilatori è effettuato considerando:

1. La prevalenza dei componenti presenti;
2. La portata che interessa il componente;
3. L'efficienza idraulica;
4. L'efficienza elettromeccanica.

Diagramma di Mollier in tempo reale

Il simulatore incorpora un blocco simulink *mplot* il quale genera un grafico che riporta, in tempo reale, la posizione dei punti del trattamento in un piano temperatura-umidità assoluta. Tale grafico ha principalmente una funzione di controllo/debug, ma può essere particolarmente utile all'utente più esperto per comprendere il funzionamento dell'impianto durante la simulazione. L'interfaccia utente prevede infatti la possibilità di visualizzare il diagramma a scelta dell'utente.

Manuale utente sull'utilizzo del software

Il manuale utente sull'utilizzo del software, integrato con un'appendice contenente informazioni tecniche dei principali componenti che costituiscono il Solar DEC è stato aggiornato rispetto alla precedente versione; contiene una descrizione dell'interfaccia grafica, implementata in ambiente Java, progettata in modo che lo strumento possa essere utilizzato anche da utenti non esperti in ambito di simulazioni dinamiche. Sono anche descritte le configurazioni previste nel simulatore e le strategie di regolazione. Inoltre viene indicato all'utente come definire degli output "personalizzati" utilizzando grafici orari e report predefiniti su base mensile/stagionale.

Layout sperimentale e validazione del modello

Allo scopo di validare l'algoritmo che simula la configurazione impiantistica monitorata presso il DE (Figura 127), si è prodotto un file contenente i dati climatici registrati in un mese di monitoraggio (Luglio 2008) ed i dati relativi alle condizioni di immissione dell'aria registratati. Scopo della validazione è stato di indagare, a parità di condizioni di ingresso e uscita dell'UTA la capacità del modello di valutare correttamente i consumi dei vettori energetici utilizzati.

Per la validazione si è proceduto imponendo in input al modello le stesse condizioni climatiche (temperatura dell'aria, umidità e irraggiamento) e le stesse condizioni di immissione dell'aria registrate nel monitoraggio dell'impianto DEC citato. In tal modo è stato possibile valutare la precisione di ogni singolo componente dell'UTA ed infine della logica di regolazione.

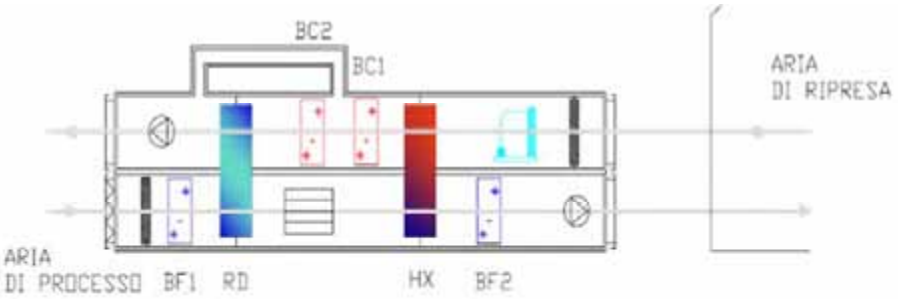


Figura 127. Unità "desiccant cooling" installata presso il DE

Il sistema è costituito da un'unità di trattamento aria desiccant cooling alimentata da collettori solari a liquido accoppiata ad un sistema a soffitto radiante. Il ciclo è di tipo ibrido ovvero il sistema è provvisto di due batterie di raffreddamento ausiliarie impiegate nei momenti di bassa radiazione solare e/o quando l'umidità assoluta dell'aria supera una certa soglia. La prima, posta a monte del rotore adsorbente, viene impiegata per predeumidificare e preraffreddare l'aria prima dell'ingresso dell'aria esterna nell'UTA; la seconda batteria controlla la temperatura dell'aria in caso che il raffreddamento evaporativo (*indirect evaporative cooling*) non sia sufficiente a raggiungere la temperatura di immissione desiderata.

La configurazione impiantistica considerata è denominata "*a pompa di calore integrata*", prevedendo infatti il recupero del calore di condensazione della macchina frigorifera ausiliaria al fine di preriscaldare l'aria di rigenerazione. Per il mese selezionato i dati climatici sono sinteticamente riportati in Figura 128.

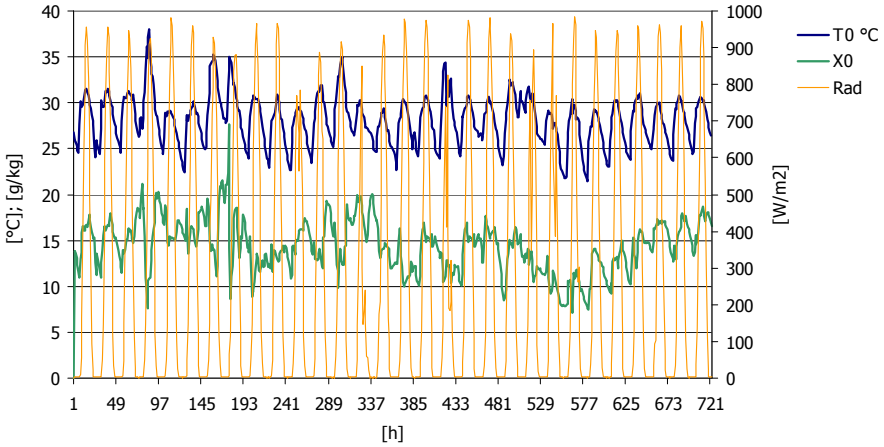


Figura 128. Dati climatici di input introdotti nel modello

Per ciò che concerne gli assorbimenti elettrici, il modello tiene conto del consumo dovuto ai ventilatori e degli altri accessori di impianto (pompa umidificatore e motori dei rotori) e del refrigeratore d'acqua utilizzato per l'alimentazione delle batterie fredde. Non è considerato invece nel bilancio dei consumi elettrici e nel calcolo del COP elettrico del sistema, quello dovuto ai circolatori presenti nei circuiti idraulici (solare, caldaia a gas e refrigeratore). Il modello ricalca molto bene il profilo di temperatura in uscita dalla macchina, dimostrando una elevata precisione della logica di regolazione implementata. Si fa notare che, a causa dell'impossibilità del modello di tenere conto dei fenomeni di infiltrazione rilevati nell'impianto, le produzioni frigorifere globali del sistema simulato e di quello monitoraggio differiscono di circa 20%. Per una maggiore precisione, nel modello potrebbe essere introdotto in futuro un calcolo della portata d'aria che trafila attraverso lo scambiatore di calore rotativo e del relativo bilancio entalpico del sistema.

I consumi elettrici registrati nell'intero mese sono molto simili fra di loro: 1225 kWh nel caso del monitoraggio contro i 1236 kWh della simulazione; ovviamente ciò si ripercuote sul calcolo dei COP medi mensile, che sono i seguenti: COP simulato = 3,13; COP monitorato = 2,64. Si può quindi notare che sebbene il ciclo DEC reale sia meno efficiente di quello simulato, il modello è in grado di garantire le medesime condizioni di immissione su base oraria e di stimare con molta accuratezza i consumi elettrici.

Integrazione del modello desiccant cooling con un motore a combustione interna in assetto cogenerativo per la rigenerazione con calore dei fumi di scarico

L'energia termica necessaria alla rigenerazione del ciclo DEC può essere fornita utilizzando il calore prodotto da un impianto cogenerativo. Alcune installazioni (tra cui due in Italia) funzionanti secondo questo principio hanno dimostrato la fattibilità della soluzione. Le problematiche principali sono relative alla logica di funzionamento del sistema in relazione alla disponibilità di calore nel caso che il cogeneratore sia progettato per inseguire il carico elettrico. Inoltre, l'accoppiamento con macchine che operino l'inseguimento del carico termico invernale garantisce la possibilità di utilizzazione della stessa anche in estate, eventualmente operanti anche in modalità generazione elettrica, utilizzando anche parzialmente il calore di scarto.

La disponibilità di un modello di simulazione dinamico, insieme all'analisi dei dati di monitoraggio di impianti attualmente funzionanti, è certamente una circostanza utile per operare valutazioni tecnico-economiche più approfondite includendo anche la possibilità di operare confronti con sistemi accoppiati ad impianti solari. Si è quindi studiata la connessione del modello DEC con quello di un cogeneratore.

L'integrazione con l'impianto prevede l'interfacciamento con la batteria calda BC1 che è prevista nell'impianto DEC per portare l'aria di ripresa alla temperatura idonea alla rigenerazione della ruota. In particolare, la batteria BC1 viene alimentata alla temperatura T_Tank il cui andamento in un tipico periodo di funzionamento, dopo un transitorio dovuto alla messa a regime del sistema può avere un valore teorico vicino alla temperatura di uscita dello scambiatore con i fumi. L'ingresso Qload del blocco "Accumulo" va alimentato dalla potenza termica richiesta dalla batteria BC1 per effettuare il trattamento richiesto. Ovviamente, per il calcolo delle dispersioni, occorre alimentare l'ingresso Temperatura ambiente.

Per quanto concerne la regolazione, è previsto l'inseguimento termico o elettrico., mentre per l'inseguimento termico, l'obiettivo è quello di mantenere stabile la temperatura del tank attorno ad un valore di set-point stabilito.

A titolo di esempio, in Figura 129 è riportato un tipico andamento della temperatura del tank, dove è possibile notare il primo tratto a pendenza maggiore dovuto alla integrazione della caldaia, un secondo tratto a pendenza inferiore in cui vi è il solo apporto del recupero ed il tratto in cui inizia la regolazione a isteresi con comando sulla manetta e strategia di inseguimento termico.

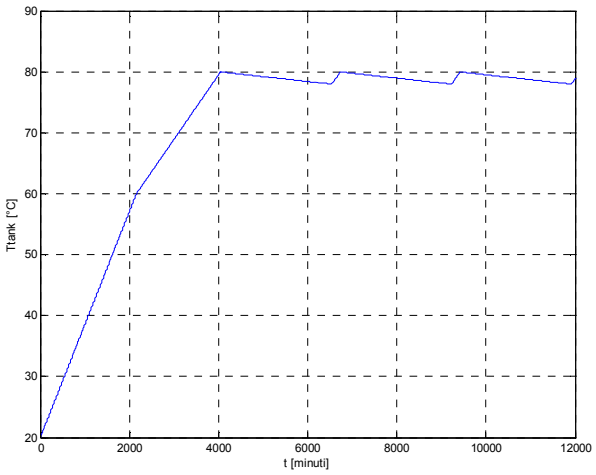


Figura 129. Andamento della temperatura del tank dell'impianto cogeneratore

L'interfaccia utente consente di operare la scelta del cogeneratore come sorgente termica per la rigenerazione del ciclo DEC. Il modello può essere validato mediante il confronto con dati di monitoraggio eventualmente messi a disposizione dai gestori degli impianti operanti.

Il modello DEC svolge le funzionalità di un sistema "tutt'aria" per l'edificio, climatizzando l'ambiente e mantenendo le condizioni di riferimento dell'aria immessa in funzione :

- della temperatura e della produzione oraria di vapore acqueo all'interno dell'edificio (secondo la UNI EN ISO 7730) determinata in relazione al tipo di attività svolte e alla variabilità del profilo di occupazione nel tempo secondo lo schedule orario/settimanale associato all'interfaccia utente.
- delle caratteristiche termo igrometriche dell'aria esterna che vengono fornite tramite un vettore orario in cui la componente relativa alla temperatura è generata dal modello NWG (Report RSE/2009/188) in funzione della località scelta dall'utente mentre la componente umidità è generata dall'anno climatico tipo della località più vicina presente nel data base climatico di ODESSE.

Il tool, tramite un'apposita interfaccia utente, rappresenta uno strumento per la progettazione e il dimensionamento di sistemi DEC in ambiente ODESSE; l'utente, infatti, tramite l'interfaccia di seguito indicata, potrà, in maniera del tutto intuitiva, scegliere la configurazione impiantistica del sistema DEC tra cinque soluzioni possibili e programmarne lo schedule di funzionamento settimanale (Figura 130).

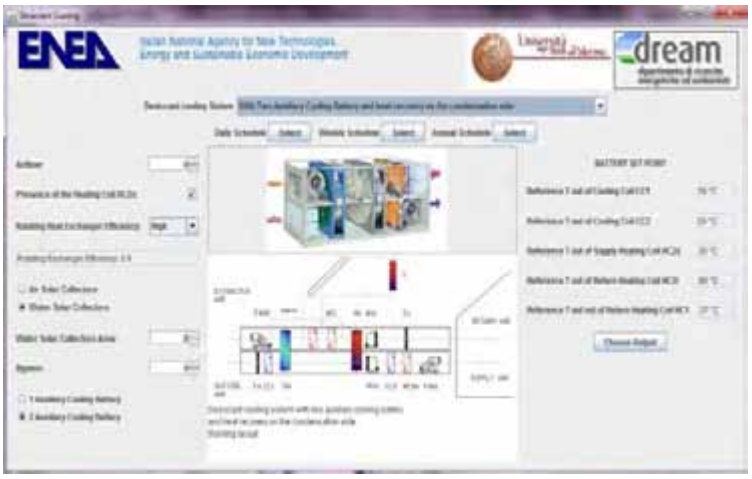


Figura 130. Interfaccia utente sistema DEC

Lay-out ibrido

Con la costruzione in ODESSE di un lay-out ibrido si vuole dare all'utente la possibilità di progettare sistemi impiantistici tradizionali integrati dall'apporto energetico derivato da fonte rinnovabile per la produzione di ACS e la climatizzazione degli ambienti.

Partendo dall'analisi e validazione dei modelli sviluppati nel corso dell'annualità corrente e in quelle precedenti, è stata definita una reale configurazione impiantistica (indicata di seguito) con i relativi collegamenti per la messa a sistema dei componenti sopra indicati e la loro integrazione con la piattaforma di Simulazione ODESSE.

In Figura 131 è presente l'immagine dell'interfaccia utente per il lay-out ibrido implementata in ODESSE, con la quale è possibile dimensionare i singoli componenti che costituiscono la configurazione impiantistica inserendo esclusivamente i dati di targa reperibili facilmente dalle schede tecniche fornite dai costruttori.

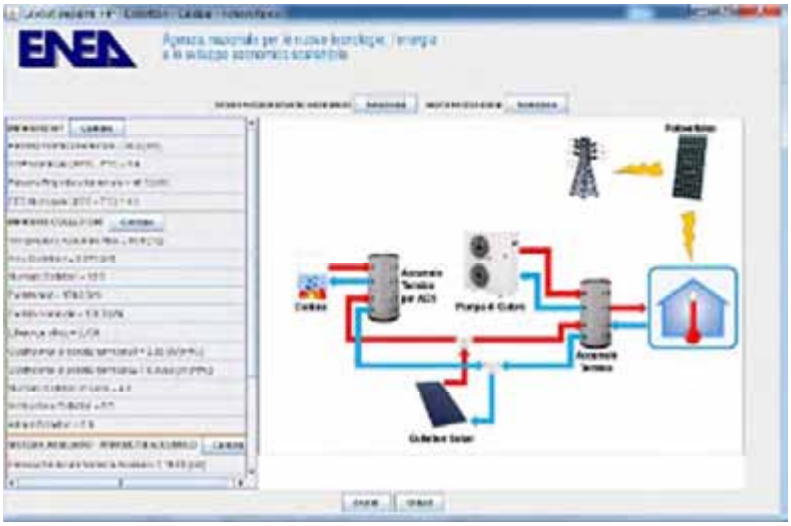


Figura 131. ODESSE: interfaccia utente lay-out ibrido

Il sistema di controllo che gestisce il lay-out di impianto svolge una doppia funzione: azionare gli impianti necessari al mantenimento del comfort termico degli ambienti in funzione della stagione e della richiesta termica da parte dell'utenza, scegliere tra gli impianti disponibili, a seconda delle condizioni operative, gli impianti che garantiscano la migliore efficienza energetica.

Lay-out solar cooling

Il modello impiantistico che verrà descritto nel presente paragrafo è improntato su una delle configurazioni più diffuse degli impianti comunemente classificati come solar cooling. E' stato realizzato un modello matematico per la simulazione di un assorbitore a bromuro di litio di piccola taglia da collegare al modello del cogeneratore a combustione interna. Il modello, realizzato per mezzo del software Matlab Simulink, consente di prevedere la produzione di potenza frigorifera erogata dall'assorbitore, a fronte di una determinata temperatura di ingresso dell'acqua calda, delle condizioni ambiente, e della potenza termica nominale in ingresso all'assorbitore (derivante dal cogeneratore accoppiato all'assorbitore). Viene inoltre stimata la portata d'aria della torre evaporativa, sulla base di parametri progettuali tipici impiegati durante il dimensionamento di tali macchine. Allo scopo di creare una configurazione (cogeneratore-assorbitore) completa è stato necessario sviluppare alcune funzionalità aggiuntive al cogeneratore.

Sviluppo funzionalità aggiuntive al modello di cogeneratore con motore a combustione interna

Nel funzionamento ad inseguimento termico di un cogeneratore, può capitare che l'energia elettrica prodotta non venga istantaneamente completamente autoconsumata (il carico elettrico dell'utenza è inferiore alla potenza generata dal motore). In tal caso, il modello consente di calcolare l'energia elettrica prodotta in eccesso durante il periodo della simulazione, valorizzandola secondo le tariffe del ritiro dedicato del GSE, prezzi minimi garantiti.

Il modello calcola dapprima l'energia elettrica che viene prodotta e non istantaneamente autoconsumata durante il funzionamento in inseguimento termico, successivamente viene inviata al blocco "Calcoli economici" per la relativa valorizzazione. All'interno della sezione "Calcoli economici" è stato inserito il blocco che implementa il calcolo degli scaglioni di produzione e la relativa monetizzazione.

È stato implementato nel modello il calcolo del consumo di gas naturale in ingresso alla caldaia di integrazione e riserva, e la relativa valorizzazione economica. In Figura 132 è riportato il blocco "Caldaia" con il calcolo del

volume di gas consumato ($V_{gn,b}$). Tale valore entra quindi nel blocco "Calcoli economici", dove viene calcolato il relativo costo.

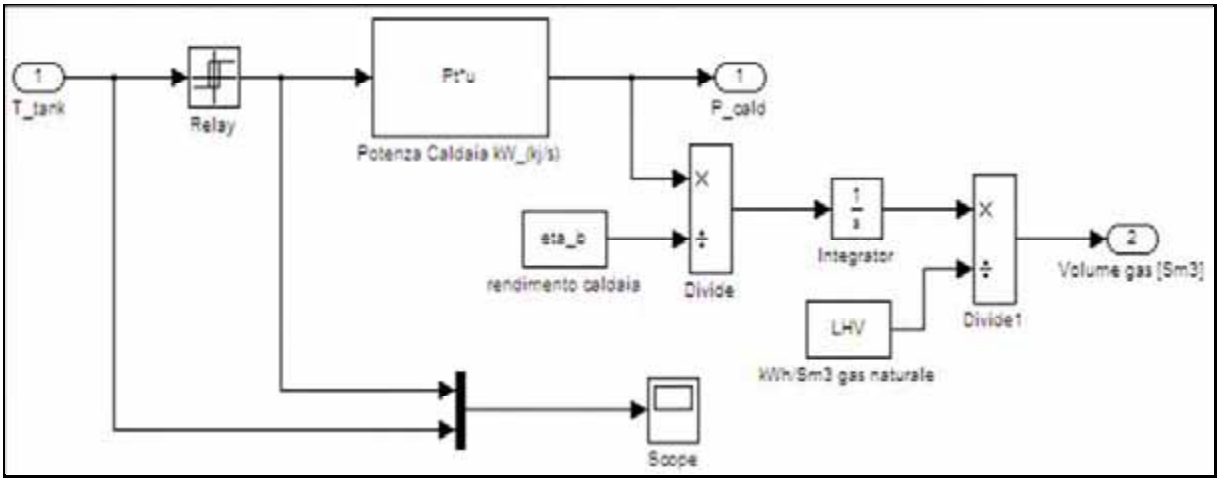


Figura 132. Blocco di calcolo del volume di gas bruciato in caldaia

Sviluppo di un modello in Matlab Simulink di assorbitore a LiBr e sua integrazione nel modello di cogenerazione

Il funzionamento della macchina è stato simulato per mezzo delle mappe sperimentali degli assorbitori Yazaki WFC-SC 10, 20 e 30. Ogni mappa riporta il valore della potenza frigorifera prodotta dalla macchina (P_c), e della relativa potenza termica assorbita (P_{th}), in funzione della temperatura dell'acqua calda in ingresso ($T_{in,hot}$ in ascissa). Le mappe sono inoltre parametrizzate in funzione della temperatura di raffreddamento dell'assorbitore (il raffreddamento avviene grazie all'acqua fornita da una torre evaporativa). Sono previste in particolare quattro temperature di acqua di torre (T_{tw}): 27; 29,5; 31; 32 °C. Per ogni mappa, il punto nominale di funzionamento indicato dal costruttore è quello in cui:

- $T_{in,hot}$ = 88,6 °C
- T_{tw} = 31 °C

Le mappe fornite dal produttore sono state adimensionalizzate in riferimento alle condizioni nominali di funzionamento indicate dal produttore stesso. Alcune curve sono riportate nella Figura 133.

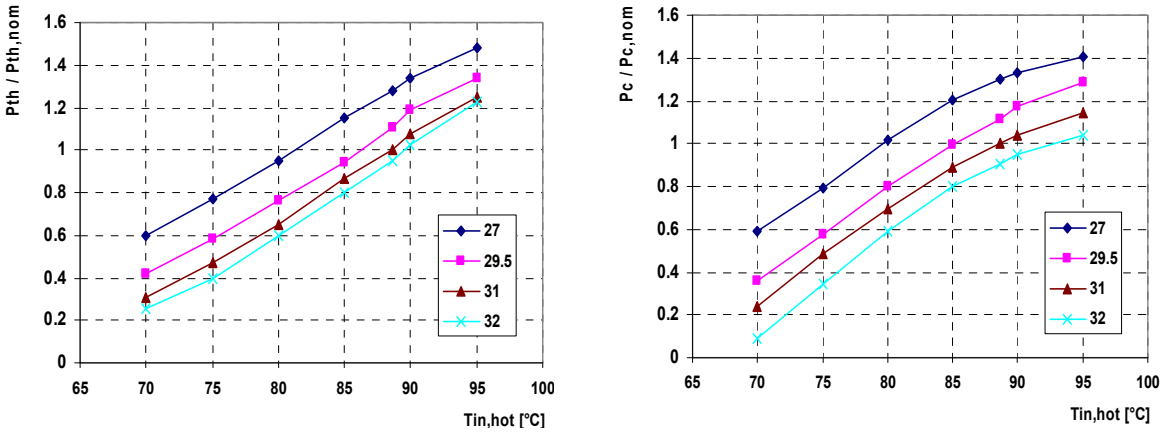


Figura 133. Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 10

Si è quindi costruita una mappa della potenza termica adimensionalizzata valida per tutte le taglie, parametrizzata in funzione della temperatura dell'acqua di torre, e al variare della temperatura dell'acqua calda in ingresso.

Analogamente, dal rapporto fra la potenza frigorifera prodotta e la potenza termica assorbita, per ogni macchina è stato calcolato il COP per ogni temperatura di acqua in ingresso, e per ogni temperatura di acqua di torre. E' stato poi calcolato un COP medio, valido per ogni macchina e per ogni temperatura acqua di torre, in funzione della sola temperatura acqua calda in ingresso all'assorbitore. I risultati sono riportati in Figura 134.

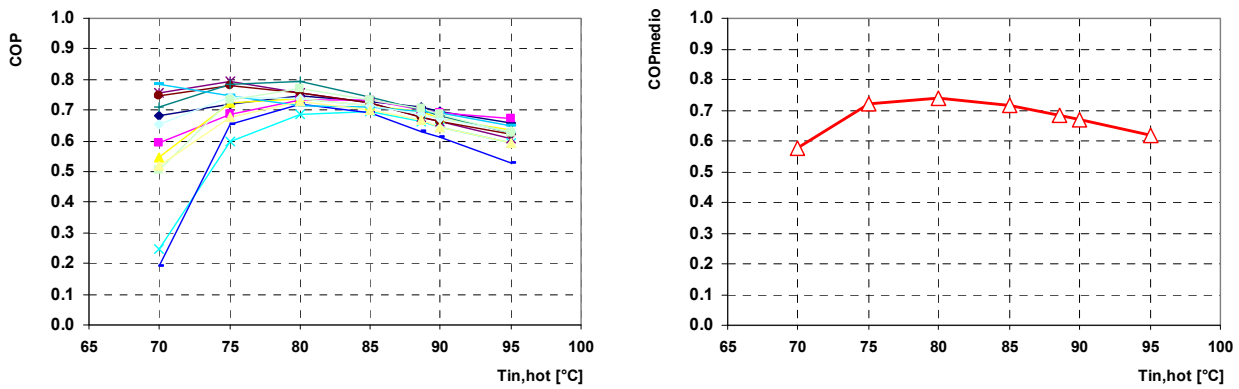


Figura 134. COP medio per ogni taglia di macchina e per ogni temperatura di acqua di torre (curva in rosso)

Il modello simula la presenza dell'assorbitore a bromuro di litio e di una torre evaporativa il cui scopo è quello di smaltire la potenza termica generata dall'assorbitore stesso. Sono presenti i seguenti input e output.

Input:

- Temperatura a bulbo secco dell'aria esterna ($T_{db,amb}$);
- Umidità relativa dell'aria esterna (RH);
- Pressione ambiente (p_{amb});
- Temperatura acqua calda in ingresso all'assorbitore ($T_{in,hot}$);
- Salto di temperatura ($\Delta T_{out,tw\ /\ db,amb}$) fra acqua in uscita dalla torre ($T_{out,tw}$) e temperatura a bulbo umido dell'aria esterna ($T_{wb,amb}$);
- Salto di temperatura ($\Delta T_{in,tw\ /\ out,tw}$) fra acqua in ingresso alla torre ($T_{in,tw}$) e acqua in uscita dalla torre ($T_{out,tw}$);
- Potenza termica nominale erogata all'assorbitore (che sarà quella recuperata dal modulo CHP).

Output:

- Temperatura a bulbo umido dell'aria esterna ($T_{wb,amb}$)
- Potenza frigorifera prodotta dall'assorbitore (Pc);
- Portata acqua del circuito di torre m_{tw};
- Portata aria torre evaporativa $m_{air,tw}$.

Integrazione con il modello CHP

Il modello di assorbitore a bromuro di litio è stato inserito all'interno del modello di cogeneratore già sviluppato all'interno della precedente annualità di ricerca di sistema, in modo da ottenere un impianto di trigenerazione. Rispetto al modello in assetto cogenerativo, sono state implementate le seguenti modifiche:

- è stato inserito il modello di assorbitore a bromuro di litio, comprensivo di torre evaporativa, come sopra descritto;
- la caldaia è stata sostituita da un chiller a compressione di backup e integrazione, atto a sopperire ad eventuali deficit di potenza frigorifera da parte dell'assorbitore;
- è stato inserito un accumulo di energia frigorifera sotto forma di acqua fredda a 7 °C, alimentato dall'assorbitore e dal chiller; l'accumulo "simula" inoltre la presenza di un carico frigorifero;
- è stato inserito l'inseguimento frigorifero, che viene realizzato mediante il mantenimento del set-point desiderato all'interno dell'accumulo;
- sono stati implementate le valutazioni economiche relative a:
  - ricavo dato dal mancato costo di acquisto dell'energia elettrica, per effetto della produzione di energia frigorifera con calore di scarto recuperato dal motore a combustione interna;
  - costo dato dall'impiego del chiller a compressione, alimentato ad energia elettrica.

La potenza termica recuperata dal motore a combustione interna e la temperatura di uscita dell'acqua dallo scambiatore acqua/fumi vengono impiegate come dati in ingresso all'assorbitore.

Come già accennato il modello di assorbitore necessita come dato di input della potenza termica nominale recuperata dal motore a combustione interna. Tale potenza viene poi limitata superiormente dalla potenza termica nominale con cui funziona l'assorbitore, calcolata come rapporto fra potenza frigorifera nominale, e COP nominale. In questo modo il modello non fornisce una potenza frigorifera superiore a quella massima nominale erogabile dall'assorbitore. Entrambi tali ultimi parametri vengono inseriti dall'utente nella maschera di configurazione dell'assorbitore. La potenza termica in eccesso viene calcolata, e considerata dispersa in ambiente.

Il modello matematico del chiller implementa la strategia di controllo dello stesso, con logica di tipo termostato. Un relè manda un segnale di off al chiller quando la temperatura dell'accumulo termico è inferiore alla temperatura di riferimento, T_{ref} impostabile dall'utente; il relè va in "on" solo quando la temperatura dell'accumulo termico sale al di sopra della soglia di temperatura massima, T_{max}, fissata anch'essa dall'utente. Grazie a questo modulo, il modello è in grado di sopperire agli eventuali deficit di potenza frigorifera cui l'assorbitore dovesse andare incontro, nel mantenimento della temperatura di set point dell'accumulo frigorifero.

Il modello matematico dell'accumulo termico è il componente di interfaccia tra il modello dell'edifico e quello del trigeneratore e del chiller. L'accumulo termico consente di valutare l'inerzia nel funzionamento dei sistemi di raffrescamento dell'edificio, in funzione del volume scelto e della coibentazione dello stesso. All'interno del modello sono stati implementati i calcoli relativi alla valutazione di:

- ricavo dato dal mancato costo di acquisto dell'energia elettrica, per effetto della produzione di energia frigorifera con calore di scarto;
- costo dato dall'impiego del chiller a compressione.

È stata inoltre predisposta una maschera per l'inserimento dei valori di costo di acquisto dell'energia elettrica, nelle tre fasce orarie AEEG. Per quanto concerne l'autoconsumo di energia elettrica, questo viene valorizzato al valore di mercato, al netto delle imposte, che devono essere comunque corrisposte agli enti. Le strategie di funzionamento possibili in assetto trigenerativo sono di seguito descritte:

- Inseguimento elettrico: il cogeneratore regola la potenza elettrica prodotta in modo tale da seguire un profilo assegnato dall'utente dall'esterno; la produzione termica, la produzione frigorifera, e la temperatura nell'accumulo, variano di conseguenza; il chiller interviene quando quest'ultima sale al di sopra del livello T_{max} definito dall'utente;
- Inseguimento frigorifero: il cogeneratore regola la potenza elettrica prodotta in modo tale che la potenza termica sia tale da generare, all'interno dell'assorbitore, una potenza frigorifera in grado di garantire la temperatura T_{ref} di set point all'interno dell'accumulo. La regolazione operata dal trigeneratore è di tipo "fine", esso cioè mantiene la temperatura dell'accumulo in un intervallo compreso fra la T_{ref} e una temperatura T_{on} superiore alla T_{ref}, selezionabile dall'utente, e minore della T_{max} .

Il modello di collettore solare è del tipo a tubi sotto vuoto e riceve i dati di ingresso dal generatore meteo denominato Neural Weather Generator; in uscita fornisce la temperatura della soluzione che circola in essi (Tout_cpc) e la potenza prodotta dal campo solare (Qcpc). Questa confluisce nell'accumulo caldo per riscaldare l'acqua in esso contenuto al valore richiesto dal sistema di emissione in inverno e dalla macchina ad assorbimento in estate. All'accumulo confluisce anche l'energia prodotta dalla caldaia (Qcald), che integra la produzione del campo solare durante la fase di riscaldamento e quella di raffrescamento nei periodi in cui il campo solare non consente all'acqua dell'accumulo di raggiungere i valori richiesti. Durante la fase invernale di riscaldamento, l'acqua dell'accumulo viene prelevata per alimentare il sistema di emissione, che può essere costituito da elementi radianti tradizionali (radiatori), ventilconvettori o pannelli radianti.

Nella fase di raffrescamento, l'accumulo ha la funzione di sorgente calda per la macchina ad assorbimento che è un modello a singolo effetto con soluzione H_2O–LiBr. Alla macchina è collegata anche una torre refrigerante evaporativa. L'acqua fredda prodotta per effetto frigorifero viene inviata ad un accumulo "freddo" che alimenta il sistema di emissione a ventilconvettori. È stata anche inserita nel modello di impianto una macchina frigorifera a compressione per integrare la richiesta frigorifera dell'edificio nel caso in cui la macchina ad assorbimento non sia in grado di produrla per intero. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di implementare un modello in grado di replicare le soluzioni impiantistiche realmente presenti nella realtà: infatti, anche se normalmente nella progettazione di nuovi impianti la macchina ad assorbimento è progettata per soddisfare interamente la richiesta frigorifera dell'edificio, nel caso in cui l'impianto di solar cooling va ad integrare un impianto esistente, può essere presente anche un gruppo frigo a compressione con funzione di integrazione. L'intero modello è gestito da un sistema di controllo che nella stagione di riscaldamento regola l'accensione della caldaia con la logica di massimizzare la produzione solare e in funzione del raggiungimento della temperatura massima dell'accumulo (funzione, come detto, della tipologia del sistema di emissione); nella stagione di raffrescamento la macchina ad assorbimento è regolata in funzione della temperatura dell'accumulo freddo e in base alla richiesta frigorifera dell'edificio viene comandata o meno l'accensione della macchina a compressione.

I parametri caratteristici del modello sono in parte selezionabili dall'utente (attraverso un'interfaccia che sarà realizzata in seguito in maniera analoga a quelle precedentemente descritte per gli altri modelli di impianti), in parte dipendono dalle scelte eseguite dall'utente stesso; per esempio, scelto il modello, il numero e le dimensioni del collettore solare, saranno fissati i parametri relativi agli angoli di correzione longitudinale e trasversale, le portate, etc.

Modello matematico per la simulazione oraria del funzionamento di un cogeneratore di piccola taglia alimentato da miscele di idrometano

E' stato realizzato un modello matematico per la simulazione oraria del funzionamento di un cogeneratore di piccola taglia alimentato da miscele di idrometano di composizione modulabile nel range 0%-10% in volume, l'integrazione con modello di funzionamento dell'assorbitore a bromuro di litio e la calibrazione del modello stesso tramite dati sperimentali.

Il modello, realizzato in ambiente Matlab Simulink, consente di prevedere le performance energetiche ed ambientali del cogeneratore, quando viene alimentato da combustibile non tradizionale, ossia da metano arricchito di idrogeno. In particolare, dato che il modello rappresentativo dell'architettura del motore è stato messo a disposizione da ENEA, nell'ambito della presente attività di ricerca, si è provveduto ad implementare un nuovo blocco di alimentazione del combustibile che potesse simulare il comportamento termodinamico di un motore a combustione interna alimentato da miscele di metano arricchito. Tale comportamento è stato desunto dall'analisi dei primi dati sperimentali rilevati sull'impianto dimostrativo installato presso il centro Sportivo Universitario di Tor di Quinto della Sapienza, ed è stato, poi, formalizzato attraverso relazioni matematiche implementate all'interno di un foglio di calcolo, che di fatto descrivono la termodinamica del Ciclo Otto, ed in particolare del ciclo limite delle temperature, sotto opportune ipotesi semplificative.

Nell'attività di calibrazione del modello sono state definite delle equazioni per correggere i valori forniti dal modello matematico, che nelle condizioni odierne di sviluppo, non tiene completamente conto di tutti gli effetti, derivanti dall'addizione di idrogeno, oggetto di indagine, effetti peraltro riscontrati e analizzati durante la campagna sperimentale preliminare ai fini del collaudo dell'impianto.

Modello del cogeneratore ad idrometano

Il modello del cogeneratore è caratterizzato dai seguenti parametri d'ingresso definiti dall'utente:

- $\%H_2$ in volume
- Indice d'aria $\lambda = \alpha/\alpha_{st}$
- Rendimento Meccanico Nominale del Motore
- Rendimento Elettrico del Generatore calettato sull'albero
- Potenza elettrica Nominale
- Rapporto di Compressione Volumetrico del Motore

e dalla potenza termica introdotta da combustibile che proviene dalla "manetta" del sistema di regolazione del motore. Come valori di output si ottengono:

- Potenza Elettrica erogata in condizioni di carico anche parziali.
- Temperatura dei fumi di scarico in corrispondenza dell'ingresso dello scambiatore di calore acqua-fumi, anch'essa in condizioni di carico sia nominale che parziale.

La combustione dell' idrometano produce effetti significativi sul comportamento termodinamico del motore, in particolar modo sul rendimento di conversione. Infatti il rendimento elettrico globale del cogeneratore può essere espresso attraverso il prodotto dei seguenti rendimenti:

$$\eta_{El.g} = \eta_{lim}\ \eta_{mecc}\ \eta_{vol}\ \eta_{Gen.\ El}$$

dove il primo termine indica il rendimento indicato del motore, ossia del ciclo limite, il secondo è il rendimento meccanico che tiene conto delle perdite di potenza dovute al trascinamento degli ausiliari; il terzo termine invece rappresenta il riempimento all'interno dei cilindri ed infine si ha il rendimento del generatore elettrico montato sull'albero motore.

La sostituzione del combustibile di alimentazione influisce sull'espressione che quantifica il rendimento del ciclo limite ed il rendimento volumetrico. Pertanto i risultati delle equazioni che descrivono il ciclo Otto dal punto di vista termodinamico nelle condizioni di funzionamento nominale conducono alla valutazione di questi due rendimenti i cui valori sono stati inseriti all'interno di una Look-up Table 3-D. Infatti è possibile ottenere tali grandezze in funzione di tutte le combinazioni possibili di tenore di idrogeno, rapporto di compressione del motore ed eccesso d'aria.

Per limitare il numero di calcoli da effettuare durante la simulazione si è provveduto infine ad implementare le mappe del potere calorifico inferiore sia rispetto alla massa che al volume, del rapporto di dosatura stechiometrica (aria/combustibile) e del peso molecolare medio. Tali grandezze risultano necessarie per effettuare i bilanci energetici per il calcolo delle portate dei fumi (e quindi delle emissioni) e del consumo di combustibile sia come miscela, che come consumi singoli di idrogeno e metano.

Definizione delle mappe per il modello dell'assorbitore a bromuro di litio

Allo scopo di integrare all'interno della piattaforma ODESSE un modello per il gruppo frigo ad assorbimento del tipo monostadio a fumi diretti è stato necessario sviluppare un modello di scambiatore di tipo acqua-fumi (anche se nel secondario in realtà è presente una soluzione acquosa al 30% in peso di bromuro di litio) e non di tipo acqua-acqua. Analizzando le curve frigorifere dei costruttori è possibile notare che l'efficienza di conversione è suscettibile di variazioni in corrispondenza di riduzione o aumenti dei livelli di temperatura a cui avviene lo scambio termico (qualità exergetica del calore necessario per la rigenerazione).

Pertanto il risultato finale è stato la realizzazione di un modello alternativo di macchina frigorifera che, di fatto, si configura come soluzione tecnologica aggiuntiva per la simulazione degli impianti di trigenerazione.

Definizione delle equazioni di calibrazione

Allo scopo di calibrare il modello implementato è stata condotta una campagna sperimentale per l'acquisizione dei dati di funzionamento reale del cogeneratore, con le seguenti condizioni operative

Potenza costante	45	kW_{el}
Miscela di idrometano	1-10	%vol
Temperatura aria esterna	22,6	°C
Pressione Atmosferica	1010	mbar
Alimentazione	GN di rete	-
Pressione di alimentazione	20	mbar
Indice d'aria di riferimento ($P_{el.}$=60 kW)	1,4	λ
Anticipi di accensione considerati	18	c.a °
Condizioni di carico	100 - 30	$\%P_{el.\ Nom}$

All'aumento della concentrazione di H_2 la temperatura allo scarico dei fumi diminuisce progressivamente. Lo stesso tipo di andamento è riscontrabile anche all'uscita del catalizzatore con un incremento dei salti di temperatura tra ingresso e uscita. Ciò è dovuto in parte ad un aumento delle reazioni esotermiche di catalisi e probabilmente a fenomeni di inerzia termica riguardanti la struttura metallica del catalizzatore stesso. Il fenomeno di temperatura riscontrato può essere spiegato considerando il fatto che l'idrometano, in relazione alla concentrazione di H_2 e all' eccesso d'aria imposto, ha una durata angolare di combustione rapida inferiore a quella del metano puro e quindi, a parità di anticipo d'accensione, il rilascio di energia avviene in corrispondenza di volumi specifici inferiori; sostanzialmente si ha un effetto equivalente ad un aumento di anticipo. Inoltre il maggior apporto energetico dettato dalla miscelazione incrementa pressione e temperatura in testa al cilindro.

Per quanto riguarda il consumo di metano è possibile notare che la sua riduzione non è proporzionale alla percentuale di miscelazione. Ciò che è emerso dall'analisi dei primi risultati sperimentali conferma parzialmente quanto riportato in letteratura, in altre parole una diminuzione delle emissioni di CO all'aumentare della percentuale d'idrogeno, coerentemente a quanto asserito in studi internazionali precedentemente condotti.

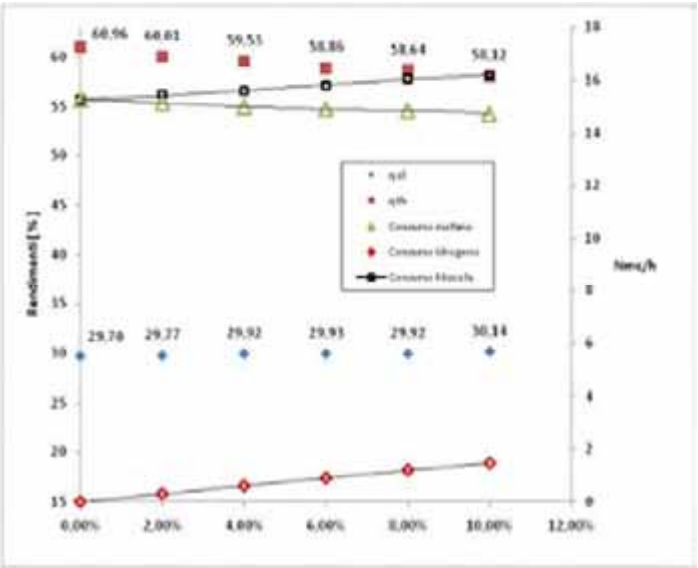


Figura 135. Rendimenti e consumi in funzione della % di H_2

Per quanto concerne l'emissione degli NOx è stata invece riscontrata una tendenza differente rispetto a quanto riportato in letteratura, ovvero una diminuizione degli ossidi di azoto corrispondente all'addizione di idrogeno.

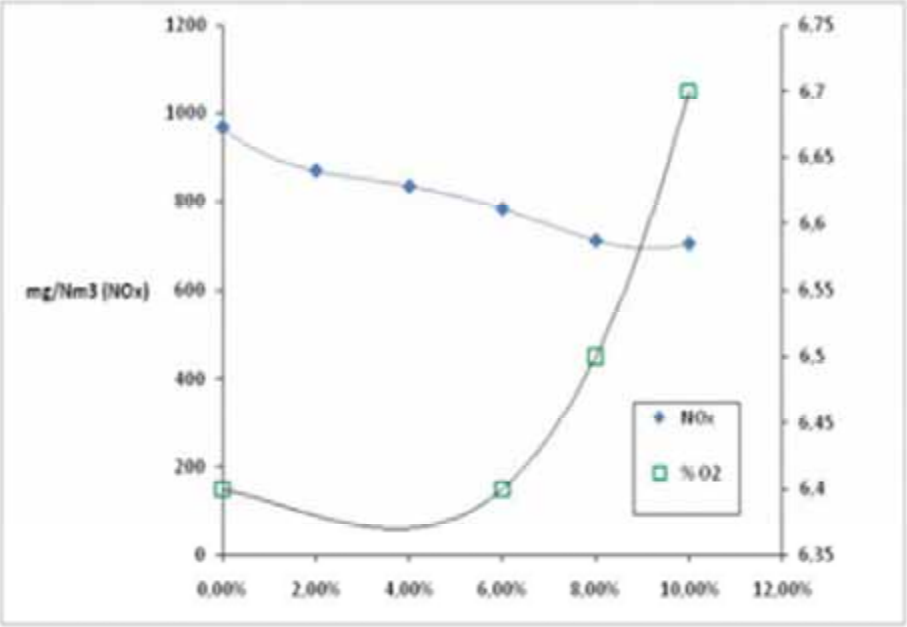


Figura 136. Emissioni di NOx vs tenore di O_2 allo scarico in funzione

Dopo una accurata ricerca, si è dedotto che il comportamento precedentemente descritto è causato dal sistema di alimentazione costituito da un carburatore tradizionale. Infatti, osservando l'espressione analitica rappresentativa del comportamento di un carburatore, è possibile comprendere come il motore, alimentato dal nuovo combustibile, si porti in condizioni di funzionamento in eccesso d'aria in modo automatico e non voluto. Tale risultato è raggiungibile prendendo in considerazione vari effetti distinti che si manifestano contemporaneamente nel momento in cui avviene la sostituzione del combustibile tradizionale con l'idrometano.

Il primo effetto è causato dalla variazione del rapporto di dosatura stechiometrica rispetto al metano puro; prendendo come riferimento una concentrazione di idrogeno pari al 10% in volume si ha che l'aumento percentuale di α_{st} è pari all'1,37% ed in base all'equazione precedentemente menzionata tale aumento determina una riduzione del valore dell'indice d'aria.

Il secondo ed il terzo effetto sono invece strettamente collegati alla diminuzione di peso molecolare del combustibile e quindi alla densità in condizioni normali. Sempre facendo riferimento ad una miscela al 10%, la riduzione di peso molecolare è pari all'8,75%. Contemporaneamente si ha anche una riduzione del coefficiente di efflusso del combustibile relativo all'ugello tarato. Va infatti ricordato che il valore di *Cc* (ed anche di *Ca*) è dipendente da molteplici fattori, come la geometria del foro, la rugosità, la velocità, etc.

Nel caso in cui il fluido si trovi in condizioni di velocità ben al di sotto di 0,7 Ma (dove Ma rappresenta il numero di Mach) il coefficiente di efflusso, con buona approssimazione, è dipendente esclusivamente dal numero di Reynolds ($u\rho D/\mu$), pertanto riducendosi molto di più la densità rispetto alla viscosità dinamica, l'idrometano presenta un numero di Reynolds più basso e quindi anche un coefficiente di efflusso inferiore a quello del metano puro, il che contribuisce ad aumentare il valore dell'indice d'aria.

Allo scopo di compensare tali differenze di comportamento tra il funzionamento reale e quello teorico del modello implementato sono state introdotte delle modifiche nel sistema di equazioni termodinamiche . In particolare, le principali curve termodinamiche reali e teoriche sono state differenziate rispetto alla concentrazione di idrogeno e dalla valutazione delle differenze sono stati ottenuti dei coefficienti correttivi.

Dalla Figura 137 si evidenzia che i valori di rendimento elettrico sperimentali e quelli calcolati dal modello matematico in condizioni di carico nominale e parziale nel caso di alimentazione a metano puro sono praticamente coincidenti dopo l'applicazione dei coefficienti correttivi.

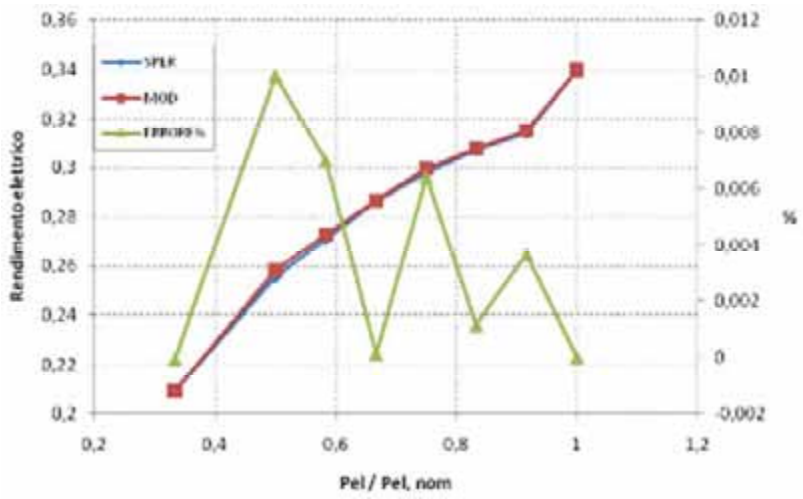


Figura 137. Confronto tra valori sperimentali e valori calcolati da modello calibrato

File climatico per la determinazione dell'umidità esterna

Il generatore dei dati climatici (NWG) implementato in ODESSE e sviluppato nel corso delle annualità precedenti è stato integrato con il profilo dell'anno climatico medio, generato grazie alla definizione di un algoritmo utile a prevedere il valore orario del contenuto di vapore presente nell'aria esterna.

Per descrivere in termini di condizioni climatiche e in maniera quanto più esaustiva l'intero parco nazionale sono state individuate 13 città rappresentative, delle quali si disponeva una quantità di dati tali da poterle considerare. La scelta è stata fatta in maniera tale che per ognuna delle fasce climatiche fossero state considerate città che si avvicinassero per numero di Gradi Giorno sia ai valori estremi delle fasce che ad un valore intermedio per ognuna.

Indicizzazione dei profili elettrici per edifici uso ufficio

Al fine di definire i profili tipo per il carico elettrico di edifici ad uso ufficio, da poter utilizzare all'interno della piattaforma ODESSE, nel corso dell'annualità corrente è stata condotta una campagna di acquisizione strumentale del carico elettrico orario (esclusa climatizzazione) di alcuni edifici nel Comune di Roma adibiti ad uso uffici (pubblici e privati) , ampliando i profili di carico analizzati durante l'annualità precedente.

Oltre ad acquisire nuove misure reali, l'obbiettivo principale dell'attività è stato quello di definire una metodologia di indicizzazione univoca dei carichi elettrici monitorati partendo dall'osservazione dei parametri caratteristici dell'edificio (superficie utile totale, profilo di utilizzo, numero di occupanti), dalla potenza contrattuale e suo coefficiente di utilizzo. L'individuazione di una indicizzazione dei consumi univoca del campione monitorato rende gli edifici confrontabili e consente di definire un carico medio orario adimensionalizzato da poter implementare in ODESSE per la ricostruzione dei reali consumi elettrici degli edifici uso uffici simulati.

Come primo passo per il raggiungimento di tale obiettivo, è stato selezionato un campione costituito da 5 edifici eterogenei, di seguito indicati, accomunati dalla destinazione d'uso, di cui tre sono in corso di monitoraggio strumentale da parte di ENEA da alcuni anni.

Si riporta di seguito (Tabella 38) l'andamento orario del carico elettrico riferito al mese di novembre, indicizzato rispetto alla potenza massima prelevata durante l'anno per ciascuno edificio del campione esaminato.

Tabella 38. Andamento orario del carico elettrico riferito al mese di novembre, indicizzato rispetto alla potenza massima prelevata durante l'anno per ciascuno edificio del campione esaminato

	Potenza massima [kW]	Superficie utile [mq]	Numero persone	Densità affollamento [num. pers/m^2]
Edificio 1	245	3360	300	0,09
Edificio 2	27	368	13	0,04
Edificio 3	82	3250	79	0,02
Edificio 4	103	3650	62	0,02
Edificio 5	360	7600	350	0,05

Da una prima analisi dei carichi elettrici normalizzati, come riportato nella Figura 138, anche se rappresentante una casistica limitata di edifici a uso uffici, si evince la possibilità di definire delle classi di appartenenza degli edifici, caratterizzate da un comune carico elettrico medio normalizzato.

Naturalmente per la definizione più dettagliata delle classi di appartenenza è necessario sia incrementare il campione degli edifici monitorati sia acquisire più anni di consumo elettrico, in modo che si possano mediare le fluttuazioni dei consumi dovuti al comportamento aleatorio degli occupanti.

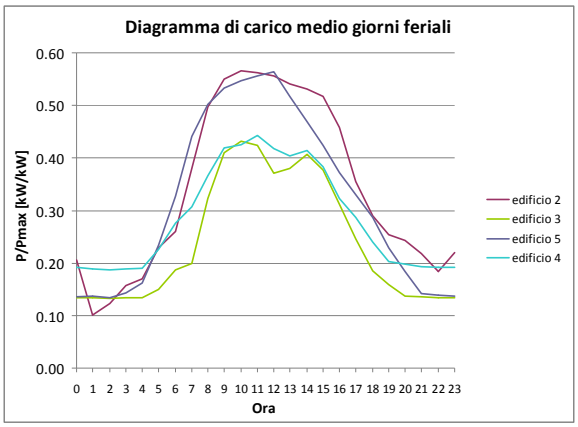


Figura 138. Carico elettrico medio feriale (mese novembre) normalizzato rispetto alla potenza massima annua

Una versione eseguibile del programma ODESSE (license free) sarà reso disponibile in rete presso il sito di ENEA (www.enea.it).

Studi per il contenimento dei consumi in un distretto energetico

Le potenzialità di contenimento delle emissioni climalteranti e dei consumi energetici dei dispositivi di poligenerazione distribuita derivano prevalentemente dalla riduzione delle "perdite" energetiche legate al vettoriamento dell'energia ad elevata distanza ed ai frequenti funzionamenti a carichi parziali tipici degli impianti di taglia elevata. Inoltre esistono vantaggi economici nonché benefici dovuti alla maggiore indipendenza energetica dell'utenza e legati ad un più razionale utilizzo stagionale del gas naturale e dell'energia elettrica.

Gli studi sono stati condotti per evidenziare i vantaggi della poligenerazione distribuita, attraverso lo sviluppo di sistemi di monitoraggio e controllo relativamente a dei casi studio, che si riferiscono a tre diverse aree geografiche: rete di impianti presenti nei laboratori dell'Università di Napoli e dell'Università del Sannio, la zona denominata "area Capanna" all'interno del Centro Ricerche ENEA Casaccia presso Roma e la test facility di RSE S.p.A. a Milano.

Queste aree sono state oggetto di attività di campagne sperimentali con diversi intenti sia per sviluppare un sistema di monitoraggio e controllo remoto di impianti di trigenerazione di piccola taglia ad uso terziario, sia l'applicazione di sistema di controllo e ottimizzazione dei flussi energetici, anche in presenza di fonti non programmabili.

In particolare, si è sviluppato un sistema di monitoraggio e controllo remoto di una rete di sistemi energetici complessi, di piccola taglia e ad elevata efficienza di conversione, in grado di soddisfare "in situ" richieste frigo-termo-elettriche differenziate (Distributed Micro Combined Cooling Heat and Power, DMCCHP).

Impiego di un algoritmo di controllo per la ottimizzazione dei set point dei generatori all'interno di una microrete

Nel seguito viene illustrato l'impiego di un algoritmo di controllo progettato per la ottimizzazione dei set point dei generatori all'interno di una microrete. Lo scopo della regolazione è in questo caso quello di identificare configurazioni di massima efficienza energetica. Gli obiettivi considerati sono più di uno, giacché nella nozione di efficienza energetica si possono inserire tanto le questioni legate al risultato economico del soggetto produttore di energia all'interno della microrete, quanto questioni legate alle emissioni ed alla efficienza delle macchine utilizzate per la produzione di energia.

La tecnica di soluzione proposta tiene conto del problema dell'incertezza legata alla previsione tanto dei prelievi da parte degli utenti quanto delle grandezze meteoreologiche su un orizzonte temporale di diverse ore. La fase di sperimentazione si è svolta facendo riferimento a due sistemi elettrici di test: la rete di distribuzione dell'area denominata "La Capanna" del Centro Ricerca ENEA di Casaccia (Roma) (definita come Rete A) e il sistema di alimentazione della Test Facility di Generazione Distribuita di RSE SpA (Milano) (indicato come Rete B). Il primo è parte in media tensione e parte in bassa tensione ed alimenta diversi edifici destinati prevalentemente ad uffici,

sale conferenza, laboratori; il secondo è interamente in bassa tensione ed è un sistema test costruito appositamente per svolgere simulazioni ed analisi sul tema della generazione distribuita e delle micro-reti.

La traduzione della logica di controllo ottimale in un codice eseguibile da un sistema automatico

La traduzione di una logica di controllo in un codice eseguibile da un sistema automatico richiede sempre l'identificazione delle caratteristiche del sistema da controllare, delle variabili di controllo, degli obiettivi da conseguire, dei vincoli operativi e dei tempi in cui si esplica l'azione di controllo.

E' noto che i livelli di controllo in una microrete o smart grid che alimenta un distretto energetico sono molteplici. Fra gli obiettivi da conseguire, quello della razionalizzazione energetica si consegue riferendosi ad un livello di controllo che si esplica a scala giornaliera attraverso interventi che consistono nella variazione dei set point delle unità di generazione dispacciabili. Il sistema di controllo può essere costituito da due oppure da un livello di ottimizzazione. Nel primo caso un livello si riferisce ad azioni che si esplicano nell'arco della giornata successiva, l'altro ad azioni che si esplicano nell'arco dell'intervallo di tempo elementare successivo. In questo caso, il sistema di controllo presso il controllore centrale (MGCC, MicroGrid Central Controller) ha una architettura del tipo illustrato in Figura 139.

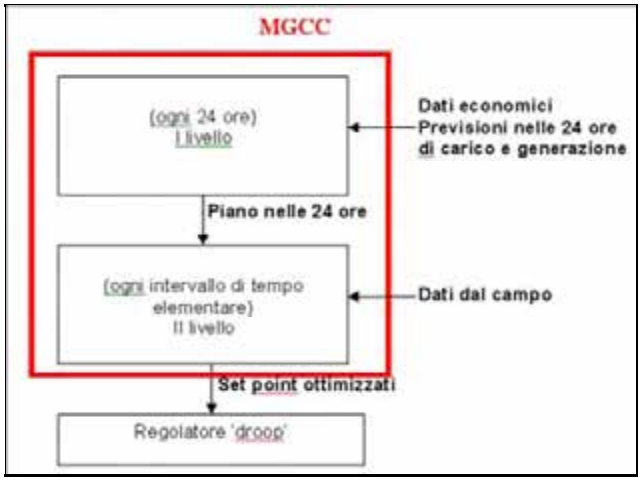


Figura 139. Sistema di controllo su due livelli

L'architettura illustrata prevede quindi un ottimizzatore economico che agisce su una scala temporale giornaliera, eseguendo il dispacciamento delle risorse energetiche sulla base di un criterio soltanto economico. Il secondo livello della regolazione si occupa di aggiustare i set point in relazione alle effettive condizioni operative che hanno subito con certezza una modifica a seguito di variazione delle condizioni atmosferiche/dei carichi. A valle di questo sistema a due livelli, interverranno localmente i regolatori primari ('droop') di frequenza e tensione. Altri approcci in letteratura presentano una struttura similare, ma abbandonano la struttura a due livelli per il supervisore centrale. D'altra parte, la necessità di considerare un orizzonte temporale di diverse ore nasce dalla presenza di sistemi di accumulo dell'energia. Per essi, nell'ottica della razionalizzazione energetica, occorre immaginare una strategia di accumulo e rilascio di energia che sia compatibile con il vincolo integrale di capacità limitata delle stesse batterie e che apporti l'atteso beneficio economico/ambientale quando gli stessi sistemi di accumulo supportano il funzionamento di sorgenti rinnovabili o non rinnovabili. Per tale motivo, in questo lavoro si è immaginato di formulare e risolvere diversi problemi in relazione a diverse possibili formulazioni con una architettura di tipo gerarchico. Il sistema di controllo a cui ci si riferisce in questo rapporto esplica la sua azione ogni intervallo di tempo elementare, che va da 15 minuti ad 1 ora, attraverso l'aggiustamento dei set point delle risorse energetiche controllabili. Si continuerà ad immaginare un supervisore centrale (MicroGrid Central Controller) che sviluppa un piano di dispacciamento per le ore successive in presenza di sistemi di accumulo dell'energia ed in presenza di possibili modificazioni delle condizioni atmosferiche/prelievo da parte del carico rispetto alle previsioni.

Per fare fronte alle possibili variazioni rispetto alle previsioni di producibilità delle sorgenti di energia rinnovabile e di prelievo da parte dei carichi, è stato ipotizzato di ripetere il monitoraggio e l'esecuzione del programma di dispacciamento ogni intervallo di tempo elementare, procedendo poi alla implementazione della prima azione del piano generato. In tal modo, non è necessario un approccio su più livelli. L'algoritmo fornisce in uscita il piano ottimo secondo criteri tecnico/economico/ambientali per le 24 ore successive avendo come punto di partenza le condizioni rilevate istantaneamente dal campo.

L'approccio seguito prende il nome di ciclo di "percezione-pianificazione-azione" e l'ottimizzazione che si vuole condurre in questo caso si riferisce ad un problema di variabili miste intere, con diverse funzioni obiettivo non

lineari e vincolato. La soluzione è stata raggiunta utilizzando un algoritmo *Non dominated Sorting Genetic Algorithm II*, *NSGA II*, nel quale le soluzioni si evolvono attraverso operatori di ricombinazione come mutazione ed incrocio. Come il *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm* da cui trae origine, l'*NSGA II* ordina la popolazione in fronti di soluzioni sulla base del concetto di non dominanza. In tal modo, soluzioni migliori dal punto di vista di tale ordinamento, vengono premiate con un indicatore di qualità di valore maggiore e conseguentemente la ricerca potrà orientarsi verso aree interessanti dello spazio di ricerca (maggiori dettagli sull'algoritmo si possono trovare sul sito www.iitk.ac.in/kangal/deb.shtml).

Formulazione analitica del problema della razionalizzazione energetica per le microreti

Nel problema del dispacciamento ottimale delle risorse energetiche allo scopo di conseguire una razionalizzazione energetica dell'esercizio, le variabili sono:

- La potenza iniettata da nodi di generazione di tipo dispacciabile;
- La potenza reattiva assorbita da banchi di condensatori controllabili;
- La potenza iniettata/prelevata da nodi di carico/generazione di tipo attivo.

Quest'ultima tipologia di nodi può ancora essere suddivisa in

- nodi di generazione dispacciabili con accumulo;
- nodi di carico interrompibili;
- nodi di carico differibili.

I parametri invece sono i fattori di carico dei nodi di carico di tipo passivo ed i fattori di producibilità dei nodi di generazione di energia da fonte rinnovabile non controllabili. Lo stato di carica dei sistemi di accumulo è dedotto dal valore delle variabili e dai suddetti parametri. Le variabili sono quindi in ogni caso di tipo reale e di tipo intero se riferite ad i carichi interrompibili. Il numero delle variabili dipende dall'orizzonte temporale considerato. Nel caso in cui il dispacciamento va fatto ogni ora sarà pari a 24 moltiplicato il numero di nodi di tipo 1) e 2).

Le funzioni obiettivo dipendono dal tipo di azioni che si devono conseguire in relazione allo scenario di riferimento.

Gli obiettivi comunque maggiormente considerati per la razionalizzazione energetica sono:

- ✓ il costo di produzione dell'energia da ciascun nodo della rete;
- ✓ le perdite per effetto Joule;
- ✓ le emissioni di inquinanti in atmosfera;
- ✓ il bilanciamento del carico in uscita dal nodo di alimentazione principale.
- ✓ I vincoli invece si riferiscono normalmente a:
- ✓ limitazione delle cadute di tensione
- ✓ limitazione della potenza attiva/reattiva che fluisce sui rami ed in uscita dai nodi di generazione entro la capacità prefissata
- ✓ vincolo integrale sulle batterie di accumulo dell'energia.

Scenari di riferimento

La razionalizzazione dell'esercizio può essere condotta in diversi modi sulla base delle funzioni obiettivo che vengono considerate volta per volta. Nelle applicazioni sperimentate sono stati considerati tre scenari di riferimento: Energy, Peak Shaving e Island.

	Scenario Energy	**Scenario Peak Shaving**	**Scenario Island**
Obiettivo	Razionalizzazione delle risorse energetiche	Ridurre picco di carico	Mantenere il bilancio fra domanda di carico e produzione
Minimizzazione	Costo di produzione dell'energia comprensivo di eventuali acquisti e vendite dalla rete; Perdite per effetto Joule; Emissioni CO_2	Perdite per effetto Joule; Emissioni CO_2	Perdite per effetto Joule; Emissioni CO_2
Vincoli	Sulle massime cadute di tensione, sulla massima corrente nei rami e nei componenti, sui limiti superiore ed inferiore di producibilità delle fonti di energia attiva e reattiva	Sulle massime cadute di tensione, sulla massima corrente nei rami e nei componenti, sui limiti superiore ed inferiore di producibilità delle fonti di energia attiva e reattiva.	Sulle massime cadute di tensione, sulla massima corrente nei rami e nei componenti, sui limiti superiore ed inferiore di producibilità delle fonti di energia attiva e reattiva.

Implementazione dell'algoritmo scelto per la gestione ottimizzata della microrete

In intelligenza artificiale, la rappresentazione della conoscenza è uno dei temi cruciali per il conseguimento degli obiettivi che ci si prefigge attraverso l'astrazione di un comportamento intelligente e la sua implementazione all'interno di un sistema artificiale. La codifica delle variabili e la definizione degli operatori che su di esse intervengono sono infatti modi di rappresentare la conoscenza euristica dell'esperto e sono profondamente interconnessi fra loro. Nei paragrafi che seguono, si illustrano i modi attraverso cui si è immaginato di rappresentare le variabili ed operatori di perturbazione in gioco al fine di minimizzare l'impatto delle condizioni vincolari. Fra le variabili già elencate, le variabili indipendenti sono quelle di tipo 1), 3a), 3b) e 3c).

Le variabili di tipo 1) sono state rappresentate attraverso variabili reali che assumono valori all'interno del range operativo previsto.

Le variabili di tipo 3a) sono state rappresentate attraverso variabili reali che assumono valori all'interno del range operativo previsto. Anche se la presenza dei sistemi di accumulo fa in modo che tali nodi abbiano intervalli di variazione variabili in relazione all'istante a cui ci si riferisce. In tal modo, ricalcolando cioè gli intervalli di variazione delle variabili, nodo per nodo ed istante per istante, non si incorre nella violazione del vincolo integrale di bilancio energetico sulle batterie. Le variabili di tipo 3b) sono rappresentate con variabili booleane. Quelle di tipo 3c) infine sono rappresentabili con un numero intero che rappresenta il numero di ore di cui viene differito il diagramma di carico relativo al nodo considerato.

L'implementazione è stata interamente sviluppata in Delphi Pascal, che è un linguaggio di programmazione ad oggetti. La validazione dei risultati in termini di correttezza degli indicatori tecnici calcolati attraverso la implementazione è stata invece sviluppata in ambiente Neplan. Le opzioni di funzionamento consentite dall'algoritmo possono essere riassunte come segue:

- possibilità di spegnimento e riaccensione delle microturbine;
- presenza di carichi termici e sorgenti alternative di calore (caldaie);
- possibilità di variazione dei prezzi di acquisto e vendita dell'energia verso la rete in base a fasce orarie;
- possibilità di effettuare load shedding;
- possibilità di limitare il transito della energia nel nodo di saldo.

Per ciascuna delle due reti l'algoritmo è stato applicato tenendo conto dei diversi scenari sopra descritti (Energy, Peak Shaving e Island) e considerando diverse configurazioni; in particolare le configurazioni della reta A utilizzate sono state quattro. In sintesi differiscono per la presenza o meno di accumulatori e/o per la quantità e le caratteristiche dei carichi differibili.

Per la rete B si sono considerate due configurazioni di base. Nella prima (B1) è presente una sola microturbina in assetto cogenerativo, sono installati due impianti fotovoltaici, non è presente accumulo di energia elettrica e prevede la possibilità di acquistare e vendere energia alla rete MT. La seconda configurazione prevede anche la presenza di una batteria di accumulatori (B2).

L'approccio percezione-pianificazione-azione per la gestione della incertezza

Eseguire un'ottimizzazione delle risorse energetiche con un orizzonte temporale di 24 ore comporta certamente un errore notevole nei dati che si riferiscono alle previsioni di producibilità delle sorgenti e del carico. Per fare fronte a questo inconveniente e limitare gli effetti della incertezza sulle previsioni delle variabili metereologiche, si è pensato di utilizzare un approccio *percezione-pianificazione-azione*, che consente l'aggiustamento 'continuo' dei set point delle risorse energetiche sulla base delle mutate condizioni operative, per il quale si è immaginato di avere un diagramma di carico e di producibilità dalle fonti fotovoltaiche affetti da un errore linearmente crescente nell'arco delle 24 ore.

Si sono raffrontati gli effetti simulati sulla valutazione degli obiettivi nel caso in cui si svolga la ottimizzazione ogni 24 ore e nel caso in cui la ottimizzazione si svolga ogni intervallo di tempo elementare (nella fattispecie 1 ora) con una proiezione di 24 ore. In questo ultimo caso, peraltro, i sistemi di accumulo avranno lo stato iniziale rilevato dal campo. Il procedimento per verificare l'approccio è il seguente:

- si identifica la soluzione di minime perdite;
- si valuta la soluzione operativa a minime perdite applicando un errore linearmente crescente (fino al +/- 10% per la producibilità dei pannelli fotovoltaici) ai fattori di carico ed alla producibilità dei pannelli fotovoltaici;
- si valutano gli obiettivi a 24 ore;
- si valutano gli obiettivi ora per ora, applicando il disturbo con ora iniziale crescente.

L'approccio è stato applicato alla rete RSE che ha dimensioni più ridotte, per essa nella configurazione B2 si sono avuti i seguenti risultati. Le perdite sono risultate aumentate del 15% e le cadute di tensione sono cresciute fino al

20%. Occorre mettere in evidenza che l'approccio suggerito non necessariamente comporta un peggioramento degli obiettivi in relazione alle caratteristiche elettriche del sistema, giacché l'errore previsionale viene applicato con segno positivo e negativo. Tuttavia mediamente si ravvisa un peggioramento degli obiettivi ed in ogni caso, la situazione che si presenta non è quella che ci si attende con un allontanamento fra i valori previsti per i flussi di potenza e quelli effettivi.

Nelle applicazioni sviluppate, l'algoritmo si è dimostrato efficiente e può essere utilizzato, per le sue caratteristiche di robustezza, all'interno di micro-reti che alimentano distretti energetici. Sensibili miglioramenti in termini di stabilità dei risultati e rapidità di convergenza si potrebbero ottenere se si ricorresse ad una integrazione delle misure presentate in questo rapporto con alcune messe a punto nel rapporto, ove si immagina un aggiustamento dei set point dei generatori controllabili sulla base della linearizzazione del rapporto fra tensioni ai nodi e potenze iniettate. E' infatti dimostrato che la messa a punto di operatori euristici che integrino la conoscenza dell'esperto per la perturbazione delle soluzioni negli algoritmi genetici fornisce risultati eccellenti. Si potrebbe quindi immaginare di 'guidare' le soluzioni fornendo loro perturbazioni che probabilmente forniranno un beneficio agli obiettivi che ci si prefigge. Se il legame fra costo di produzione ed emissioni e potenze generate può infatti essere espresso in modo esplicito, tranne che per la quota di potenza riferita al nodo di saldo, quello fra perdite e cadute di tensione e potenze generate ai nodi è difficilmente esprimibile.

Altre direzioni di indagine sono quelle che riguardano il problema della caratterizzazione del nodo di saldo nei sistemi isolati. Esso, infatti, si configura sempre come il nodo presso il quale si fa il bilancio fra le potenze e dunque è 'per ruolo' chiamato a coprire le perdite per effetto Joule. Il vincolo sul transito nullo di energia dal nodo diventa dunque difficile da soddisfare anche in relazione all'algoritmo utilizzato per il load flow. In condizioni di isolamento della rete, imponendo cioè scambio nullo di energia con il sistema a monte, potrebbe risultare difficile identificare una soluzione che offra questa condizione. Allo scopo, gli algoritmi genetici offrono la possibilità di codificare la soluzione inserendo anche l'identificativo del nodo di saldo per i calcoli.

Monitoraggio e controllo dei laboratori dell'Università di Napoli e dell'Università del Sannio

La dotazione impiantistica dei laboratori è rappresentativa di diverse tecnologie che hanno raggiunto la maturità commerciale e che soddisfano le richieste frigotermo-elettriche di utenze residenziali e del piccolo terziario interagenti con reti di distribuzione locale (elettriche e termiche). Gli impianti sperimentali sono equipaggiati con sensori, trasduttori ed sistemi di acquisizione dati che permettono di collezionare localmente le principali proprietà termodinamiche e termoigrometriche dei fluidi in gioco (aria, acqua calda e refrigerata), nonché i flussi bidirezionali di energia elettrica ed i consumi di gas naturale. E' stato quindi possibile effettuare bilanci di energia relativi ai sistemi complessivi ed ai principali componenti e attivando interventi per il monitoraggio da sede remota delle principali proprietà termodinamiche e termoigrometriche dei fluidi in gioco.

Descrizione dei laboratori

Il sistema di poligenerazione è stato analizzato sperimentalmente presso il "*Laboratorio di Fisica Tecnica*" dell'Università degli Studi del Sannio a Benevento. Una Unità di Trattamento Aria (UTA) consente il trattamento, in condizioni estive, di una portata d'aria di 800 m^3/h, fino alle desiderate condizioni di immissione in ambiente. Al suo interno è installato un raffreddatore evaporativo indiretto, atto a preraffreddare l'aria di processo in uscita da una ruota essiccante prima del suo ingresso nella batteria fredda interagente con un chiller elettrico. Un motocogeneratore (MCHP) che fornisce una potenza elettrica pari a 6,0 kW e una termica pari a 11,7 kW, recuperata dal liquido di raffreddamento e dai gas combusti del motore.

L'energia termica disponibile dal MCHP viene utilizzata per la rigenerazione del materiale adsorbente della DW, gel di silice, a temperature comprese tra i 60 e i 70 °C, con l'eventuale contributo da parte di una caldaia a gas naturale, nei giorni più caldi e umidi. Nel caso in cui il cogeneratore renda disponibile energia termica in eccesso nel periodo estivo, un carico termico esterno consente di simulare il fabbisogno di acqua calda sanitaria. La potenza elettrica erogata dal cogeneratore è utilizzata per attivare gli ausiliari dell'UTA (ventilatori, pompe…), il chiller elettrico e le utenze elettriche dirette. Il sistema descritto può anche immettere energia elettrica in rete, nel caso di un surplus di produzione da parte del MCHP, o prelevarla da essa.

L'UTA presente, sia con riferimento al materiale essiccante adottato (silica gel) che alla tipologia impiantistica, era stata già in fase di progettazione concepita per permettere la rigenerazione del materiale sorbente con reflui termici a bassa/media temperatura e quindi per interagire energeticamente con pannelli solari, ancora non introdotti, e/o con il recupero dal cogeneratore. La soluzione impiantistica così progettata permette di far interagire il termoaccumulatore preesistente da 1000 litri con apporti energetici a differenti livelli di temperatura, derivanti dai pannelli solari, dal circuito di recupero del cogeneratore e quindi, in modalità tradizionale, dalla caldaia alimentata a gas naturale già operante. In Figura 140 si riporta l'UTA dotata di ruota essiccante.

Figura 140. Unità di trattamento aria, dotata di ruota essiccante

Presso il "*Laboratorio per il controllo dell'ambiente costruito*" della Seconda Università degli Studi di Napoli, situato nel comune di Frignano (CE), è installato un impianto di microtrigenerazione costituito dai seguenti componenti principali:

- motocogeneratore, le cui caratteristiche sono uguali a quelle del sistema presente presso i laboratori dell'Università del Sannio;
- pompa di calore ad assorbimento ad alimentazione indiretta;
- serbatoio di accumulo dell'energia termica ad alimentazione termoelettrica da 1000 litri;
- caldaia di integrazione alimentata a gas naturale;
- macchina frigorifera a compressione di vapore alimentata elettricamente e condensata ad aria.

Durante il periodo invernale l'energia termica recuperata dal microcogeneratore viene utilizzata per il riscaldamento ambientale e per soddisfare i fabbisogni di acqua calda sanitaria di una parte del laboratorio, mentre durante il periodo estivo viene utilizzata per soddisfare i fabbisogni di acqua calda sanitaria e per alimentare la macchina ad assorbimento al fine di soddisfare i fabbisogni di energia frigorifera per il raffrescamento ambientale di una parte dell'edificio. La macchina ad assorbimento (ClimateWell) opera con la coppia di lavoro acqua-cloruro di litio ed caratterizzata da una potenza frigorifera nominale di 10 kW con un COP in condizioni nominali di funzionamento pari a 0,68. In estate, invece, l'acqua calda prodotta viene inviata alla macchina ad assorbimento. Al fine di un efficiente funzionamento della macchina ad assorbimento è necessario garantire livelli termici dell'acqua in ingresso non inferiori ad 80 °C; tenuto conto che con l'energia termica recuperata dal microcogeneratore è possibile raggiungere una temperatura massima di circa 70 °C è stata prevista una caldaia di integrazione che garantisse il raggiungimento delle temperature di funzionamento della ABHP.

Durante il periodo estivo, il microcogeneratore, oltre a poter essere accoppiato alla macchina ad assorbimento, può essere accoppiato ad una pompa di calore a compressione di vapore alimentata elettricamente per la produzione di acqua refrigerata ed in grado di fornire una potenza frigorifera pari a 7,5 kW (COP= 2,88). Nel periodo estivo, quindi, l'impianto di poligenerazione può funzionare in due configurazioni, MCHP/EHP e MCHP/ABHP, anche contemporaneamente. L'obiettivo della attività è stato dunque quello di sviluppare un sistema che permettesse di gestire questi sistemi come un unico impianto per aumentare le potenzialità del modello di generazione distribuito sul territorio. Il funzionamento dei sistemi della rete è regolato in accordo ad un obiettivo (minimizzazione dei costi di esercizio, risparmio di energia primaria o contenimento delle emissioni climalteranti) per individuare domini operativi in cui i sistemi di cogenerazione e poligenerazione risultano più competitivi rispetto ai sistemi di "produzione" separata in termini energetici, economici e di impatto ambientale.

Sistema di monitoraggio e risultati sperimentali

Il sistema di monitoraggio e controllo "*web-based*" in remoto è stato implementato mediante il software "*TeamViewer*", che consente di instaurare un collegamento ad un computer qualsiasi tramite Internet e di controllarlo a distanza. Per il monitoraggio e il controllo del laboratorio dell'Università degli Studi del Sannio, è stato implementato un programma, sviluppato in ambiente "*LabView*", che consente di visualizzare le principali grandezze termodinamiche acquisite, relativamente a differenti volumi di controllo. Il programma è organizzato in una maschera principale, Figura 141, tramite la quale è possibile accedere, mediante dei pulsanti, a delle

subroutine di livello gerarchico inferiore, ciascuna relativa all'analisi di uno specifico volume di controllo del complesso sistema di poligenerazione.

Figura 141. Maschera principale dell'interfaccia per il monitoraggio del sistema di poligenerazione di UniSannio

Il primo pulsante di input (MCCHP=MCHP/HVAC-DW) attiva il collegamento al sistema di poligenerazione complessivo. In essa è visualizzato il layout impiantistico dell'unità di trattamento aria dotata di ruota deumidificatrice, interagente con i tre dispositivi di conversione energetica presenti (MCHP, caldaia e chiller), nonché il valore attuale di tutte le grandezze termodinamiche monitorate (temperatura, umidità e velocità dell'aria, temperatura e portata dell'acqua, portata di gas naturale). Infine è possibile impostare la durata della prova in minuti (il valore di default "0" indica una prova che continua indefinitamente) nonché il periodo di acquisizione in millisecondi (al valore di default è pari a 1000 ms).

Dal menù principale è possibile accedere al link della subroutine di output relativa al volume di controllo che racchiude la sola ruota deumidificatrice.

Dal menù principale è possibile quindi accedere ad un volume di controllo che racchiude il solo microcogeneratore (MCHP), Figura 142, per il quale viene visualizzato l'andamento nel tempo dei principali parametri prestazionali del dispositivo in esame, ovvero rendimento elettrico e termico e Coefficiente di Utilizzo del Combustibile (CUC). Anche in questo caso, nella parte superiore di ciascun grafico, accanto alla legenda, è presente un indicatore numerico che visualizza il valore attuale della relativa grandezza monitorata. Dal menù relativo al MCHP è inoltre possibile accedere ad un menù di input/output finalizzato ad un'analisi delle prestazioni del microcogeneratore (Sistema Proposto) rispetto a quelle del sistema di "produzione" separata (Sistema Tradizionale). In essa sono presenti una serie di cursori che permettono di impostare i principali parametri che caratterizzano il sistema di riferimento (rendimento della rete elettrica e della caldaia), i fattori di emissione unitari ed il costo dei vettori energetici coinvolti nell'analisi (gas naturale ed energia elettrica prelevata dalla rete), con la possibilità di differenziare il costo del gas naturale utilizzato dal cogeneratore da quello utilizzato dalla caldaia, in modo da poter includere nell'analisi l'eventuale defiscalizzazione del combustibile ad uso cogenerativo. Anche in questo caso il software elabora i dati acquisiti e fornisce i seguenti outputs, in termini percentuali, quali l'andamento nel tempo del REP e del ΔCO_2, l'andamento nel tempo della differenza in termini di costo di esercizio tra il SP ed il ST. Sono infine presenti, accanto alla legenda di ciascun grafico, i classici indicatori numerici che visualizzano il valore attuale della relativa grandezza acquisita.

Di notevole interesse appare la possibilità di agire localmente per verificare se il sistema, o i sistemi, stiano effettivamente operando in domini applicativi virtuosi in termini di risparmio di energia primaria, di emissioni di gas a effetto serra e quindi di costi di esercizio. Non ultimo va evidenziata l'opportunità che tale laboratorio virtuale contribuisca alla formazione di tecnici e studenti interessati alle tematiche energetiche. La complessa dotazione strumentale dei due laboratori di poligenerazione ubicati in Campania ha permesso:

- l'analisi energetica di un'ampia casistica di sistemi di conversione energetica di sistemi di conversione energetica di piccola taglia (MCHP, AHP, HVAC-DW, accumuli, DW, ...);
- l'interazione con reti di distribuzione esterne con particolare riferimento a quelle di teleriscaldamento e

teleraffrescamento;
- l'analisi di utenze differenziate in termini di carichi frigo-termo-elettrici.

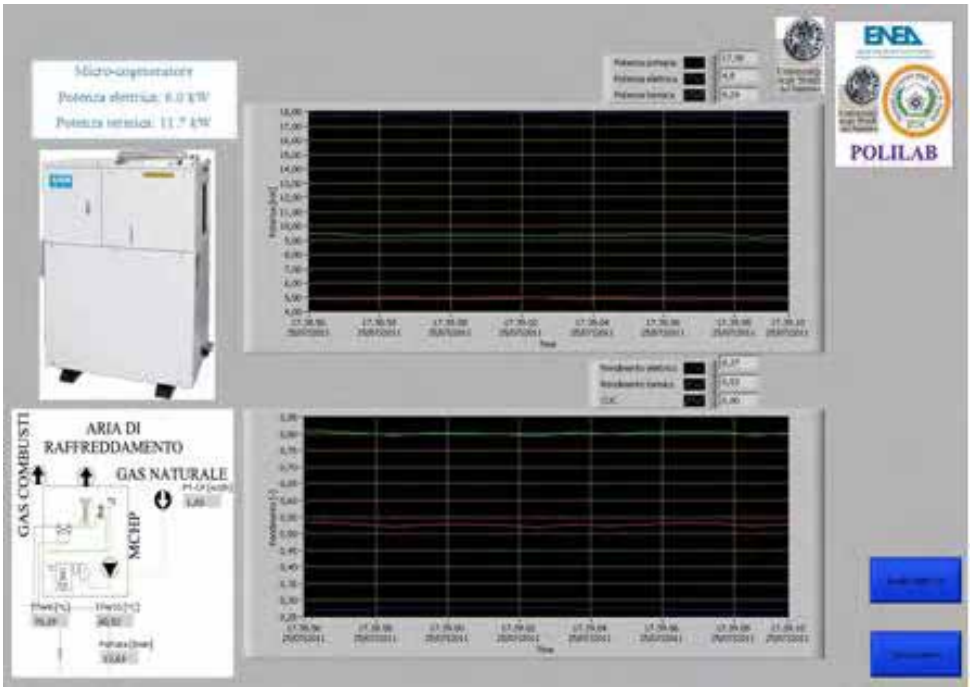


Figura 142. Menù di acquisizione relativa al volume di controllo del MCHP

L'upgrade effettuato è stato prioritariamente finalizzato al monitoraggio ed al controllo remoto da piattaforma "*web-based*", di facile ed affidabile implementazione, delle principali proprietà termodinamiche ed ambientali. L'approccio individuato rispetto a quello fornito dagli ambienti di sviluppo preesistenti in "*LabView*", offre l'ulteriore vantaggio di permettere l'accesso diretto a diversi sistemi "locali" di acquisizione e controllo per considerare la varietà di dispositivi presenti e lo scarsissimo livello di standardizzazione al momento non implementabile in applicazioni del residenziale e del piccolo commerciale. Il sistema realizzato permette di acquisire in tempo reale tutte le variabili d'interesse per una completa analisi tecnica, energetica, economica e di impatto ambientale di due impianti in esercizio. Questo strumento si presta a :
- condividere informazioni tra ricercatori diversi attraverso una comune connessione internet;
- svolgere prove di laboratorio per tecnici e studenti interessati a tematiche energetiche;
- analizzare e controllare impianti distribuiti sul territorio in un'ottica di gestione "centralizzata", ad esempio da parte di ESCO, finalizzata ad incrementare la redditività economica, i risparmi energetici ed il contenimento di CO_2 equivalente;
- provare in reali condizioni di esercizio algoritmi di ottimizzazione termo-economica in funzione di variabili "esterne", quali quelle climatiche e/o legate ai costi dei vettori energetici, ed "interne", quali quelle relative ai parametri operativi delle macchine, anch'essi modificabili in linea.

Principali soggetti esterni coinvolti

Politecnico di Milano

Le attività in cui è stato coinvolto sono quelle relative allo *"Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio impianto in un contesto di rete complessa"*, e si sono articolate su due obiettivi principali:
- la validazione del modello delle edificio integrato nella piattaforma ODESSE, attraverso l'individuazione di nuovi edifici benchmark che, a differenza di quelli considerati nell'attività della precedente annualità, sono per profili di utilizzo, forma e caratteristiche strutturali rappresentativi del parco edilizio e l'analisi del modello in oggetto in relazione alle diverse tipologie edilizie sopra menzionate.
- il supporto nella messa a sistema dei moduli domanda/generazione, attraverso l'analisi dei moduli di impianto e indicazioni sulle relative configurazioni di sistema e il supporto in merito alla definizione delle curve di domanda elettrica e termica e all'architettura complessiva della piattaforma ai fini dell'implementazione di un modello a scala di distretto.

Politecnico di Torino

Le attività svolte, riguardanti gli *"Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi"*, hanno avuto per oggetto la realizzazione di un modello matematico per la simulazione di un assorbitore a bromuro di litio di piccola taglia da collegare al modello del cogeneratore a combustione interna che era stato sviluppato nella precedente collaborazione. Il modello è stato realizzato per mezzo del software Matlab Simulink, e consente di prevedere la produzione di potenza frigorifera erogata dall'assorbitore, a fronte di una determinata temperatura di ingresso dell'acqua calda, delle condizioni ambiente, e della potenza termica nominale in ingresso all'assorbitore (derivante dal cogeneratore accoppiato all'assorbitore). Viene inoltre stimata la portata d'aria della torre evaporativa, sulla base di parametri progettuali tipici impiegati durante il dimensionamento di tali macchine. Allo scopo di creare una configurazione (cogeneratore-assorbitore) completa è stato necessario sviluppare alcune funzionalità aggiuntive al cogeneratore.

Università di Palermo

Le attività svolte sul tema "*Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio impianto in un contesto di rete complessa"* si sono articolate attraverso due linee di ricerca: l'integrazione del modello DEC sviluppato in ambiente Simulink nella piattaforma di simulazione ODESSE e la realizzazione del layout sperimentale (in ambiente Simulink), con la validazione del modello.

Università del Sannio

Il contributo, riferito all'attività "*Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio impianto in un contesto di rete complessa"*, si è concentrato nello sviluppo di un sistema di monitoraggio e controllo remoto di una rete di sistemi energetici complessi, di piccola taglia e ad elevata efficienza di conversione, in grado di soddisfare "in situ" richieste frigo-termo-elettriche differenziate (Distributed Micro Combined Cooling Heat and Power, DMCCHP), nell'ottica del raggiungimento obiettivi nazionali di risparmio di energia primaria e di contenimento di emissioni climalteranti. La dotazione impiantistica dei laboratori dell'Università degli Studi del Sannio (Unisannio) e della Seconda Università di Napoli (SUN) è rappresentativa di diverse tecnologie che hanno raggiunto la maturità commerciale e che soddisfano le richieste frigotermo-elettriche di utenze residenziali e del piccolo terziario interagenti con reti di distribuzione locale (elettriche e termiche).

Università di Palermo

Il lavoro svolto fa riferimento al tema "*Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio impianto in un contesto di rete complessa"*, in cui si è illustrato l'impiego di un algoritmo di controllo progettato per la ottimizzazione dei set point dei generatori all'interno di una microrete. Lo scopo della regolazione è in questo caso quello di identificare configurazioni di massima efficienza energetica. La fase di sperimentazione si è svolta facendo riferimento a due sistemi elettrici di test: la rete di distribuzione dell'area denominata "La Capanna" del Centro Ricerca ENEA di Casaccia (Roma) (definita come Rete A) e il sistema di alimentazione della Test Facility di Generazione Distribuita di RSE SpA (Milano) (indicato come Rete B).

Università di Roma "La Sapienza"

Le attività svolte , riferite al tema "*Sviluppo e diffusione di modelli per la simulazione e la validazione di strategie ottimali di gestione del sistema edificio impianto in un contesto di rete complessa"*, hanno avuto come obiettivi: la realizzazione di un modello matematico per la simulazione oraria del funzionamento di un cogeneratore di piccola taglia alimentato da miscele di idrometano di composizione modulabile nel range 0%-10% in volume, l'integrazione con modello di funzionamento dell'assorbitore a bromuro di litio, messo a disposizione da ENEA e la calibrazione del modello tramite dati sperimentali. Il modello, realizzato in ambiente Matlab Simulink, consente di prevedere le performance energetiche ed ambientali del cogeneratore, quando viene alimentato da combustibile non tradizionale, ossia da metano arricchito di idrogeno.

Università di Padova

L'azione relativa all'attività su gli *"Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi"*, è stata finalizzata alla messa a punto di schemi contrattuali tipo per l'esecuzione di contratti di rendimento energetico al fine di avere un riferimento per l'inclusione in un albo delle società che operano come ESCo. Si è inteso redigere una lista di requisiti che i contratti proposti dalle aspiranti ESCo devono rispettare al fine di consentire loro di essere incluse nell'albo delle ESCo qualificate secondo quanto previsto dall'art. 16 del d. lgs. 115/2008. A tal fine, sono state individuate una serie di clausole standard che consentono di evidenziare il nesso causale tra il risultato in termini di maggior efficienza energetica ed economica

e la responsabilità contrattualmente assunta dalle ESCo. Inoltre, è stata prodotta una relazione sulla strutturazione di un Albo nazionale delle ESCo, organizzato per aree territoriali, sotto coordinamento di un ente pubblico, sia in funzione del dettato normativo che per la garanzia di controllo tecnico e di coerenza.

Federazione Italiana Risparmio Energetico – FIRE

Il contributo della FIRE sul tema *"Studi per la promozione delle tecnologie ad alta efficienza e delle ricadute sulle imprese della produzione e dei servizi"* si è focalizzato sulla definizione di linee guida per costituzione di fondi di garanzia e fondi di rotazione, che possano essere utilizzati da Regioni ed EE.LL. come valida alternativa ai più conosciuti finanziamenti in fondo capitale. In primo è stata svolta un'accurata analisi degli strumenti finanziari attualmente disponibili a livello europeo, in seguito sono state sono state definite le fasi da seguire nella predisposizione di un bando per la concessione di agevolazioni e gli aspetti che il proponente deve tenere presenti nella predisposizione della domanda di accesso ai fondi. Basandosi su dati di letteratura e su interviste condotte su i soggetti deputati alla gestione dei fondi in vigore sono state inoltre messe in evidenza le criticità relative all'ammissibilità delle domande al fondo, per comprendere meglio quali siano le problematiche più comuni che vengono riscontrate.

Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica

(Referente S. Fumagalli)

L'illuminazione pubblica è uno dei settori su cui agire per raggiungere gli obiettivi del Piano d'Azione per l'Efficienza energetica in Italia, contribuendo a raggiungere gli obiettivi "20-20-20" a livello europeo. L'innovazione di prodotto sta orientandosi decisamente verso tecnologie a stato solido (LED e OLED), il cui vantaggio non è tanto in termini di efficienza energetica intrinseca dei singoli componenti base, quanto nella versatilità per produrre dispositivi orientati all'applicazione e quindi, in molti casi, competitivi con le migliori tecnologie tradizionali (in particolare lampade ad alogenuri metallici in apparecchi evoluti). E' sempre più sentita l'esigenza di una visione di sistema, per affiancare alle tecnologie più efficienti la gestione intelligente dell'impianto che permette risparmi potenziali vanno dal 20 al 50%, con tempi di ritorno degli investimenti accettabili. Inoltre l'illuminazione pubblica, se orientata verso specifiche tecnologie (Power Line Communication a banda larga) rappresenta una grande opportunità in quanto si propone come la tecnologia abilitante (in quanto permette l'integrazione di molte altre funzionalità) per città sostenibili (smart cities) su cui il SETPLAN europeo ha deciso investimenti massicci per i prossimi anni.

Le informazioni sullo stato attuale dell'illuminazione pubblica in Italia sono frammentarie. Si conferma la presenza di apparecchi obsoleti con sorgenti a mercurio, una certa penetrazione di apparecchi con lampade al sodio alta pressione, ioduro metallici ed alcuni interventi con apparecchi a LED. C'è una tendenza verso la "luce bianca", ottenuta da LED e dalle lampade a ioduri metallici ad arco ceramico: a questo proposito si sta approfondendo il concetto di "bianco" e di "temperatura di colore", con le implicazioni sulla scelta corretta in base all'applicazione.

In un concetto esteso di illuminazione "pubblica", che comprende non solo gli esterni ma anche gli "edifici" pubblici e altre situazioni, si assiste a una evoluzione di prodotto fortemente influenzata dall'entrata in vigore dei suddetti Regolamenti, specialmente in situazioni dove era consuetudine l'uso delle lampade a incandescenza tradizionale.

Lo sviluppo tecnologico è orientato soprattutto a illuminazione a stato solido (LED e OLED), il cui vantaggio non è tanto in termini di efficienza energetica intrinseca dei singoli componenti base, quanto nella versatilità per produrre dispositivi orientati all'applicazione e quindi, in molti casi, competitivi con le migliori tecnologie tradizionali. In una visione di sistema, le tecnologie più efficienti vengono affiancate dalla gestione intelligente dell'impianto, che permette risparmi aggiuntivi. Inoltre l'illuminazione pubblica, se orientata verso specifiche tecnologie (Power Line Communication a banda larga) rappresenta una grande opportunità in quanto si propone come la tecnologia abilitante (in quanto permette l'integrazione di molte altre funzionalità) per città sostenibili (smart cities) su cui il SETPLAN europeo ha deciso investimenti massicci per i prossimi anni.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

L'obiettivo è un significativo contributo al raggiungimento degli obiettivi europei di risparmio energetico nell'illuminazione pubblica: soddisfare le esigenze degli utenti finali - tramite le amministrazioni pubbliche nel rispetto dell'ambiente e con un uso razionale dell'energia. Elementi per arrivare a questo obiettivo sono:

- Sviluppo di un nuovo sistema per il controllo completo della strada ("smart street") basato su rete di lampioni intelligenti.
- Sviluppo e qualificazione di nuove tecnologie per l'illuminazione pubblica (LED ed OLED) e valutazione delle criticità ed opportunità di impiego.
- Sperimentazione/dimostrazione in scala reale in un paese pilota. Diffusione dei risultati ed estrapolazione delle potenzialità a livello nazionale.
- Avvio e supporto, nel contesto del Network Lumiere, di un significativo numeri di progetti di riqualificazione che abbiano come riferimento tecnologico la piattaforma tecnologica sviluppata.

Sviluppo sistemi intelligenti per la gestione della "Smart Street"

L'obiettivo dello studio consiste nello sviluppo di una metodologia di regolazione adattiva ed automatica del flusso luminoso al fine di massimizzare i risparmi energetici ed il comfort. Il sistema si presta particolarmente per importanti arterie veicolari o pedonali cittadine dove il consumo elettrico per l'illuminazione è particolarmente significativo e la regolazione è critica e permette di salvare grandi quantità di energia.

Le attività di sviluppo del sistema intelligente per la regolazione adattiva punto-punto della illuminazione pubblica si sono articolate su quattro task:

1. Sviluppo di una metodologia di modellazione della domanda di illuminazione in termini di predizione dei flussi di traffico a breve termine (1 ora) per arterie stradali.
2. Sviluppo di una metodologia di controllo adattivo del flusso luminoso in relazione alla richiesta dell'utenza.
3. Validazione della metodologia sviluppata su dati reali di flussi di traffico.
4. Comparazione tecnico-economica dell'approccio proposto rispetto all'approccio di mercato più diffuso su una realtà urbana di medie dimensioni.

Le metodologie sviluppate nel punto 1 si ispirano all'attuale fronte di ricerca dell'intelligenza artificiale. In particolare, sono stati sviluppati modelli basati su 'reti neurali' utilizzando diversi approcci, tra cui reti neurali evolutive con adattamento on-line e tecniche di "neural ensembling" off-line. Tale applicazione ha dato risultati molto interessanti con un errore di predizione minore dell' 8% sui flussi di traffico.

Per il punto 2 sono state impostate regole basate sulla "fuzzy logic". Lo scopo è quello di tradurre il flusso di traffico predetto in potenza di alimentazione delle lampade tenendo conto dei vincoli tecnologici e delle normative stradali. Il sistema di controllo quindi, basandosi sui dati misurati e sulle predizioni di attività veicolare, è "adattivo", ovvero con capacità di adattarsi in funzione dei flussi e della tipologia della strada.

Per il punto 3 gli algoritmi sviluppati sono stati validati su dati reali provenienti dalla città di Terni sia per quanto riguarda le metodologie predittive che per le regole di controllo. In quest'ultimo caso è in corso uno studio comparativo fra tre condizioni: senza sistema di controllo, con controllo statico e con controllo adattivo e sono stati valuti i risparmi energetici conseguiti.

Per il punto 4 l'obiettivo è stato quello di effettuare una valutazione sulla efficacia e competitività della soluzione tecnologica innovativa proposta da ENEA e preparare le basi per la implementazione sulla rete IP di servizi smart. Per effettuare una valutazione realistica è stata condotta un'analisi sul Comune di Castelnuovo Magra (provincia SP, 8200 ab.) dove è stato effettuato un audit energetico del sistema di illuminazione pubblica e pertanto l'analisi è stata fatta su tutti i punti luce della città (868). Dallo studio è emerso che il risparmio energetico che ci si può attendere è dell'ordine del 31% (inclusa la sostituzione di lampade con quelle più efficienti) introducendo la regolazione di linea (approccio convenzionale di mercato). Introducendo la telegestione adattiva punto-punto (metodologia proposta da ENEA) il risparmio sale al 41%. A fronte di tali risparmi energetici i costi della manutenzione nel caso della metodologa proposta da ENEA diminuiscono del 49% a fronte del 38% della regolazione di linea. Complessivamente l'investimento sul comune considerato della metodologia proposta avrebbe un costo di investimento di circa 270 k€, un tempo di ritorno dell'investimento di circa 7 anni (contro i 5 anni della regolazione di linea) ed un VAN positivo finale di circa 230 k€ con un significativo incremento del livello di comfort e l'abilitazione dei servizi smart.

Ricerca sperimentale e qualificazione sistemi di illuminazione innovativa

Sono state svolte diverse ricerche:

- Stato dell'arte sui LED, criteri per la qualità dell'illuminazione a LED.
- Sviluppo di una metodologia per la valutazione dell'affidabilità degli apparecchi di illuminazione a LED.
- Analisi di indici di resa cromatica esistenti.
- Misura della distribuzione spettrale nello spazio di sorgenti tradizionali e di sorgenti e apparecchi a LED.
- Test percettivi, definizione di indicatori e sviluppo di software su resa cromatica e contrasto percepito.
- Sperimentazione sulla visualizzazione in realtà virtuale.
- Analisi dell'impatto dell'illuminazione artificiale notturna sull'ambiente naturale.
- Illuminazione urbana e scenari di progettazione.
- Analisi dei sistemi integrati LED-fotovoltaico per applicazioni stradali.
- Progetto di un prodotto di illuminazione, per quanto riguarda la parte ottica e di design, definendone le funzioni "innovative". Realizzazione di 2 prototipi.

Stato dell'arte sui LED, criteri per la qualità dell'illuminazione a LED

I LED rappresentano una tecnologia molto recente, se intesa per applicazioni d'illuminazione, e per questo in forte sviluppo e soggetta a continui progressi: il 2010-2011 è stato un periodo di sensibili avanzamenti nella conoscenza che hanno portato a buone prospettive di riduzione di problemi come flusso luminoso, efficienza, resa cromatica, *binning*. D'altra parte altri ne sono sorti, soprattutto in relazione ai circuiti di alimentazione e controllo.

I campi principali di sviluppo oggi sono:

- la performance, ai fini del superamento di quella delle sorgenti tradizionali
- l'ottimizzazione delle applicazioni, per consentire l'adattamento di sorgenti e apparecchi a tutte le situazioni in cui si usano sistemi di illuminazione
- la facilità d'uso, ovvero la creazione di apparecchi di facile montaggio, messa in opera, manutenzione.

Tuttavia il progresso nella diffusione, nonostante le apparenze, non è veloce come prospettato, sia in campo professionale sia residenziale, per ragioni sia tecniche che di tipo socio-economico. Ma esiste anche un problema di base: spesso i grandi progetti di illuminazione per interni ed esterni si affidano infatti a sorgenti tradizionali semplicemente perché se ne ha maggiore esperienza e conoscenza.

Nella Figura 143, un confronto (Philips Lighting) di 3 tecnologie usate in illuminazione stradale: LED, lampade a ioduri metallici a bulbo ceramico e lampade a induzione.

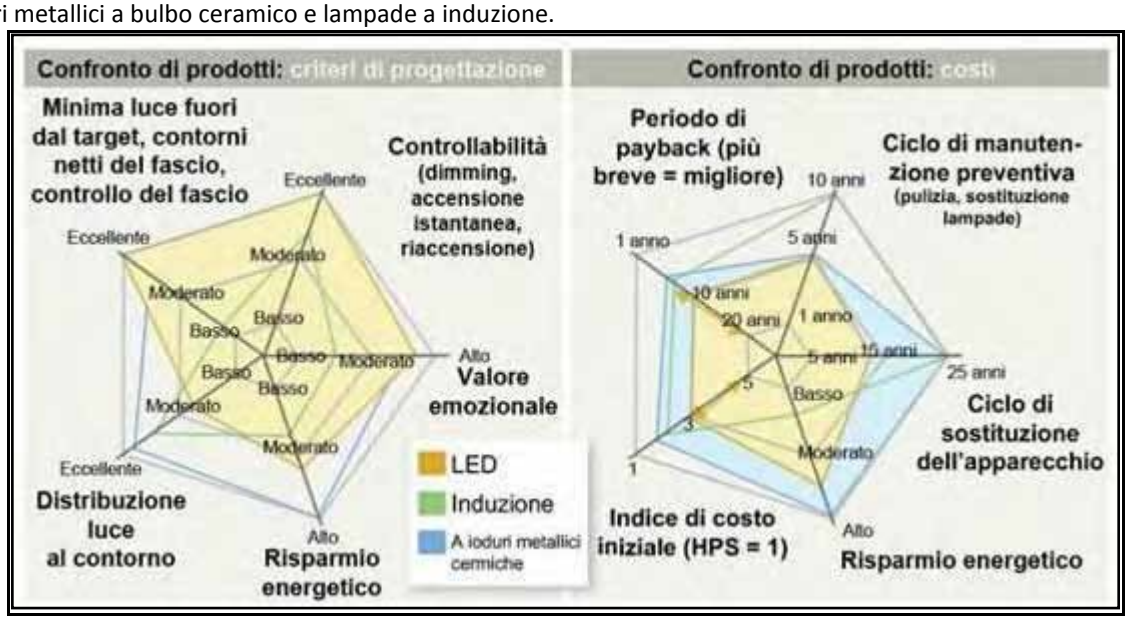


Figura 143. Tecnologie per illuminazione di esterni a confronto (Philips Lighting)

La qualità dell'illuminazione è fondamentale. Se per qualità dell'illuminazione intendiamo non solo il tradizionale concetto legato allo svolgimento del compito visivo e alle situazioni di "discomfort", ma un concetto più esteso, anche in relazione all'aspetto dello spazio, degli ambienti e dei volti, che può essere influenzato in modo significativo dalle sorgenti LED, allora la valutazione della qualità dell'illuminazione con sorgenti tradizionali e a LED non può essere basata su criteri identici. Alcuni parametri rilevanti per la valutazione della qualità dei sistemi LED:

- la visibilità sul compito visivo
- l'abbagliamento
- la resa cromatica
- lo sfarfallamento e l'effetto stroboscopico
- l'aspetto dell'ambiente e dei volti
- la stabilità del colore

Per questi parametri, una serie di indicazioni per ottenere buona qualità di illuminazione:

- Visibilità sul compito. E' necessaria una buona uniformità della luce sul piano di lavoro, rispettando i limiti di proporzioni tra le diverse aree del campo visivo già utilizzati per l'illuminazione con sorgenti tradizionali.
- Abbagliamento. Esistono due principali tipi di abbagliamento, quello che causa discomfort all'interno del campo visivo, e quello causato da elementi che si trovano al di fuori di esso. Per il primo tipo di abbagliamento, il metodo UGR, comunemente utilizzato, potrebbe essere applicabile anche per i LED. Per quanto riguarda il secondo tipo di abbagliamento, è necessario codificare un sistema unico per valutare l'abbagliamento in relazione ai sistemi di illuminazione LED, prendendo in considerazione tutte le variabili, comprese la luminanza e l'intensità luminosa.
- Resa cromatica. Il CRI, indice comunemente usato per le sorgenti tradizionali, non è generalmente applicabile per prevedere la resa cromatica di sorgenti LED bianche e che il suo utilizzo può causare grossolani errori di valutazione (questo aspetto è trattato in dettaglio in altri punti del presente rapporto).
- Sfarfallamento ed effetto stroboscopico. I driver LED, e in particolar modo quelli a corrente alternata, possono

produrre sfarfallamento come conseguenza della variazione nel tempo del flusso emesso. La IESNA ha fornito due metodi di valutazione dello sfarfallamento, ma entrambi i metodi non sono completi. Il dimming può inoltre accentuare la percezione dello sfarfallamento: IES raccomanda una frequenza minima di output del driver, ma questo non basta a garantire la qualità dell'illuminazione. I LED possono creare anche effetti stroboscopici. Poiché non sono attualmente disponibili per i LED metodi di valutazione per nessuno dei due problemi, sarà necessario provvedere a codificarli.

- Aspetto dell'ambiente e dei volti. La forte direzionalità dei LED, che permette di dirigere il fascio luminoso esattamente sul piano di lavoro senza diffondere la luce al contorno e che è solitamente considerata un punto di forza, diviene un elemento di debolezza nel momento in cui si generano eccessivi contrasti di luminanza tra piani di lavoro e piani non illuminati (es. piani verticali), per cui si generano forti contrasti all'interno del campo visivo, alterando la percezione dello spazio. La IESNA ha stabilito un limite di illuminamento minimo sui piani verticali all'interno degli uffici, ma questo non è sufficiente a garantire la qualità dell'aspetto di uno spazio. Per una valutazione dell'aspetto di un ambiente è importante considerare una certa fascia orizzontale attorno all'orizzontale e anche la luminanza del soffitto. Inoltre si pone la questione del riconoscimento dei volti e della comunicazione facciale, compiti che implicano che i piani verticali all'interno di un ambiente siano sufficientemente illuminati, e che l'illuminazione non sia né troppo diretta né troppo diffusa. Per la valutazione della percezione dell'ambiente esistono validi metodi di valutazione, mentre per la resa dei volti è necessario introdurre un nuovo parametro, o revisionare i quelli esistenti.
- Stabilità del colore. I LED nascono con lunghezza d'onda di picco variabile a causa dei processi produttivi e possono ulteriormente variarla quando sono dimmerati. Nel 2004 Narendran ha proposto delle differenze di colore massime, stabilendo che differenze maggiori sono visibili a oltre il 10% delle persone e quindi inaccettabili e ha fornito criteri validi e applicabili, differenti per applicazioni 1) dove i LED sono posizionati affiancati e direttamente alla vista o dove questi apparecchi servono per illuminare una scena bianca oppure 2) dove i LED non sono direttamente visibili o dove si devono illuminare scene complesse e colorate.

Valutazione dell'affidabilità degli apparecchi di illuminazione a LED

Un apparecchio di illuminazione a LED è composto da un sistema meccanico ed elettronico e risulta piuttosto complesso:

- Sorgenti LED.
- Sistemi di dissipazione del calore.
- Dispositivi di alimentazione elettrica.
- Ottiche per il controllo e la distribuzione del flusso luminoso.
- Sistemi di supporto meccanico e di fissaggio delle altre componenti e dell'intero apparecchio al palo.

Poiché si stima che i LED abbiano una lunga durata, tutti i componenti dell'apparecchio di illuminazione dovranno avere la medesima durata per non limitare la durata dell'intero prodotto. Il calore deve essere estratto dalla giunzione mediante un dissipatore, fissato in modo opportuno al PCB che ospita i componenti con sistemi di fissaggio meccanici o adesivi e collanti. La temperatura di giunzione dipende anche dal corretto valore di corrente di alimentazione. I componenti ottici (schermi, lenti, riflettori) devono essere in grado di sopportare l'esposizione a luce intensa e al riscaldamento, senza ingiallimento, rotture, oppure altri fenomeni di degrado. Materiali riflettenti utilizzati per le ottiche devono mantenersi nel corretto posizionamento rispetto alle sorgenti e mantenere una elevata efficienza ottica. La realizzazione dell'apparecchio deve essere ben fatta. Ci sono fenomeni di invecchiamento naturale dei vari componenti, ma anche una pulizia fatta con detergenti aggressivi può degradare l'apparecchio. L'affidabilità complessiva di un apparecchio a LED può essere immaginata come il prodotto delle affidabilità di ciascuna delle affidabilità delle singole componenti. La durata dell'intero sistema sarà determinata dal componente che avrà la minor durata. E' importante notare la differenza tra la "vita utile" e la "durata" dell'apparecchio: la vita utile si riferisce alla capacità di mantenere il flusso luminoso nel tempo ed è rappresentata dal numero di ore per cui l'apparecchio sarà in grado di funzionare fornendo un flusso luminoso sufficiente per una data applicazione. Inoltre, poiché tutti gli elementi di un apparecchio LED sono interdipendenti, le prestazioni operative possono essere testate solamente sull'intero apparecchio.
Mantenimento del flusso luminoso: la definizione di durata in vita del singolo componente LED (L70, cioè il periodo in cui il 50% della popolazione testata ha flusso luminoso finale almeno 70% dell'iniziale) può essere estesa all'intero apparecchio, ma questo non sembra essere sufficiente per una corretta stima del tempo di vita del prodotto.
Color shift: si vuole che l'apparecchio a LED mantenga le sue caratteristiche cromatiche nel tempo. Il degrado del colore può esser causato sia da un invecchiamento dei LED sia da dalla progettazione del prodotto e dal processo produttivo. L'intero apparecchio va testato periodicamente, ma non c'è una procedura accettata universalmente per questa misura e soprattutto per poter effettuare questa misura in tempi ragionevoli (se un apparecchio ha una vita di 20000 ore, non è pensabile una verifica che duri 3 anni).

Mortalità infantile e difetti di progetto: è compito del costruttore assicurarsi che il prodotto non raggiunga il mercato nella fase di mortalità infantile e questo fa si che sul mercato il prodotto abbia una vita utile caratterizzata da un tasso di mortalità costante (ma casuale).

Nei report tecnici i fattori su elencati sono descritti nei dettagli e viene presentata una serie di modelli per la stima del tasso di affidabilità.

Analisi di indici di resa cromatica esistenti

Nel 1965 la CIE propose una procedura per specificare le proprietà di resa visiva di una sorgente di luce, per misurare quanto una sorgente luminosa preserva l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa (metamerismo): il color rendering index (CRI).

Il CRI è usato anche oggi, ma con l'avvento di nuovi tipi di illuminazione ha mostrato i suoi limiti: in diversi casi esso non restituisce una misura in linea con la percezione del nostro sistema visivo. In particolare il CRI non è adatto a valutare la risposta visiva sotto sorgenti di luce a banda stretta, come alcuni tipi di LED bianchi. Ci sono sorgenti con CRI basso, ma un piacevole aspetto visivo (visual appeal) e una conservazione dell'apparenza cromatica superiore a quella indicata dal CRI. La stessa CIE oggi suggerisce di non utilizzare il CRI per i LED e di cercare metodi nuovi. Sono stati proposti metodi alternativi:

- Rank-order based color rendering index (RCRI) (Bodrogi, Bruckner, & Khanh).
- Feel of contrast index (FCI) (Hashimoto, Yano, & Nayatani).
- CRI-CAM02UCS (Li, Luo, & Li).
- Color quality scale (CQS) (Davis & Ohno).
- Harmony rendering index (HRI) (Szabo, Bodrogi, & Schanda).
- Categorical color rendering index (CCRI) (Yaguchi, Endoh, Moriyama, & Shioiri).
- Memory CRI (MCRI) (Smet, Forment, Hertog, Deconinck, & Hanselaer).
- R96a.
- CR100 (Geisler-Moroder, & DürOur).

In conclusione, il metodo perfetto per la misura della resa cromatica probabilmente non esiste. Ognuna delle metriche esistenti ha pregi e difetti. Un approccio percettivo alla resa cromatica, primo passo per una definizione che tenga conto della sorgente ma anche della realtà illuminata, è stato affrontato nella presente annualità ed è presentato più avanti. E' ancora necessario un grande lavoro di ricerca in questo campo.

Misure spettrali di sorgenti tradizionali e di sorgenti e apparecchi a LED

Sono state eseguite misure della distribuzione spettrale nello spazio (SPD) su sorgenti LED a luce bianca, di cui è stato calcolato il CRI e il CQS, oltre alla temperatura di colore (CCT). Sono stati confrontati i differenti indici.

Il CQS risulta tra i più accreditati a sostituire il CRI. Nella metrica CQS si continua ad utilizzare un unico indice per definire la resa cromatica delle sorgenti. Se da un lato questo comporta degli inevitabili compromessi legati alla voluta semplificazione, dall'altro questa impostazione permette di mantenere uno stretto legame con lo storico CRI. Sono stati scelte tipologie di LED usate in applicazioni stradali e LED array: 6 modelli di diversi produttori, a luce bianca a conversione delle lunghezze d'onda, cioè ottenuta con LED blu + fosforo giallo. Sono state testate differenti correnti di alimentazione (350-1000 mA) e in alcuni casi sono state inserite anche ottiche secondarie per verificare la variazione in termini di coordinate cromatiche e di resa del colore nel caso di utilizzo di lenti.

E' stata misurata l'irradianza spettrale (W/m^2) emessa dai LED in asse (la normale alla superficie sensibile dello strumento è stata allineata con la direzione di massima intensità luminosa emessa dalla sorgente).

Non si sono registrate variazioni significative nella predizione della capacità di valutare la resa cromatica da parte dei due indici (CQS e CRI). Questo risultato dipende essenzialmente dall'emissione spettrale delle sorgenti considerate; differenze maggiori potrebbero riscontrarsi qualora si utilizzassero ad esempio LED RGB. Molto interessante dal punto di vista applicativo (soprattutto nella illuminazione degli ambienti interni) appare la possibilità offerta dal nuovo indice di valutare la gamut area della sorgente in esame nello spazio L a*b* (CIELAB) e di porla a confronto con quella ottenuta dall'illuminante di riferimento. Un esempio di rappresentazione nello spazio CIELAB è riportato in Figura 144. Sono state effettuate misure su una serie di sorgenti luminose tradizionali (a incandescenza e fluorescenti) e innovative (LED), al fine di produrre una serie di considerazioni basate sul confronto degli spettri di emissione misurati (Tabella 39).
Poiché è stata ampiamente dimostrata l'interrelazione tra la composizione spettrale della luce a cui gli esseri umani sono esposti e le loro risposte psicofisiologiche, appare necessaria un'analisi spettrale esauriente delle tipologie di sorgenti in commercio per mettere in relazione la loro composizione spettrale con gli effetti che esse generano sull'essere umano.

La composizione spettrale della luce emessa dalle varie sorgenti testate è fortemente variabile: emissione continua con forte prevalenza di lunghezze d'onda del rosso per sorgente a incandescenza, distribuzioni spettrali con picchi molto ristretti per comuni lampade fluorescenti, distribuzioni molto variabili con picchi più ampi per sorgenti a LED con fosfori, le più comuni in commercio.

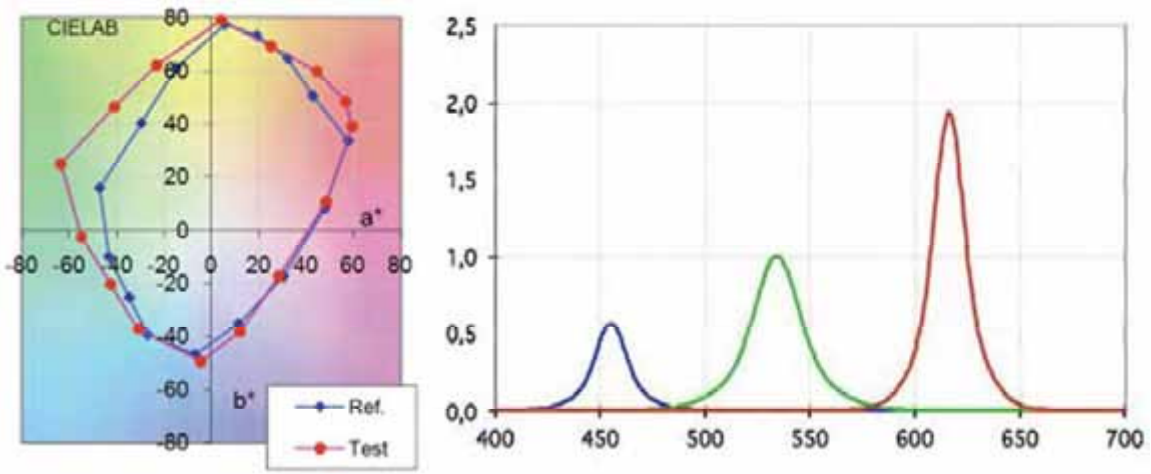


Figura 144. SPD di un LED RGB e rappresentazione nello spazio CIELAB

Tabella 39. Le tipologie di sorgenti testate

Sorgente	CCT	Potenza	Flusso
Lampada a incandescenza	2676 K	60 W	710 lm
Lampada a incandescenza con vetro blu	3593 K	100 W	700 lm
Lampada fluorescente a luce calda	2824 K	24 W	1450 lm
Lampada fluorescente a luce fredda	6586 K	24 W	1416 lm
bulbo LED 1	5590 K	8 W	
bulbo LED 2	5598 K	3 W	
bulbo LED 3	2703 K	2,5 W	
bulbo LED 4	3175 K		
bulbo LED 5	6035 K	6 W	
Apparecchio LED da incasso	5896 K		
dati del costruttore (dove disponibili)			

Sono stati ricavati i diagrammi "circadiani" per alcune delle sorgenti misurate. Basati sulla curva di sensibilità circadiana empirica individuata da L. Thapan nel 2002, tali grafici rappresentano la stimolazione che la specifica composizione spettrale potrebbe teoricamente avere sull'orologio biologico umano. Bisogna notare comunque che gli effetti indotti nell'uomo variano con una molteplicità di parametri molto difficile da valutare a priori, come la quantità di luce, la conformazione del campo visivo, la direzione dello sguardo, la sensibilità individuale alla luce, ecc.

Sperimentazione su resa cromatica e contrasto

Il CRI e in generale le valutazioni di resa cromatica hanno un altro limite, oltre a quelli di cui si è già discusso in precedenza: viene presa in considerazione la sorgente e non l'oggetto illuminato in sé, il quale ha certe caratteristiche, come forma, colore, posizione nello spazio in rapporto con gli altri elementi della scena, che possono influenzare il "contrasto" e quindi il modo in cui l'oggetto viene percepito. Ricordiamo che un aspetto fondamentale nella visione umana è il contrasto di luminanza. Il contrasto è una caratteristica difficilmente definibile dell'immagine, è un attributo sia fisico che percettivo. Misurare il contrasto è una parte importante nella valutazione di una sorgente luminosa. Una sorgente luminosa buona non solo garantisce il più possibile la resa cromatica degli oggetti ma garantisce anche un contrasto adeguato ad una visione confortevole.E' stata quindi svolta attività sperimentale per iniziare ad esaminare questi aspetti, importanti per definire una "buona" illuminazione:

- una analisi sullo stato dell'arte dei diversi metodi alternativi per la misura del contrasto percepito e della resa cromatica

- calcoli di contrasto su immagini digitali, con elaborazione di un metodo originale per stimare le componenti locali e globali del contrasto; l'uso di immagini digitali è un primo passo per l'analisi di scene reali
- realizzazione di un software per il calcolo del contrasto percepito
- test percettivi sul contrasto di immagini digitali, utilizzando 28 immagini digitali, per le quali è stato calcolato il contrasto con il metodo sopradetto e confrontato con le risposte degli osservatori
- sviluppo di un indice percettivo originale per la resa cromatica
- realizzazione di un software per il calcolo di diversi indici di resa cromatica esistenti e del nuovo indice sviluppato
- test percettivi sulla resa cromatica della sorgente, su diversi tipi di sorgente (fluorescenti, alogene, LED). Sono stati confrontati il CRI classico e altri indici alternativi esistenti con il nuovo indice, ovvero è stato confrontato l'indice di resa cromatica con la valutazione da parte dell'osservatore della capacità dell'illuminante di mantenere il colore degli oggetti (metamerismo dell'illuminante). Sono stati utilizzati campioni del Macbeth Color Checker.
- test percettivi sul materiale illuminato, per testare la conservazione del metamerismo della riflettanza sotto l'illuminante di test. Sono stati utilizzati un Macbeth Color Checker originale e uno riprodotto con scanner, per simulare oggetti apparentemente identici nella luce naturale ma con proprietà riflettenti diverse.

I test eseguiti sono una base per ragionare sull'utilizzo di una o più metriche di contrasto per la misura dell'indice di resa cromatica non più globale, a prescindere dalla scena di utilizzo dell'illuminante, ma calato in una scena reale ed esaminato da un punto di vista scelto.

Test sulla resa cromatica della sorgente

I test percettivi si sono svolti misurando le risposte degli osservatori che osservavano i campioni colore illuminati sotto la sorgente da testare e sotto una sorgente di riferimento. Il tutto in un ambiente completamente buio, dopo opportuno adattamento del sistema visivo dell'osservatore. La valutazione è in 2 step: il primo qualitativo e il secondo quantitativo. E' stato quindi individuato un indicatore percettivo per la resa cromatica, basato sulle osservazioni.

Test sul metamerismo della riflettanza

I test percettivi si sono svolti misurando le risposte degli osservatori che osservavano i diversi campioni colore illuminati sotto la stessa sorgente. Il tutto in un ambiente completamente buio, dopo opportuno adattamento del sistema visivo dell'osservatore. Il test sul metamerismo della riflettanza non è stato ancora eseguito con sorgenti LED. Si conferma quindi la necessità di ricerche per una nuova definizione della resa cromatica.

Il contrasto percepito

Nessuna misura di contrasto esclusivamente globale è in grado di approssimare la sensazione di contrasto del nostro sistema visivo, che è composto sia da una componente globale relativa alla scena osservata, sia da varie componenti locali che derivano dalla posizione reciproca degli oggetti nella scena.

E' stato elaborato un metodo per il calcolo del contrasto percepito, partendo da immagini digitali. La misura è in grado di stimare sia le componenti globali che locali del contrasto in maniera semplice ed efficace. L'idea base è quella di calcolare un contrasto locale semplificato, sotto-campionando l'immagine su vari livelli e iterando l'applicazione del contrasto base sui vari livelli. Alla fine i valori ottenuti su ogni livello vengono ricombinati per ottenere una misura unica. Un primo test oggettivo è stato eseguito, per verificare l'andamento della misura in funzione della variazione del contrasto sulla stessa immagine. Sono state scelte a questo scopo immagini con caratteristiche differenti, di cui sono state prodotte delle versioni a contrasto modificato. E' stato applicato il metodo di calcolo sopra detto. Il risultato è che la misura di contrasto rileva in modo ragionevolmente lineare le variazioni di contrasto all'interno della medesima scena.

Per testare la correlazione della misura rispetto al contrasto percepito anche al variare dell'immagine e del tipo di contenuto, è stato eseguito un test in cui diverse immagini - a cui non è stata apportata alcuna modifica di contrasto - sono state mostrate a diversi soggetti su un monitor CRT opportunamente calibrato in ambiente buio. La prova è stata ripetuta con immagini raggruppate, non raggruppate, a colori e in bianco e nero. Agli osservatori è stato chiesto di disporre in ordine di contrasto le immagini. E' stato calcolato in contrasto con il metodo sopra detto.

E' stato fatto anche un test preliminare per la quantificazione del cambio di contrasto al cambiare dell'illuminante, con campioni del Macbeth ColorChecker. Dai test sul contrasto percepito è emerso che i risultati percettivi e computazionali non sempre sono in accordo. Questo è dovuto anche al fatto che la definizione di contrasto è ambigua: gli osservatori hanno un'idea intuitiva di contrasto; alcuni di essi dichiarano di valutare il contrasto in

maniera globale, altri di prestare attenzione ai dettagli o alla nitidezza dell'immagine (e quindi gli effetti locali) o altri elementi. Rappresentare queste diverse concezioni di contrasto con un singolo numero risulta quindi molto difficile.

Sperimentazione sulla visualizzazione in realtà virtuale

Figura 146. Il Teatro Virtuale all'Università di **Milano**

Si tratta di una attività per acquisire conoscenze in questo campo e anche un potenziale aiuto ai progettisti e ai potenziali decisori. L'aspetto innovativo è la possibilità di "navigare" (cioè "muoversi dentro", "camminare") in un modello dell'ambiente oggetto dello studio illuminotecnico (ad esempio una piazza) e "vedere" l'ambiente illuminato con tutto il campo visivo, ricevendone quindi una impressione più realistica che dall'osservazione di una superficie piana e di piccole dimensioni (uno schermo di PC, uno stampato). Il processo consiste nell'utilizzo di un software per la modellazione 3D, l'interfacciamento del modello con la piattaforma illuminotecnica (LITESTAR) e quindi il passaggio dell'output della simulazione illuminotecnica al motore di rendering per la visualizzazione interattiva in modalità stereoscopica presso il Teatro Virtuale (Figura 146). Nel file di interscambio sono presenti la geometria rappresentante la scena soggetto del calcolo illuminotecnico, le texture assegnate ad ogni solido, oltre alle light map contenenti i risultati dei calcoli illuminotecnici relativi alla componente diffusiva. La situazione scelta per la simulazione è la piazza Italia del Comune Pilota Marcallo con Casone (MI).

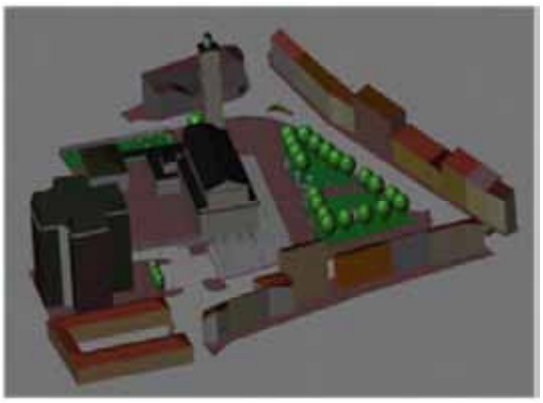


Figura 145. Modello Piazza Italia a Marcallo

La piazza è stata modellata (Figura 145) nei suoi elementi architettonici (chiesa, case, alberi, arredi urbani...), utilizzando il software BLENDER, e sono state inserite le caratteristiche illuminotecniche dell'impianto attuale utilizzando LITESTAR 4D. Il modulo software per la navigazione e visualizzazione nel Teatro Virtuale è stato implementato e testato su versioni di prova del modello.

E' stato realizzato un evento preliminare di studio sul modello della piazza, che è servito per mettere a punto tutto il processo di interscambio dei dati, i percorsi del "pedone" che cammina virtualmente nella piazza e altri elementi.

Software per visualizzazione 3D di solidi fotometrici

I dati fotometrici degli apparecchi o sorgenti di illuminazione sono forniti in vari formati, contenenti le informazioni generali e, per una serie di angoli nello spazio, le relative intensità luminose, normalizzate. Il cosiddetto "solido fotometrico" rappresenta la "forma" della luce emessa dall'apparecchio o sorgente: dal centro ottico partono una serie di "raggi" nei vari angoli di emissione considerati, di lunghezza proporzionale alle intensità emesse.

Di queste informazioni, di tipo spaziale, viene data in genere, anche nei cataloghi dei produttori, una rappresentazione bidimensionale tramite diagramma polare o cartesiano: qui sono riportate le curve di intensità per alcuni piani particolarmente importanti.

I software per la progettazione illuminotecnica usano tutte le informazioni del solido per simulare la situazione illuminotecnica in esame e alcuni di essi offrono anche una rappresentazione tridimensionale del solido. Tuttavia, esistono altri software di modellazione 3D che non possono importare gli specifici formati dei dati fotometrici. Una visualizzazione 3D del solido può essere utile proprio per visualizzare in modo intuitivo le caratteristiche di apparecchi e sorgenti.

E' stato quindi realizzato in ENEA un piccolo software che, partendo da un solido fotometrico in formato Eulumdat, produce un file di tipo.obj (formato sviluppato da Wavefront), un formato di rappresentazione geometrica open, tra i più comunemente usati nella Computer Graphics 3D.

Analisi dell'impatto dell'illuminazione artificiale notturna sull'ambiente naturale

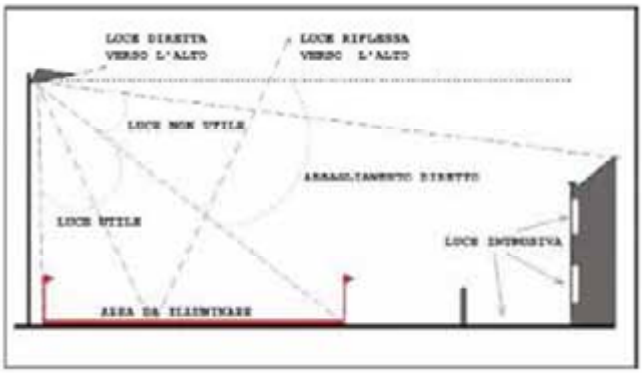
L'inquinamento luminoso è un problema ambientale e tutti gli effetti. Il cielo è parte della natura e del paesaggio che ci circonda e merita di essere salvaguardato. Ma, oltre all'aspetto energetico ed ambientale, c'è anche una

considerazione economica: tutta la luce dispersa al di fuori delle zone da illuminare, compresa quella che finisce in cielo, costituisce uno spreco di energia elettrica.

Inquinamento luminoso: in senso stretto è costituito dagli effetti della dispersione nel cielo notturno di luce prodotta da sorgenti artificiali. Di solito si tratta di impianti di illuminazione esterna notturna, ma in alcuni casi l'inquinamento luminoso può essere prodotto anche da illuminazione interna, ad esempio l'illuminazione di vetrine.

Inquinamento ottico: è prodotto da quella luce, dispersa da una sorgente artificiale, che illumina direttamente un'area o un soggetto che non è richiesto di illuminare.

In generale comunque si considera "inquinamento luminoso" una qualunque alterazione (Figura 147) della quantità naturale di luce presente di notte nell'ambiente esterno, dovuta ad immissione di luce di cui l'uomo abbia responsabilità, al di fuori degli spazi che è necessario illuminare, pertanto, anche l'inquinamento ottico, è compreso nel concetto di inquinamento luminoso.



Contributi all'inquinamento luminoso:

irraggiamento diretto verso la volta celeste;

diffusione della luce emessa dall'atmosfera nel percorso punto luce – superficie da illuminare;

riflessione e diffusione da parte delle superfici illuminate.

Figura 147. Schematizzazione dei contributi all'inquinamento luminoso

Produce inquinamento luminoso qualunque dispersione di luce nell'ambiente, sia da parte delle sorgenti di luce che da parte delle superfici illuminate, ivi compresa la dispersione di luce prodotta per altri scopi, inclusa la luce prodotta da sorgenti naturali ma di cui l'uomo abbia responsabilità. Produce altresì inquinamento luminoso ogni immissione volontaria ma ingiustificata di luce nell'ambiente. Tutto l'inquinamento luminoso che non sia motivato da ragioni di sicurezza e necessità dovrebbe essere il più possibile evitato. Purtroppo ad oggi si tende a considerare l'inquinamento verso il cielo, trascurando quello verso tutti i sistemi naturali; uomo compreso, e gli effetti (spesso non noti) che tale inquinamento comporta.

Il tema "inquinamento luminoso" va comunque affrontato da più punti di vista, poiché altre tematiche sono ad esso correlate con implicazioni ed aspetti anche molto differenti, quali il risparmio energetico, la qualità degli spazi illuminati e quindi la qualità della luce, la sostenibilità ambientale. La progettazione illuminotecnica deve orientarsi verso l'obiettivo di garantire la qualità dell'ambiente illuminato, in termini di illuminamento, di distribuzione delle luminanze, di uniformità, e in termini di fedele restituzione cromatica degli oggetti illuminati.

Limitazione dell'inquinamento luminoso, qualità della luce e risparmio energetico non sono necessariamente sinonimi. Le sorgenti luminose che presentano minori elementi di criticità nei confronti dell'inquinamento luminoso sono quelle che, generalmente, sono dotate di uno spettro di emissione molto limitato e che, di conseguenza, non sono in grado di garantire adeguati livelli di qualità della luce: è necessario valutare attentamente tutte le esigenze da soddisfare con l'intervento illuminotecnico, in modo da determinare di volta in volta quelle che risultano prevalenti.

Tralasciando il tema dell'inquinamento luminoso come disturbo alle osservazioni astronomiche, esaminiamo le conseguenze dell'inquinamento luminoso sull'ambiente naturale. L'alternarsi di giorno e notte, luce e buio, è un fattore fondamentale per la vita di piante e animali, essere umano compreso. Quando si altera questo equilibrio con l'immissione di luce artificiale, c'è il rischio di disturbo. Un esempio è l'accrescimento anomalo delle piante ai bordi degli svincoli stradali. Alcuni studi hanno evidenziato l'influenza dell'illuminazione pubblica su alcuni cicli vitali degli animali, quali riproduzione e migrazione.

Gli effetti della luce nell'ambiente naturale sono difficilmente quantificabili e finora sono state fatte poche ricerche su questo argomento. La raccomandazione CIE 150/2003 presenta una panoramica degli effetti negativi dell'inquinamento luminoso su flora e fauna.

Quali tecnologie per la riduzione dell'inquinamento luminoso in relazione all'ambiente naturale? La maggior parte dei componenti utilizzati per l'illuminazione, se non opportunamente inseriti all'interno di una metodologia

progettuale finalizzata al raggiungimento di un elevato livello di qualità, costituisce un potenziale fattore di incremento dell'inquinamento luminoso. Gli stessi componenti, se progettati, realizzati e gestiti in modo corretto, possono altresì concorrere al controllo dell'inquinamento luminoso e alla riduzione del consumo energetico. I componenti dell'illuminazione presi in considerazione sono: sorgenti luminose, apparecchi di illuminazione, impianti di illuminazione, dispositivi di gestione e controllo. Una serie di indicazioni progettuali su questi argomenti si trova nei report tecnici.

Valutazione di impatto ambientale di sistemi di illuminazione

Si propone a questo punto una metodologia per la valutazione dell'impatto ambientale generato dall'illuminazione artificiale notturna sull'ambiente naturale. Tale approccio può essere utilizzato come strumento di supporto ai decision makers e può essere utilizzato sia in forma qualitativa che quantitativa: sono proposte delle schede, nelle quali per ogni componente tecnologico della sorgente luminosa artificiale considerata vengono valutati i singoli fattori di impatto ambientale attraverso una scala di valori. Il risultato finale è la realizzazione di un sistema di valutazione globale, che esprime l'entità delle eventuali mitigazioni da attuare in caso di giudizio non accettabile.

Il modello di calcolo per la valutazione di impatto ambientale si presenta in forma matriciale, composto dai seguenti campi:

- Valutazione Componenti (VC).
- Valutazione Layout (VL).
- Valutazioni Globali (VG):
  - Fattore ad Impatto Massimo (FIM).
  - Impatto Medio Pesato (IMP).
  - Entità Mitigazione (EM).
  - Accettabilità.

Il sistema di illuminazione artificiale può essere costituito da un certo numero n di componenti (da C1 a C8), oppure da un unico componente (C_{Tot}). Vengono inseriti punteggi (0= impatto nullo… 6= impatto alto) per le voci opportune (Tabella 40) e viene effettuata mediante media pesata dei punteggi tramite un opportuno algoritmo e infine sono elaborate le valutazioni globali.

Tabella 40. Matrice dei fattori e dei componenti determinanti la valutazione di impatto VL

IMPATTO AMBIENTALE													
	Valutazioni Componenti (VC)								*Valutazioni Layout (VL)*			*Valutazioni Globali (VG)*	
Fattori	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C_{Tot}	Media Pesata	Giudizio	Fattore ad Impatto Massimo (FIM)	4 Medio
Atmosferico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nullo		
Acustico	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	MoltoBasso	Impatto Medio Pesato (IMP)	4 Medio
Idrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nullo		
Suolo e sottosuolo	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	Medio	Entità Mitigazioni (EM)	Apprezzabile
Flora e fauna	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	Medio		
Paesaggio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nullo	ACCETTABILITA'	CON RISERVA
Altro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nullo		

Illuminazione urbana e scenari di progettazione

Nell'ambito del progetto urbano l'illuminazione assume un ruolo fondamentale, perché è in grado di esaltare e rendere evidenti aspetti fondamentali di un ambiente, di un edificio, di una strada, etc. Inoltre è uno strumento in grado di cambiare totalmente lo scenario di edifici e piazze, senza andare ad alterarne le forme, donando un'immagine in grado di far capire come si può trasformare un luogo di notte rispetto a quello che si vive durante le ore diurne. Per diversi anni l'illuminazione urbana è stata considerata come uno strumento di semplice funzionalità, in grado di garantire esclusivamente sicurezza e orientamento per i cittadini. Oggi essa deve intervenire nell'ambiente urbano in modo tale da diventare l'artefice di un'identità culturale e dell'interazione sociale. L'importanza di ottenere un "know-how" in questo campo è fondamentale per avere una profonda conoscenza tecnica e progettuale è aspetto essenziale. Sono stati quindi esaminati gli aspetti che entrano in gioco nel progetto dell'illuminazione urbana, caratterizzando in particolare le tipologie di scenari che si possono realizzare attraverso un utilizzo consapevole degli strumenti progettuali finalizzati anche all'ottenimento di

un'ottimizzazione dei consumi energetici. I parametri fondamentali nel progetto dell'illuminazione urbana: sicurezza, inquinamento luminoso e risparmio energetico.

LUCE NATURALE DIURNA	LUCE ARTIFICIALE NOTTURNA
Visione panoramica Visione localizzata	Visione generale Visione localizzata
Alta acuità visiva	Bassa acuità visiva
Basso contrasto di soglia	Alto contrasto di soglia
Oggetti a minore luminanza rispetto alla luminanza dei fondali	Oggetti a maggiore luminanza rispetto alla luminanza dei fondali
Parti esterne degli edifici a luminanza maggiore rispetto alle parti interne	Parti interne degli edifici a luminanza maggiore rispetto alle parti esterne
Direzioni prevalenti dei raggi luminosi "alto-basso"	Direzioni prevalenti dei raggi luminosi "basso-alto"
Ombre attenuate	Ombre marcate
Linee d'ombra parallele	Linee d'ombra divergenti
Variabilità delle luminanze e delle tonalità di luce	Regolazione, parzializzazione, automazione dell'impianto di illuminazione, percezione dei colori in funzione della luminanza di adattamento e della ripartizione spettrale della luce emessa dagli apparecchi

Figura 148. Differenze tra le condizioni di visione diurna e notturna

Bisogna tener presenti le differenze tra le condizioni di visione di giorno e di notte.

Ampio spazio è dedicato alla telegestione dell'impianto di illuminazione e alle potenzialità dell'illuminazione pubblica a veicolare servizi a favore della cittadinanza, attraverso lo sfruttamento dei lampioni come rete di erogazione di servizi "smart city".

Una serie di sensori wireless o via onde convogliate dà vita ad un dialogo con diversi servizi per i cittadini, tra cui:

- Sistemi di collegamento WI-FI: possibilità per i cittadini di collegarsi alla rete internet.
- Telelettura delle utenze domestiche: i contatori dell'acqua, del gas possono essere telemisurati e telegestiti.
- Controllo e movimenti dei trasporti pubblici: possibilità di sapere in tempo reale tutti gli spostamenti e i tempi di attesa dei mezzi pubblici.
- Realizzazione di un catasto dell'energia: possibilità di conoscere i sistemi di produzione di energie rinnovabili e quindi di poterle definire e quantificare.
- Health care: attraverso dei sistemi dotati di sensori è possibile la telelettura dei parametri vitali delle persone, specie quelle anziane, anche al di fuori delle mura domestiche.
- Tracciabilità di persone, animali, oggetti (ad esempio: biciclette).
- Informazioni in tempo reale sui parcheggi: nodi sensore a basso consumo, inseriti nell'asfalto, possono informare sullo stato di occupazione di un parcheggio.
- Controllo dell'irrigazione pubblica.
- Applicazioni turistiche: possibilità di offrire informazioni di carattere turistico specifiche e localizzate, ad esempio attraverso sensori alloggiati in monumenti, così da comunicare a chi si avvicina informazioni di carattere culturale e turistico.
- Raccolta dei rifiuti urbani: possibilità da parte del sistema di avvisare quando i cassonetti sono pieni, di conseguenza si ottiene un'ottimizzazione dei percorsi dei camion di raccolta.
- Ricarica batterie veicoli elettrici: i lampioni si trasformano in centrali di ricarica.
- Censimento del traffico: possibilità di conteggiare i passaggi dei veicoli inviando in tempo reale le informazioni per il censimento e le statistiche sul traffico.
- Prevenzione e monitoraggio dei furti di auto: sensori alloggiati nelle autovetture possono essere utilizzati per tracciare i propri autoveicoli.
- Controllo delle vibrazioni e oscillazioni negli edifici storici per un monitoraggio continuo.
- Prevenzione degli incendi: possibilità di rilevare incendi e fumo con conseguente comunicazione dell'allarme.
- Rilevazione di agenti inquinanti e controllo dell'inquinamento.
- Informazioni sulle condizioni e sulle previsioni meteo: lettura di pluviometri, anemometri, nivometri, etc.
- Statistiche generali su tutto quello che succede all'interno della città.

Figura 149. Lampione come punto di controllo di tutti i servizi pubblici (Minos system – UMPI **elettronica)**

La progettazione dell'illuminazione pubblica ha a disposizione il fondamentale strumento del PRIC, di cui si parla diffusamente nei report tecnici e nelle Linee Guida Lumière: nel caso in cui il PRIC non fosse adottato dall' amministrazione comunale, il progettista si troverebbe infatti a dover affrontare un lavoro molto più approfondito, a dover studiare quindi non solo l'area da illuminare, ma anche tutto il contesto urbano in cui si trova, per non cadere nell'errore di realizzare un tipo di intervento fine a se stesso. Tra gli scenari dell'illuminazione urbana, i principali sono:

- aree a verde pubblico e privato;
- ingressi, percorsi pedonali e parcheggi;
- piccoli e grandi strutture per impianti sportivi e manifestazioni;
- facciate, edifici, architetture in generale;
- monumenti, sculture, opere d'arte;
- fontane, piscine e elementi d'acqua;
- sistema viario e stradale;
- gallerie, tunnel, sottopassaggi.

I report tecnici riportano una breve descrizione delle varie tipologie, con in evidenza i punti fondamentali su cui basarsi in fase di progettazione.
La progettazione stessa si deve articolare in:

- una prima fase di ricerca, in cui viene effettuata un'attenta analisi della città sotto tutti gli aspetti;
- una seconda fase fondata sulla strategia di illuminazione, che comprende tutte le problematiche legate alla luce (dall'inquinamento luminoso al risparmio energetico, fino alla scelta di apparecchi e sorgenti);
- la terza fase, detta di "implementazione" nella quale vengono considerati tutti i costi operativi, i tempi di realizzazione e i sistemi di manutenzione.

Il criterio fondamentale è che l'illuminazione deve essere concepita e erogata secondo le svariate tipologie illuminotecniche e impiantistiche, tramite sistemi quali i percorsi, i pedoni, i beni ambientali, etc. Il risultato è l'ottenimento di un'altra città: "la città notturna" che deve essere in grado di restituire una lettura complessiva del tessuto urbano, garantendo una migliore fruibilità degli spazi urbani, una sicurezza fisica e psicologica delle persone e una sicurezza per il traffico stradale.

Analisi dei sistemi integrati LED-fotovoltaico per applicazioni stradali

I LED, grazie alla loro caratteristica alimentazione a bassissima tensione, possono essere utilizzati non solo collegati alla rete elettrica ma mediante l'ausilio di batterie di accumulatori elettrochimici alimentati da fotovoltaico. Questo è utile per applicazioni stradali: infatti sono molteplici i punti nelle nostre arterie stradali non elettrificati, con numerosi problemi soprattutto in prossimità di svincoli o incroci in zone isolate.

Mediante l'uso dei LED ora la tradizionale luce lampeggiante arancione alimentata da accumulatori, può essere sostituita da un vero e proprio impianto di illuminazione dell'intero incrocio o svincolo a parità di accumulo, aumentando notevolmente la sicurezza della circolazione stradale in quei punti critici.

La possibilità quindi di rendere i punti luce energeticamente indipendenti e senza bisogno di interlacciamenti sembra essere una interessante potenzialità dovuta all'introduzione della tecnologia LED sul mercato, tecnologia che si abbina perfettamente dal punto di vista energetico con la ormai "tradizionale" soluzione fotovoltaica per la produzione di energia.

Nei report tecnici sono analizzati gli aspetti che entrano in gioco nel sistema LED – fotovoltaico descrivendo in particolare la tecnologia LED e fotovoltaica, le loro applicazioni nell'illuminazione urbana, attraverso l'analisi energetica e tecnico economica delle suddette tecnologie. Viene anche proposta l'analisi economico – energetica di un sistema integrato stand-alone, in confronto con un sistema tradizionale.

Progetto e di un prodotto di illuminazione: parte ottica e di design, funzioni innovative

La ricerca che ha portato al progetto e alla realizzazione prototipale di un apparecchio a LED innovativo parte da un caso studio, ovvero un contesto applicativo tipologico individuato nel comune pilota di Marcallo con Casone, che riassume, in piccola scala, una serie di caratteristiche urbane e storiche che possono essere replicate in tutti i piccoli comuni italiani della stessa tipologia. Si è deciso di concentrare l'attenzione sulla "urban beautification"

Al fine di limitare i casi studio a due tipologie specifiche, è stata identificata una serie di luoghi di interesse storico e culturale, centrali e interconnessi tra loro, situati in un contesto prevalentemente pedonale tra la chiesa principale e il palazzo del Comune.

Strategia di progetto

Tenendo conto delle normative di riferimento e ai contesti d'uso considerati, le configurazioni del progetto sono molteplici in quanto le possibili applicazioni, i contesti d'uso e le specifiche caratteristiche illuminotecniche sono conseguentemente diverse (Figura 150).

Stabiliti i requisiti illuminotecnici e il contesto di applicazione e fatta una ipotesi generale su che tipologie di curve fotometriche siano utili in base alle varie applicazioni, si è definito il concept centrale del progetto, ovvero la modularità della soluzione di illuminazione.

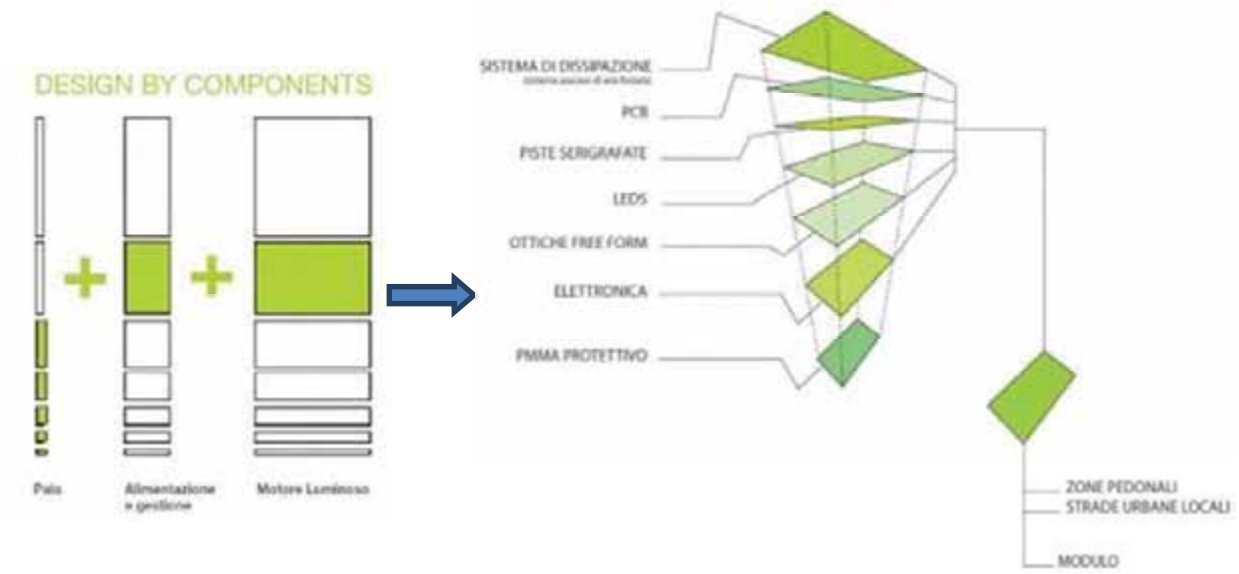


Figura 150. Rappresentazioni delle possibili configurazioni

Modularità vuol dire che il classico apparecchio di illuminazione viene frammentato in sotto insiemi, o moduli, che servano, una volta composti e combinati, a risolvere differenti situazioni applicative e quindi formulino diverse curve fotometriche in base alla necessità applicativa specifica. Il concetto può essere declinato in una serie di soluzioni progettuali dal punto di vista ottico molto diverse, che determinano diverse soluzioni progettuali e quindi diverse soluzioni estetico-formali dell'apparecchio finale.

In particolare, sono state vagliate in via preliminare due opzioni progettuali molto distinte, l'una che prevede l'utilizzo di LED Monochip ad alta efficienza equipaggiati con ottiche rifrangenti free-form e l'altra che consiste nell'utilizzo di sistemi ottici a rifrazione con LED multichip.

E' stata scelta la soluzione modulare realizzata con ottiche riflettenti free-form nel formato sistema puzzle, ovvero moduli che si combinano per ottenere la performance luminosa richiesta: questo al fine di declinare il concetto di modularità e di sistema di un apparecchio di illuminazione per esterni, elemento di innovazione tipologica rispetto ai tradizionali apparecchi, basato su tecnologie potenzialmente alla portata di tutti e facilmente applicabili.

Requisiti ottici

E' stato scelto l'utilizzo di luce bianca. Questa, oltre ad essere più gradevole e a rendere più gradevole la visione del contesto urbano, consente di abbassare di una categoria le strade secondo le norme in vigore e quindi, come conseguenza diminuire la quantità di luce che viene emessa sulle strade con efficienza energetica, risparmio sulle spese pubbliche e minore inquinamento luminoso verso i cieli stellati. E' stata scelta una CCT tra 4000 e 5000 K, con un CRI elevato, dato il contesto di utilizzo.

Per selezionare i LED, oltre alle informazioni di flusso luminoso ed efficienza energetica espresse dai datasheet dei produttori di LED, sono state effettuate verifiche in laboratorio in condizioni di lavoro diverse da quelle riportate nei suddetti datasheet.

Test sui componenti

Le misure di verifica effettuate in laboratorio sono state condotte su tre tipologie di LED con integrata lente stradale:

- PowerLED Monochip EDISON OPTO + 3 tipologie di lenti integrate.
- PowerLED Monochip CREE XP-G + serie lenti LEDIL strada.

- PowerLED Monochip OSRAM OSLON + serie lenti LEDIL strada.

Nei test effettuati in laboratorio si sono valutati i valori effettivi di flusso e di efficienza di tali LED alimentandoli con una tensione di circa 350 mA – 700 mA - 1050 mA con condizioni di dissipazione molto vantaggiose per tutto il tempo di misura con goniofotometro. Inoltre, le misure sono state effettuate sia in configurazioni ottiche diverse per poter valutare sia l'effettiva efficienza delle lenti rispetto ai LED sia l'effettiva curva fotometrica presentata dalle lenti (e la rispondenza di tale curva a quella espressa nei datasheet). Nel caso dei LED CREE e OSRAM sono stati dunque misura e le sorgenti con e senza lenti per osservare quale fosse la percentuale di assorbimento delle lenti (circa 6-10%) a prescindere dal flusso emesso dai singoli LED dei singoli produttori, in modo da valutare se ci fossero delle variazioni rispetto a produttori di LED diversi con la stessa Ottica.

Inoltre, ulteriori test sono stati effettuati inserendo una lastra in Policarbonato trasparente in modo da simulare la presenza di uno schermo di chiusura piatto. Tale inserimento ha determinato un assorbimento di circa il 10/15% che conseguentemente diminuisce in maniera molto elevata l'efficienza energetica del sistema ottico. Infine sono state fatte ulteriori simulazioni più accurate, anche tramite programmi di Raytracing.

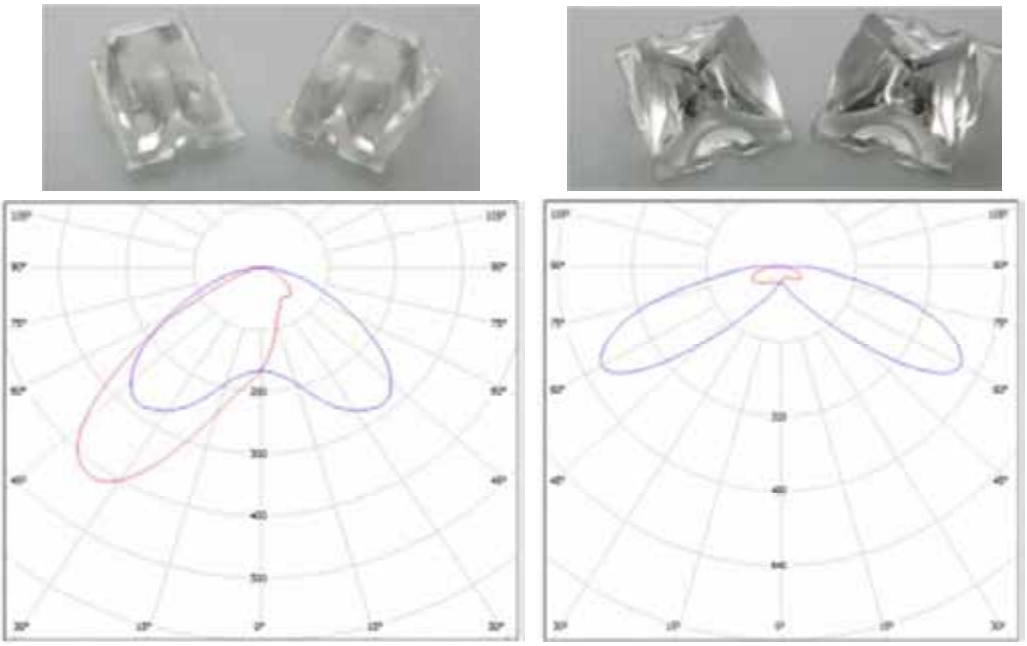


Figura 151. Lenti LEDIL StradaT-DN - Fotometria LED + lente

Lenti LEDIL StradaT-DW Fotometria LED + lente

Le ottiche free-form sono state scelte perché permettono di progettare apparecchi di illuminazione in cui le curve fotometriche abbiano ampiezze molto diversificate e specializzate e consentono di migliorare il rendimento del gruppo ottico e l'Utilanza U dell'apparecchio perché il flusso viene indirizzato in maniera più mirata rispetto ai sistemi tradizionali. La selezione delle ottiche a rifrazione free-form deriva da queste caratteristiche di intercambiabilità, performance ottica (solidi fotometrici asimmetrici), affidabilità (lenti già collaudate e funzionanti) e facile reperibilità sul mercato (lenti già disponibili). Sono state valutate ottiche Edison Opto ottiche LEDIL.

Requisiti di design

Si tratta di ripensare lo spazio pubblico in termini qualitativi in maniera totale con il fine ultimo di riportare lo spazio della città all'uomo affinché, seppur in un contesto pubblico e collettivo, si percepisca non solo funzionalità e sicurezza ma anche qualità, comfort, estetica. La città, e soprattutto il contesto storico, diventa uno spazio in cui ci si possa sentire a casa, uno scenario intimo e confortevole, in cui sia facile e chiaro reperire informazioni, orientarsi e bello da vedere. La cosiddetta "urban beautification" passa attraverso la ridefinizione dei parametri di comfort e qualità della vita nel territorio della città e non prende in considerazione soltanto requisiti illuminotecnici puri ma considera una serie di fattori legati alla vivibilità e alla percezione qualitativa dello spazio.

La qualità della luce è una delle tematiche fondamentali nel progetto. Altre tematiche emergenti riguarderanno la sostenibilità, la salvaguardia dell'ambiente, l'informazione e i servizi forniti all'utente, la bellezza percepita dello

spazio in cui desidero stare. In sostanza devono essere considerati una serie di aspetti ulteriori rispetto all'illuminotecnica classica al fine di rispondere alle esigenze, sempre più complesse, della contemporaneità.

- **Contestualizzazione:** considerare il contesto in cui il progetto si colloca, p.e. un centro storico di un piccolo comune italiano. E' necessario definire un progetto di luce, sia dal punto di vista delle performance che delle caratteristiche formali dell'apparecchio, in grado di salvaguardare l'ambiente in cui si colloca nel rispetto del contesto urbano di riferimento.
- **Modulo**: Moduli singoli che, tramite incastri, giunzioni, snap fit, connessioni magnetiche possano connettere i diversi moduli (puzzle tra i moduli) o, diversamente, connessione ad una struttura aggiuntiva a palo che possa contenere e sorreggere i singoli moduli inseriti.
- **Dematerializzazione:** "Silenzio formale" leggerezza del segno, auto-determinazione, lettura del contest, sorgenti, tecnologie ed intelligenze di ultima generazione. Riduzione dei materiali e utilizzo del minimo spessore (per quanto possibile) attraverso la trasparenza e la leggerezza strutturale.
- **Superficie planare**. Ragionare in termini di totale riduzione del tilt attraverso ottiche che siano in grado di diffondere la luce dove richiesto senza dover inclinare l'apparecchio, il modulo o il LED stesso.
- **Multilayer.** Stratificazione di elementi funzionali e che diano solidità al progetto anche a livello estetico
- **Flessibilità**. Capacità del sistema di assolvere a differenti funzioni luminose creando scenari di illuminazione configurabili per lo specifico contesto d'uso.
- **Parassitismo.** Capacità del sistema di illuminazione di integrarsi a pali esistenti sia a specifici pali disegnati ad hoc al fine di rendere di rendere possibile una diffusione ad ampio raggio del sistema sul territorio.

La definizione di un progetto modulare rende possibile la frazionabilità del flusso e la generazione di taglie differenti di apparecchi dunque adatti a diversi specifici contesti variando il quantitativo dei LED oppure modulandone il flusso e modificando le lenti inserite. E' stato scelto di progettare moduli composti ciascuno da circa 12 LED + lente con un emissione di circa 1200 lm.

Valutazione e selezione dei moduli led

La fase di valutazione e selezione del modulo LED + OTTICA da utilizzare nel progetto viene determinata definendo una serie di parametri progettuali a priori. In particolare, a parità di numero di LED considerati, il modulo deve soddisfare i seguenti requisiti:

- soddisfare i valori limite delle categorie illuminotecniche per l'illuminazione stradale di riferimento;
- ottenere un'efficienza energetica elevata e migliorabile tramite una serie di accorgimenti come l'aumento dell'interdistanza tra i pali, l'inserimento di uno schermo protettivo più performante, l'utilizzo di LED e di ottiche più efficienti;
- ottenere un elevato fattore di utilizzazione U, ovvero, tenendo in considerazione al fotometria del modulo, considerare quello che maggiormente indirizza la luce nella porzione di strada considerata;
- consentire la flessibilità del sistema in termini di possibilità di modifica dei LED e delle ottiche per ottenere performance luminose molto diverse sia a livello di efficienze che di fotometria.

Sono stati eseguiti test su due opzioni prese in considerazione e descritte precedentemente: Modulo Edison Opto con Lente MORG e LED Cree XP-G con lenti LEDIL serie STRADA T-DW E T-DN, per valutarne le prestazioni anche in condizioni più simili a quelle effettive di lavoro e sono state effettuate simulazioni con programmi di raytracing.

Il sistema modulare con le lenti LEDIL serie STRADA diventa molto più flessibile, sia perché le lenti disponibili e quindi le curve fotometriche sono molto diversificate, sia perché tali lenti consentono di montare diverse tipologie di LED, sia perché le disposizioni del sistema LED + Lente è molto più varia. Lo svantaggio è che il sistema non è IP67 e quindi bisogna considerare l'inserimento della maschera per evitare l'emissione della luce verso l'alto e di uno schermo in plexiglass o altro materiale di proprietà ottica in grado di garantire l'IP67 al sistema.

Altri elementi

Sono quindi stati progettati due sistemi di schermo protettivo in materiale plastico resistente agli UV e agli agenti acidi presenti in esterni che assicurino, al contempo, la protezione IP67 all'intero modulo.

E' stata anche progettata una schermatura laterale del modulo, affinché non ci fosse emissione di luce verso l'alto. Le dimensioni e la posizione della schermatura sono state ottimizzate in modo che la curva fotometrica non venisse troppo modificata.

Considerazioni sulle prestazioni fotometriche

I diversi moduli provati su impianto, in linea generale, soddisfano le categorie di riferimento CE4 e CE5.

Sistema EDISON OPTO: il sistema senza schermo funzionerebbe in maniera perfetta assicurando il rispetto della normativa e IP67. Rimane il dubbio sulla reale resistenza del materiale di cui sono fatte le lenti all'installazione in esterni. In alternativa, l'inserimento di uno schermo piano inficia sull'efficienza dei LED ma non sulla fotometria (i valori di uniformità rimangono sostanzialmente invariati ma diminuiscono le efficienze e quindi i valori di illuminamento, ma sovralimentando i LED si potrebbe rientrare nella categoria illuminotecnica di riferimento). L'inserimento dello schermo geometricamente modellando seguendo il profilo della lente consente di guadagnare di efficienza ma determina una diminuzione delle uniformità che risultano leggermente scarse, anche se coerenti con la categoria illuminotecnica di riferimento: per avere dei valori più rassicuranti, sarebbe bene ravvicinare, anche se di poco, i pali. Fattore di utilizzazione: con schermo piano 0,49, con offset lente 0,53.

Lenti LEDIL serie STRADA e i LED CREE XP-G: il sistema risulta molto efficiente, nonostante l'inserimento di uno schermo piano di chiusura. L'uniformità risulta molto elevata significa che i pali possono essere allontanati aumentando di molto l'interdistanza, arrivando ad un rapporto l/h = 4. Fattore di utilizzazione: schermo piano 0,38 (quindi inferiore alla soluzione EDISON). Con l'inserimento di uno schermo con geometria progettata, i risultati sono più scarsi, soprattutto per quanto riguarda il valore di uniformità, ed in particolare nel caso dell'impianto di 4,5 m.

In conclusione, tra le due soluzioni presentate, risulta evidente che la maggiore flessibilità sia assicurata dalle lenti LEDIL la cui combinazione permette di illuminare in maniera conforme alle norme un impianto stradale categoria Ce e S ma permette anche la creazione di fotometrie roto-simmetriche per l'illuminazione corretta di piazze, piazzali e sentieri, distribuendo opportunamente i moduli e utilizzando lenti corrette. Il palo, dunque, oltre ad essere intelligente diventa utile appoggio per il parassitaggio di moduli atti a fare luce, sia in linea alle norme vigenti rispetto all'illuminazione stradale e all'inquinamento luminoso sia rispetto a nuove funzioni luminose nello spazio pubblico.

Variabilità e versatilità di utilizzi è l'idea intrinseca del modulo che diventa elemento di luce configurabile a seconda delle necessità e inseribile su un palo per diversi contesti e applicazioni. Il modulo di luce diventa quindi strettamente connesso allo studio delle diverse applicazioni, nel caso specifico di riferimento, applicazioni su strade a traffico lento e prevalentemente pedonali e applicazioni su piazze o sentieri le cui caratteristiche fotometriche variano al variare dell'inserimento nel contesto urbano. Per questo motivo si rende necessario l'utilizzo di un sistema che permette flessibilità di configurazione di un sistema, in questo caso, abbastanza semplice ma, in previsione futura, aperto ad altre possibili configurazioni e applicazioni. Il modulo è: autonomo, protetto dall'ingresso di polveri e acqua, termicamente dissipato, connesso con il sistema di alimentazione esterno; riconfigurabile in base alle esigenze sia rispetto ai LED (tipologia) che alle lenti.

Realizzazione di due prototipi e primi test

Sono stati realizzati due prototipi dell'apparecchio PLUS, uno con lenti Ledil Strada T-DW e l'altro con Ledil Strada T-DN. In Figura la foto dei prototipi.

Descrizione

- Tipologia: Apparecchio stradale a LED.
- Modello: PLUS (Cree + lenti DW)-PLUS (Cree + lenti DN).
- Descrizione Apparecchio stradale 12 LED con ottica integrata.
- Dimensioni [mm] 235x120x35.
- Dimensioni area luminosa [mm] 115x165.
- Tipo e potenza lampada 12 LED – 12 W. LED collegati in serie.

Figura 152. Foto prototipi

I prototipi sono stati testati e sono state rilevate la distribuzione spettrale (SPD), la temperatura di colore (CCT), l'indice di resa cromatica (CRI) e le fotometrie. Utilizzando le fotometrie relative ai due prototipi esaminati, per comodità di elaborazione impiantistica, sono state composte 3 differenti fotometrie, che rappresentano alcune delle combinazioni di moduli previste in fase di progetto. Le configurazioni esaminate sono: 2 DW+2 DN; 4 DW; DW+DN.

Realizzazione pilota di illuminazione efficiente

Il Comune pilota è quello di Marcallo con Casone (MI), un comune lombardo situato presso l'antica strada della posta Milano - Magenta - Novara. Si trova a 25 km a Ovest di Milano, in prossimità del Parco del Ticino e del Naviglio Grande, vicino all'aeroporto di Malpensa e interessato dall'Autostrada (la A4 Milano – Torino separa di fatto Marcallo da Casone, che sono collegati tramite sottopasso). Gli abitanti sono circa 6000 e la tipologia di attività (industria, commercio, agricoltura) è tipica di molte zone dell'hinterland milanese. Il progetto prevedeva:

- il monitoraggio sul campo degli interventi già effettuati nel Comune pilota, per una valutazione sperimentale del risparmio energetico e del maggior comfort visivo ottenuti.
- L'analisi di altre situazioni campione, con proposte per nuovi impianti, estendendo eventualmente il campo anche ad altre realtà significative (ad esempio ambienti interni "pubblici").
- La continuazione della campagna sull'inquinamento luminoso con le misure in ambiente extraurbano e l'integrazione con misure in ambiente urbano.

Nella precedente annualità erano state scelte e analizzate alcune zone campione nel Comune, ed era stato indetto un bando comunale per la progettazione e realizzazione di impianti innovativi. Il bando si è chiuso a inizio ottobre 2010 e i lavori della commissione di valutazione (composta anche da rappresentante ENEA) si sono svolti poco dopo. Per diversi motivi (il principale è legato al patto di stabilità) il Comune non ha potuto installare il nuovo impianto in tempi brevi. L'attività di ENEA è stata quindi condizionata dal ritardo dell'inizio lavori sul nuovo impianto. E' stata quindi svolta nel Comune pilota:

- una campagna di monitoraggio più approfondita sulla via oggetto dell'intervento;
- una analisi del progetto del nuovo impianto;
- la campagna sull'inquinamento luminoso;
- una campagna di monitoraggio nella biblioteca comunale, come primo caso di illuminazione di un interno pubblico; è stata svolta anche una analisi circadiana della situazione.

Inoltre sono state svolte:

- attività sperimentale su STAPELIA, lampione fotovoltaico a LED;
- acquisto di 2 banche dati sul mercato dei prodotti di illuminazione.

Descrizione del nuovo impianto

Il progetto si basa sul concetto che l'illuminazione pubblica è un elemento in grado di ricreare l'immagine specifica e riconoscibile del tessuto urbano. Si vuole dar vita a uno spazio urbano rinnovato, ad un luogo in cui le relazioni umane trovino una continuità di espressione durante le ore serali e notturne.

- ✓ La luce notturna è uno strumento di orientamento ed evidenziazione. Per caratterizzare gli elementi costitutivi del luogo (sede stradale, carattere degli edifici) si devono scegliere sorgenti con dominante cromatica adatta a una percezione dell'ambiente notturno con valenze di tipo funzionale, estetico e formale
- ✓ Durante il giorno altri aspetti hanno un impatto visivo: ad esempio la collocazione e la distribuzione dei centri luminosi, le caratteristiche dei corpi illuminanti e del supporto. Questi aspetti devono esser valutati al fine di ottenere un progetto della luce correttamente ambientato.

In pratica, gli obiettivi principali della soluzione progettuale scelta sono:

- massimo comfort visivo per i fruitori;
- rispetto dei valori minimi normativi;
- contenimento dell'inquinamento luminoso;
- progettazione coordinata per tutta l'area.

Nella soluzione progettuale scelta gli apparecchi di illuminazione hanno un triplice ruolo:

- i sostegni, la tipologia e la forma degli apparecchi rappresentano dei veri e propri interventi di arredo urbano, in grado di essere anche di giorno percettivamente compatibili con le qualità architettoniche ed ambientali del tessuto edilizio nel quale sono inseriti;
- i corpi illuminanti, per tipologia di ottica e lampada, sono consoni alle esigenze funzionali dell'illuminazione pubblica, legate alla vivibilità, fruibilità e sicurezza dei luoghi (sia in ambito stradale che ciclopedonale);
- telecontrollo e regolatori di flusso rappresentano un intervento che permette di ottenere importanti risultati in termini di risparmio energetico e in termini manutentivi.

Sono stati presi in considerazione i seguenti accorgimenti:

- riduzione dell'abbagliamento diretto e controllo dei gradienti di luminanza per ciascuna scena visiva;
- controllo del flusso luminoso direttamente inviato verso la volta celeste, grazie a uno studio preciso delle ottiche;
- sistemi di telecontrollo e regolazione punto-punto;
- coordinazione con le reali condizioni di traffico e viabilistiche e con gli eventuali progetti di riqualificazione dell'arredo urbano.

Sono quindi stati scelti:

- sorgenti a LED a luce bianca, CCT = 5000 K, CRI ≥ 90; questa soluzione ha una durata molto elevata, alta resa cromatica e la possibilità di regolare istantaneamente e integralmente il flusso luminoso emesso.
- Apparecchi decorativi e funzionali, installati su palo di altezza adeguata alle sezioni stradali e alla presenza di alberature e zone ciclopedonali adiacenti alla carreggiata, con ottica adeguata all'area di intervento (ciclopedonale per la pista ciclabile, stradale per la carreggiata), consentendo una distribuzione delle intensità luminose efficace; questo ha permesso di ampliare le interdistanze, nel rispetto delle luminanze e illuminamenti previsti dalla normativa.
- Sistema di telecontrollo punto-punto, telegestione e regolazione del flusso luminoso. Il sistema punto-punto è in grado di gestire e monitorare a distanza, da una postazione remota, ogni singola linea uscente dai quadri di comando fino a ogni singola lampada; questo significa che è possibile accendere, spegnere e regolare singolarmente ogni linea o programmare accensioni relative a scenari diversi. La modalità di riduzione del flusso può dipendere dalla stagionalità o da esigenze specifiche, e la curva di regolazione può essere calcolata digitalmente e giornalmente. Il sistema proposto si basa sulla comunicazione in tempo reale a onde convogliate tra regolatore (in prossimità del quadro di alimentazione) e singoli moduli palo.

La scelta della luce bianca a elevata resa cromatica ha permesso di abbassare la categoria illuminotecnica della via.
L'impianto è così composto:

- 1 quadro elettrico con modulo per il telecontrollo punto-punto.
- 19 apparecchi decorativi tipo A1 con ottica stradale totalmente schermata, sorgente a LED di potenza nominale 1,2 W x 55 LED.
- 6 apparecchi decorativi tipo A2 con ottica stradale totalmente schermata, sorgente a LED di potenza nominale 1,2 W x 35 LED.
- 2 proiettori sottogronda tipo A5 con ottica stradale totalmente schermata, vetro di chiusura piano, sorgente a LED di potenza nominale 1,2 W x 55 LED.
- 13 pali decorativi tipo S2 rastremati, altezza fuori terra pari a 8,5 m, zincati e verniciati completi di sbraccio con tirante di lunghezza pari a 1,5 m.
- 6 pali decorativi tipo S3 rastremati, altezza fuori terra pari a 8,5 m, zincati e verniciati completi di sbraccio con tirante di lunghezza pari a 1,5 m e attacco di altezza 5 m fuori terra per aggancio apparecchio di illuminazione con ottica dedicata alla pista ciclabile.

Tabella 41. Tipo di Apparecchi

codice tipologia	**A1**	**A2**	**A5**
marca e modello	FIVEP FLAT LINK	FIVEP FLAT LINK	FIVEP FLYER LED
tipologia	armatura stradale decorativa	armatura stradale decorativa	proiettore sottogronda
classe di isolamento	II	II	II
grado di protezione	IP 66	IP 66	IP 66
unità elettrica	elettronica	elettronica	elettronica
telegestione	si	si	si
regolazione punto / punto	si	si	si
ottica	stradale asimmetrica	ciclo-pedonale	stradale asimmetrica
classificazione fotometrica	cut-off	cut-off	cut-off
dimensioni (mm)	580 x 580 x 200	580 x 580 x 200	520 x 310 x 85
tipologia sorgente	LED	LED	LED
temperatura di colore (K)	5000	5000	5000
indice di resa cromatica (Ra)	≥ 90	≥ 90	≥ 90
potenza di lampada (W)	1,2 W x 55 LED	1,2 W x 35 LED	1,2 W x 55 LED
accessori	fissaggio laterale	fissaggio laterale	fissaggio laterale

Nella Tabella 42 riassuntiva sono indicati alcuni dati progettuali, come previsto dal bando.

Tabella 42. Dati progettuali previsti dal bando

Costi di realizzazione (progettazione, fornitura,	99814 €
Potenza nominale installata	1638 W
Valenza architettonica – aspetto estetico	Corpi illuminanti decorativi
Costi di gestione annui (consumi e manutenzione)	1850 €
Resa cromatica	≥ 90
Telegestione	Si
Regolazione punto / punto	Si
Garanzia	5 anni
Vita media convenzionale del sistema	24 anni

I costi di gestione si dividono in costi di energia e costi di manutenzione:

Tabella 43. Costo di gestione

Costi di energia	Calcolata sulle potenze nominali installate, compresa la potenza assorbita dai sistemi di alimentazione. Ore di funzionamento dell'impianto: 4200 ore/anno. Grazie alla regolazione di flusso, potenza ridotta per 1400 ore/anno. Costo medio di vendita dell'energia elettrica.	905 €/a
Costi di manutenzione	Ordinaria: pulizia, sostituzione degli alimentatori, verniciatura sostegni, verifiche ISPELS se dovute, costi registrazione contratti e volturazioni, adeguamento sistema informativo e IT. Straordinaria: sostituzione apparecchi / sorgenti dopo 12 anni, riparazione per atti vandalici, riparazione per guasti gravi (con sostituzione materiali), riparazione per incidenti.	945 €/a
	Totale	**1850 €/a**

Analisi costi-benefici

Nella Tabella 44 si riporta il confronto tra la situazione attuale e il progetto, con la stima dei potenziali risparmi.

Tabella 44. Confronto tra la situazione attuale ed il progetto

	Situazione attuale	Progetto
Totale apparecchi	24	27
Consumi (kWh/anno)	14658.00	7545.72
Costo energia (€/anno)	1758.96	905.49
Costo manutenzione (€/anno)	1150.00	945.00
Totale costi (€/anno)	2908.96	1850.49
nei consumi sono incluse le perdite dei sistemi di alimentazione		

	Valore	%
Risparmio energetico (kWh/anno)	7112.28	48.52
Risparmio economico (€/anno)	1058.47	36.39

Misure su inquinamento luminoso

Gli obiettivi della ricerca sono:

- confrontare, a parità di caratteristiche prestazionali, l'impatto ambientale di diverse tipologie di impianti di illuminazione stradale;
- proporre parametri per la classificazione degli impianti riguardo alla luce dispersa verso l'alto (inquinamento luminoso) in base alle loro prestazioni normative e localizzazione sul campo;
- proporre un algoritmo di previsione dell'impatto ambientale di un impianto in base alle caratteristiche quantitative prima definite.

Seguendo le indicazioni della letteratura scientifica internazionale e del comitato tecnico CIE TC4.21, un'analisi completa richiede lo studio di impianti di illuminazione non schermati da edifici (rurali) e impianti schermati dagli edifici (urbani). Sono state individuate quattro diverse tipologie di apparecchi:

- con lampada a ioduri metallici e vetro curvo ottimizzato;
- con lampada a ioduri metallici e vetro piano;
- a LED e vetro curvo ottimizzato;
- a LED e vetro piano.

La procedura di indagine sperimentale consiste essenzialmente nei seguenti passi:

1. caratterizzazione in laboratorio degli apparecchi di illuminazione;
2. caratterizzazione dell'impianto (limitatamente alle grandezze elettriche di alimentazione e geometriche di installazione);
3. calcolo dell'illuminamento e della luminanza del manto stradale;
4. misurazione dell'illuminamento e della luminanza del manto stradale;
5. misura dall'alto della luminanza e dell'illuminamento prodotto dall'impianto;
6. calcolo della ripartizione della luminanza dell'impianto;
7. individuazione dei contributi dovuti alla radiazione emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione, dalla superficie della strada, delle altre zone illuminate;
8. definizione dei parametri utili al modello matematico per la valutazione dell'inquinamento luminoso.

Il primo passo, eventualmente associato alla misura delle caratteristiche dell'asfalto è necessario per stabilire l'accuratezza dei calcoli. Il passo 2 permette di individuare le reali condizioni operative dell'impianto e di giustificare eventuali discrepanze tra i valori calcolati (al passo 3) e misurati (al passo 4). Il passo 6 permette di conoscere le reali prestazioni dell'impianto e di avere indicazioni per i parametri del modello. Il passo 7 permette di quantificare i parametri usati nei i passi successivi. Gli ultimi passi esauriscono la caratterizzazione dell'impianto fornendo i dati utili al modello.

Modelli matematici per la descrizione dell'inquinamento luminoso e la stima dell'incremento della luminanza della volta celeste dovuta alla presenza di impianti di illuminazione sono stati sviluppati da INRIM e verificati in più occasioni con misurazioni specifiche, attraverso metodologie atte a caratterizzare grandi estensioni (ad esempio città) con misure di luminanza a distanza prese da rilievi vicini associate al conteggio, automatico, degli apparecchi visibili.

A partire dai dati fotometrici acquisiti, con una opportuna metodologia di analisi è possibile ottenere le seguenti grandezze di interesse:

- luminanza della città nella direzione di osservazione;
- intensità luminosa emessa dalla città nella direzione di osservazione;
- luminanza del cielo nella direzione di osservazione;
- intensità luminosa emessa dal cielo nella direzione di osservazione.

Applicando l'ipotesi di assimilare l'emissione della città a quella di una sorgente isotropa (detta anche Lambertiana, per la quale cioè la luminanza è uguale in tutte le direzioni di osservazione), è possibile calcolare l'intensità luminosa emessa verso l'alto. L'impianto di illuminazione diventa, nel suo insieme, una sorgente di luce che può essere caratterizzata, in campo vicino, con la ripartizione della luminanza o a grande distanza, considerandola puntiforme, con la ripartizione dell'intensità luminosa.

Le misure devono coprire tutto l'emisfero superiore all'impianto e possono considerare l'illuminamento in una griglia di punti o la luminanza osservata da questi punti:

- la misura dell'illuminamento in un punto permette di conoscere il flusso luminoso incidente nel punto prodotto da tutto l'impianto, ma a meno di operare a distanza proibitive, non permette di conoscere le direzioni di emissione di tale flusso;
- la misura della luminanza eseguita con rivelatori a immagine (ILMD-Imaging Luminance Meter Device) permette di ottenere questa informazione indispensabile ai fini del modello.

Considerando le difficoltà operative sul campo, il metodo prevede in ogni caso la misurazione delle due grandezze contemporaneamente, usando le misure di illuminamento come verifica dell'accuratezza di quelle di luminanza e dei calcoli conseguenti. Si tratta quindi di realizzare, sul campo, la caratterizzazione, denominata di campo vicino (near field), di un gigantesco apparecchio di illuminazione adattando le tecniche usate in laboratorio su apparecchi "normali".Le prove si sono svolte in parte a Marcallo con Casone, in parte a Torino presso INRIM.

Situazione rurale (extraurbana): strada extraurbana a Marcallo con Casone, a doppio senso di marcia sufficientemente isolata dall'abitato, per evitare disturbi da luci estranee, e con la presenza di strade alternative che ne permettono la chiusura al traffico, per il periodo delle prove, senza causare disguidi di rilievo. Nell'area di test non sono presenti altri impianti di illuminazione. La presenza di un tratto rettilineo, senza alberi ai bordi, ha permesso l'installazione ad hoc di 2 impianti di illuminazione indipendenti, adeguatamente separati e accesi alternativamente.

Situazione urbana: inizialmente era stata individuata, a Marcallo con Casale, una strada a scarso traffico presso il centro dell'abitato. Tuttavia da un sopralluogo si è visto che la via presenta costruzioni di altezza modesta, spesso inferiori all'altezza stessa dei pali di illuminazione, quindi poco significativa ai fini dell'indagine proposta. Inoltre ci sono difficoltà operative, in spazi limitati, per il mezzo aereo per le misure fotometriche dall'alto, ed è necessario il consenso al sorvolo dei proprietari degli immobili. E' stato quindi deciso di svolgere le prove presso l'INRIM a Torino.

Per limitare l'area di misura ogni impianto di illuminazione è composto da 3 apparecchi dello stesso tipo montati su altrettanti pali telescopici mobili alti 8 m. Per semplicità costruttiva e operativa, essendo i pali inclinabili per il montaggio – smontaggio degli apparecchi, non è stato previsto nessuno sbraccio e pertanto gli apparecchi sono stati montati allineati con il palo.

Per le misure eseguite presso INRIM a causa degli spazi ristretti e considerando che le misurazioni dei parametri illuminotecnici normativi erano già state eseguite a Marcallo con Casale, si è operato con impianti composti da 1 solo apparecchio di illuminazione.

Le misurazioni di emissioni e riflessioni verso l'alto sono state eseguite mediante strumentazione trasportata da un piccolo elicottero teleguidato in volo al di sopra della strada. Inizialmente era stato scelto un mezzo volante di tipo diverso, un deltaplano a motore teleguidato, caratterizzato da movimenti morbidi, di dimensioni maggiori, quindi più facile da pilotare perché più visibile da terra e più stabile. La presenza di termiche, anche notturne, tipiche del periodo estivo, ha consigliato per le successive misure il cambio della tipologia di piattaforma volante e contemporaneamente variazioni sulla procedura di misura per ottimizzare le possibilità operative del nuovo mezzo aereo. Per ogni tipologia di apparecchio selezionata i campioni sono stati sottoposti verifiche fotometriche ed elettriche, con una metodologia di misura ad hoc, per individuare tutti i parametri adatti alla sperimentazione. Le misure inziali, alla tensione nominale di alimentazione, hanno determinato:

- il flusso luminoso emesso (in lumen);
- le frazioni di flusso luminoso emesse in definite direzioni;
- la ripartizione dell'intensità luminosa (in candele) con angolo g tra 0° e 175°;
- la radianza spettrale (in unità relative);
- i parametri elettrici di alimentazione;
- la temperatura di colore correlata;
- l'indice di resa dei colori;
- l'efficienza luminosa come rapporto tra il flusso luminoso emesso nel semispazio inferiore e la potenza totale assorbita, intendendo con quest'ultima la potenza elettrica reale assorbita dall'apparecchio di illuminazione compresi tutti i suoi componenti.

Inoltre l'apparecchio è stato misurato a tensione ridotta del 10% rispetto a quella nominale (limite inferiore normativo di variazione) per quanto riguarda flusso luminoso emesso e parametri elettrici di alimentazione. I dati raccolti permettono di stimare con elevata accuratezza il comportamento reale sul campo.

Misure alla biblioteca comunale di Marcallo con Casone

E' stata scelta la biblioteca comunale quale ambiente di test su cui condurre le misure di confort visivo mediante l'impiego di immagini colorimetriche e video fotometriche.

La metodologia di misura, inizialmente sviluppata per applicazioni di illuminazione urbana in esterni è stata conseguentemente riadattata al nuovo campo applicativo, anche se il caso studio scelto non ha consentito di metterne in luce tutte le potenzialità (l'impianto di illuminazione dell'ambiente è piuttosto limitato e poco flessibile). Nella prima parte della ricerca si sono esaminati alcuni aspetti inerenti gli effetti della luce sulla fisiologia umana:

- la luce ha un impatto diretto sulla attività della corteccia cerebrale, sulla temperatura corporea e sulla frequenza cardiaca;
- è noto che luce consente di regolare la produzione dell'ormone melatonina;
- molte ricerche hanno posto in evidenza che il ritmo circadiano umano è influenzato dalla presenza di un nuovo meccanismo di fotoricezione scoperto nella retina, questo sarebbe dovuto ad un fotopigmento che alcuni ricercatori hanno chiamato melanopsinavi;

- alcune ricerche sono state dedicate ad analizzare come la luce può migliorare le prestazione dei lavoratori turnisti notturni;
- è stato dimostrato che la luce può avere un effetto anche sul livello di vigilanza soggettivo;
- la luce può influire positivamente sulla depressione stagionale che, particolarmente nei paesi nordici, colpisce molti soggetti nel periodo invernale quando è minore l'esposizione alle radiazioni solari;
- la terapia luminosa può migliorare la qualità e durata del sonno in pazienti affetti da disturbi del sonno;
- nel caso di patologie gravi come l'Alzheimer, la luce può migliorare le fasi di veglia e sonno dei malati;
- la luce può accelerare la crescita di peso nei neonati prematuri;
- è stata dimostrata una relazione tra la regolazione della melatonina e lo sviluppo del tumore al seno.

Il termine "sistema circadiano" è usato per descrivere gli effetti derivanti dalla conversione dell'energia luminosa da parte della retina in segnali neuronali che regolano importanti funzioni fisiologiche, come ad esempio il ritmo del sonno, la temperatura del corpo, la produzione di ormoni, ecc. Questo tipo di indagine è stata centro di interesse negli scorsi 15 anni in laboratori in tutto il mondo e lo sforzo di indagine ha prodotto la determinazione di una curva di sensibilità, che coinvolge alcuni specifici fotorecettori del sistema circadiano.

Consideriamo le sorgenti utilizzate nel lighting design dal punto di vista dello stimolo circadiano, cioè cerchiamo di misurare la performance di una sorgente luminosa dal punto di vista circadiano; rapporto "stimolo circadiano per unità di potenza" (CS/W) per il sistema circadiano è l'analogo dell'efficienza in lumen/Watt per il sistema visivo.

In base a uno dei modelli finora sviluppati (Rea et al.), una luce bianca, se comparata con una luce blu, è relativamente povera di stimolazione per il sistema circadiano; di conseguenza valori relativamente alti di luce bianca sono necessari per stimolare il sistema circadiano, che per contro risulta sollecitato da relativamente bassi livelli di luce blu. La Tabella 45 mostra il valore di CS/W per alcuni dei più diffusi tipi di sorgenti presenti sul mercato: si osserva che, a parità di potenza assorbita, una lampada fluorescente da 7500 K è circa 3 volte più efficiente di una lampada fluorescente da 3000 K, a parità di esposizione allo stimolo luminoso, mentre in termini di performance visive, producono invece lo stesso flusso luminoso.

Tabella 45. Valori di CS/W per alcuni dei più diffusi tipi di sorgenti presenti sul mercato

Light Source	Photopic lumens/Watt	Circadian Stimulus/Watt
Fluorescent 3000K	100 lm/W	74 CS/W
Fluorescent7500K	100 lm/W	157 CS/W
Incandescent	12 lm/W	12 CS/W
D65	70 lm/W	133CS/W
Clear Mercury (Hg)	45 lm/W	18 CS/W
Blu LED (470 nm)	8 lm/W	223 CS/W
	15 lm/W	418 CS/W

Altri aspetti legati alla dipendenza del sistema circadiano dalla luce possono così riassumersi:
- il sistema circadiano è largamente insensibile alla distribuzione spaziale della luce, anche se la parte inferiore della retina appare molto più sensibile alla luce rispetto alla parte superiore, l'aspetto dell'immagine percepita è quindi indifferente, ma la luce che proviene dall'alto è più efficace nella stimolazione del sistema circadiano;
- il sistema circadiano è differentemente sensibile alla luce in dipendenza all'ora del giorno;
- il sistema circadiano ha nell'uomo una soglia di attivazione molto più elevata rispetto a quella del sistema visivo. Richiede quindi più luce bianca artificiale di quella normalmente necessaria per la visione;
- nell'uomo la soppressione della melatonina nel sangue attraverso la luce richiede una esposizione allo stimolo luminoso di almeno 10-15 min;
- stimoli luminosi più brillanti comportano una rapida riduzione del livello di melatonina rispetto a stimoli luminosi meno intensi.

Si può quindi definire una "fotometria circadiana", dove le varie osservabili (ad esempio il flusso luminoso, la luminanza ecc.) non sono considerate dal punto di vista del sistema visivo ma del sistema circadiano; quindi anche gli strumenti di misura devono essere tarati con curve di sensibilità differenti. Si vuole arrivare a calcolare l'attività circadiana in base allo stimolo circadiano ricevuto. Per l'attività sperimentale si è utilizzato un videofotometro portatile, opportunamente tarato: è stato infatti implementato un metodo per la stima della risposta spettrale della fotocamera a partire dalla conoscenza della distribuzione spettrale di ingesso e della risposta del sensore CCD. La procedura utilizzata consente di tenere conto anche della eventuale non linearità della fotocamera: un

metodo di linearizzazione della risposta viene applicato contemporaneamente alla procedura di stima della sensibilità spettrale di un dato canale. Lo scopo finale del presente lavoro, è quello di ottenere un'immagine a falsi colori che rappresenti la distribuzione del fattore di attivazione circadiano (acv) all'interno della scena inquadrata.

Le misure alla biblioteca di Marcallo

L'ambiente è costituito da uno spazio pianta rettangolare (larghezza 5.24 m, lunghezza 17 m, altezza 3.57 m), che presenta una serie di finestrature sui due lati più lunghi. Le finestre del lato sinistro (rispetto alla porta di ingresso) sono poste ad un'altezza di circa 2,30 m e hanno dimensioni pari a 1,20x1,20 m e risultano prive di qualsiasi sistema di controllo dell'ombreggiatura; le aperture dell'ambiente sul lato opposto sono di due tipi porta a finestra e finestre la prima e le ultime due; tutte le aperture presenti sul lato destro sono dotate di sistemi di controllo dell'ombreggiatura (persiane e tende veneziane). Nell'ambiente vengono svolte due attività principali:

- attività di consultazione dei libri
- attività di ufficio per la gestione del prestito libri.

L'impianto di illuminazione della biblioteca è costituito da 11 apparecchi 1x58 W con schermo lamellare equipaggiati con lampade fluorescenti da 58 W. Ogni lampada emette 5200 lm a CCT = 4000 K, CRI = 85. Gli apparecchi sono disposti al centro del locale in modo da assicurare l'illuminazione della zona lettura e della zona uffici; l'alimentazione degli apparecchi risulta indipendente per ciascuna zona anche se non è stato previsto alcun sistema di regolazione del flusso luminoso. La manutenzione delle lampade avviene occasionalmente, quando le sorgenti risultano non più funzionanti; non è stato possibile reperire informazioni circa le ore di funzionamento delle lampade, all'atto dei rilievi. Sono stati misurati i parametri illuminotecnici e confrontati con il livelli di riferimento (UNI EN 12464-1), suddividendo il locale in due differenti zone:

- Zona sala lettura, assimilata in termini di compiti visivi e attività alle sale lettura delle biblioteche degli edifici scolastici
- Zona ufficio, dove opera la bibliotecaria per la registrazione dei libri in ingresso e uscita e per tutte le altre attività di gestione. Per tali compiti, il personale utilizza un PC per il quale dovranno essere verificati i requisiti; in questo caso i compiti visivi e le attività sono state assimilate a quelle previste negli uffici per attività di archiviazione e copiatura.

Per la valutazione degli illuminamenti verticali, sono state effettuate le misure su 3 scaffali tipo a diverse altezze dal suolo, al fine di valutare i valori di illuminamento verticale che consentono agli utenti della biblioteca di ricercare il libro di loro interesse (Tabella 46).

Tabella 46. Valori di illuminamento verticale

Altezza dal suolo del ripiano (m)	Illum.vert. (lx) SC 1	Illum.vert. (lx)SC 2	Illum. vert. (lx) SC 3
210	178	174	171
175	174	168	165
142	160	151	167
109	133	134	157
76	125	105	146
43	95	75	129
10	84	31	120

Sono state misurate le caratteristiche spettrali delle lampade: il rilievo è stato condotto su una sola lampada, dal momento che tutte le lampade impiegate nell'impianto risultano dello stesso tipo. La CCT risulta di 3824 K e il CRI di 82, valori abbastanza in linea con quelli dichiarati dal costruttore.

Sono state misurate le luminanze nella zona del videoterminale, in diversi momenti della giornata e della sera. E' stata rilevata la luminanza totale, che tiene conto sia degli apporti di luce naturale che di luce artificiale. Il display era spento durante le misure. Non è stato rilevato alcun fenomeno di abbagliamento riflesso dovuto a luce naturale o agli apparecchi di illuminazione mantenendo un valore di luminanza di circa 18 cd/m2 nel corso dell'intera durata del rilievo. La temperatura di colore nel campo visivo si mantiene pressoché inalterata nel corso del pomeriggio con valori compresi tra 3400 K e 4000 K per la zona del display egli oggetti posti nelle immediate vicinanze.

Prove su STAPELIA

Nella precedente annualità era stata fatta una ottimizzazione di Stapelia® (brevetto ENEA), lampione fotovoltaico progettato per illuminare parchi, strade, aree pubbliche senza l'ausilio di energia elettrica fornita dalla rete in quanto dotato di pannelli solari disegnati "ad hoc" posti sulla sommità della struttura che lo rendono autonomo. Si era così arrivati alla nuova Stapelia, con una "foglia" equipaggiata con i LED per l'illuminazione. Il sistema Stapelia, composto da pannelli fotovoltaici, circuito elettronico di controllo, batteria per l'accumulo e sorgenti luminose, è stato cablato e installato al Centro Enea di Ispra.

Figura 153. Stapelia

Il sistema è stato strumentato al fine di misurare tensione e corrente di uscita di ciascun pannello fotovoltaico, tensione e corrente di carica/scarica della batteria e tensione e corrente assorbita dalle sorgenti luminose.

Sono stati acquisiti i parametri elettrici sia nella fase di carica della batteria che nella fase di accensione dei led che corrisponde alla fase di scarica della batteria. Questa fase è stata forzata fino a 40 ore al fine di valutare la capacità di durata della batteria in mancanza della fase di carica (giornate sfavorevoli per quanto riguarda l'insolazione).

Gli aspetti presi in considerazione durante la fase di collaudo sono stati:

- le caratteristiche della batteria al fine di ottimizzare i bilanci energetici tra pannelli PV e LED; scelta della tensione della batteria e capacità in termini di Ah;
- la capacita del sistema di gestione di ottimizzare la carica della batteria anche con pannelli PV aventi tensioni differenti;
- la scelta della potenza assorbita dalla sorgente luminosa in funzione dei livelli di illuminamento voluti e della capacita del sistema di mantenerli per il tempo previsto.

Le prove sono ancora in corso, ma dalle prime analisi si può affermare che il sistema funziona. Tuttavia è necessaria un'attività di sviluppo successiva, soprattutto per dimensionare meglio le batterie in funzione dei pannelli fotovoltaici ed avere un controllo più accurato della gestione delle diverse tensioni dei pannelli. Nella Figura 154 alcuni grafici di vari parametri misurati.

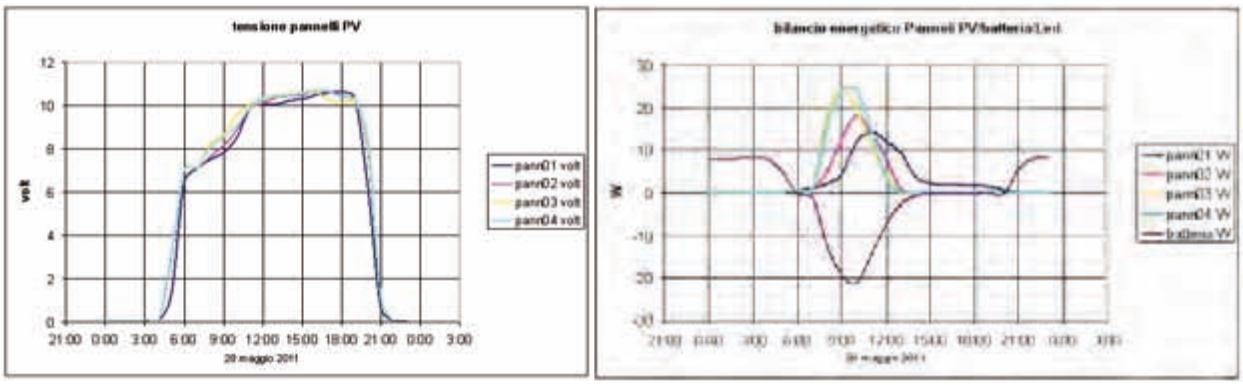


Figura 154. Alcuni parametri rilevati durante i test su Stapelia

Banche dati illuminazione

Sono state acquisite due banche dati sul mercato dei prodotti per illuminazione:

- ricerca DataBank sul mercato degli apparecchi di illuminazione (aggiornata a luglio 2011):
  - Settore: sono compresi i produttori di sistemi e apparecchi per l'illuminazione (lampadari, lampade da tavolo, apparecchi decorativi e illuminotecnici per interni ed esterni ed altre tipologie). Non vengono analizzate le aziende che producono esclusivamente sorgenti luminose (lampade ad incandescenza, alogene, fluorescenti, neon, ecc.).La segmentazione dei prodotti nel settore si presta a numerose sovrapposizioni, sia in termini di tecnologie che di funzioni d'uso. Si individuano quattro aree d'affari contraddistinte da funzioni d'uso specifiche:
    - apparecchi di illuminazione per interni;
    - apparecchi di illuminazione per esterni;
    - apparecchi per illuminazione di emergenza;
    - apparecchi per illuminazione scenografica per l'illuminazione di spettacoli, concerti ed eventi di vario genere, sia all'aperto sia in strutture chiuse quali teatri, auditorium, studi televisivi.

- Analisi della domanda: principali caratteristiche, fattori esterni, trend emergenti.
- Analisi dell'offerta: principali caratteristiche, fattori esterni, trend emergenti.
- Scenario competitivo.
- Opportunità e minacce.
- Variabili.

- Banca dati Nielsen sulle sorgenti luminose (aggiornata a settembre 2011):
  - Mercati: totale Italia (comprensiva di ipermercati, supermercati, liberi servizi, discount, negozi tradizionali, catene specializzate in prodotti casa/persona) con dettaglio per singolo canale, 4 aree Nielsen con dettaglio per regione (solo iper+super).
  - Prodotti: lampadine (segmenti Incandescenti, Incandescenti Speciali, Fluorescenti Compatte, Fluorescenti Circolari, Alogene).
  - Fatti: vendite e quote volume e valore, distribuzioni numerica e ponderata, prezzo medio
  - Periodi: 3 anni terminanti

La conoscenza del mercato è utile per fotografare la situazione attuale, sia per effettuare valutazioni sulle potenzialità di risparmio energetico.

Un esempio: da una prima elaborazione si vede il calo delle vendite delle lampade a incandescenza e il contemporaneo aumento delle vendite di fluorescenti compatte e alogene, da fine agosto 2009 a fine agosto 2011. Ricordiamo che dal settembre 2009 è in corso la progressiva uscita dal mercato delle lampade incandescenti tradizionali con il regolamento (CE) 244/2009 della direttiva Ecodesign ("REGOLAMENTO (CE) N. 244/2009 DELLA COMMISSIONE del 18 marzo 2009 recante modalità di applicazione della direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile delle lampade non direzionali per uso domestico". In Figura 155 il grafico delle vendite delle lampade nel tempo.

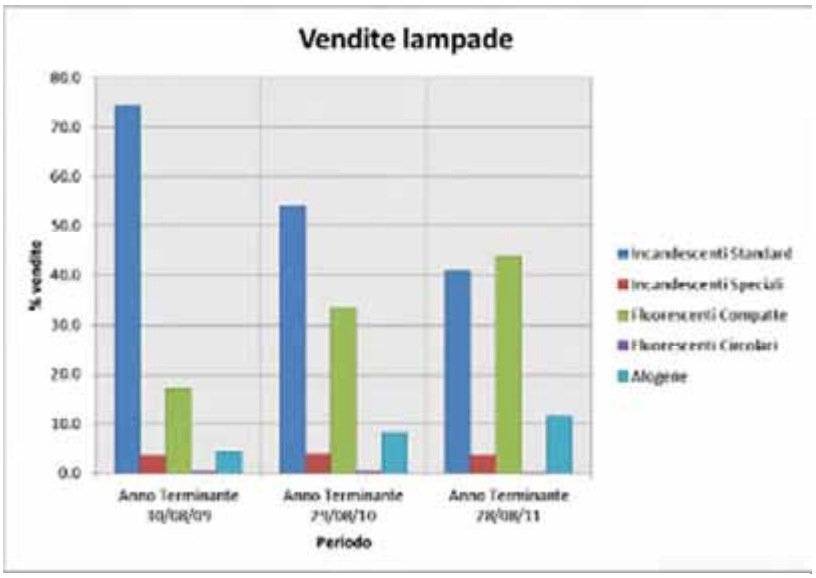


Figura 155. Vendite delle lampade nel tempo

Comunicazione e diffusione dei risultati

Il progetto prevede un'ampia fase di diffusione dei risultati per la replicazione sul territorio della piattaforma tecnologica sviluppata, con diverse iniziative per promuovere la realizzazione d'interventi di riqualificazione energetica degli impianti d'illuminazione pubblica, la replicazione del Progetto Pilota, l'effettuazione di audit energetici e la redazione del Piano regolatore dell'illuminazione pubblica, l'accesso ad un database di casi pilota e realizzazioni.

Le attività si sono focalizzate sullo sviluppo e realizzazione di una serie di "prodotti", tecnici e non, ed iniziative volte a promuovere l'efficienza energetica nel settore dell'illuminazione pubblica, partendo dai risultati dell''annualità precedente. Quest'ultima si era difatti concentrata nell'analisi dello statu quo del settore "illuminazione pubblica" ed in particolare nella valutazione del grado di conoscenza e competenza dei nostri diretti beneficiari, i Comuni nella persona dei loro rappresentanti. Partendo da questa analisi l'attività si è sviluppata tramite il coinvolgimento di tutti gli operatori del settore, diretti ed indiretti, ed è confluita nella creazione di quei Network operativi indispensabili al conseguimento degli obiettivi del Progetto. Da sottolineare il

cambiamento di struttura, da “Progetto di Ricerca e Diffusione” a “Progetto di Ricerca, Trasferimento ed Applicazione” .

L’obiettivo è diventato dunque quello di promuovere l’efficienza energetica nel settore supportando ed instradando i pubblici amministratori a realizzare interventi di riqualificazione energetica dei loro impianti e ad acquisire una maggiore competenza e consapevolezza nella loro gestione energetica, mettendoli nella condizione di poter eventualmente applicare e/o usufruire, sia della piattaforma tecnologica sperimentale sviluppata da parte dell’attività di Ricerca del Progetto sia delle numerose tecnologie e competenze tecnico-scientifiche offerte dal mercato. Tale politica, peraltro, consenta da un lato la diffusione di tecnologie ad alta efficienza e l’integrazione tra produttori ed utilizzatori e dall’altro facilita una graduale riduzione, su scala nazionale, dei consumi di energia elettrica nel settore.

Tra i prodotti sviluppati vi sono le “Linee Guida” ed il Modello Sperimentale di Audit Energetico. Le Linee Guida sono un prodotto il cui sviluppo è partito dall’analisi e valutazione del grado di conoscenza dei pubblici amministratori per quanto atteneva al settore “illuminazione pubblica”. Conoscenza dell’impianto, capacità di manutenzione e gestione, conoscenza del mercato elettrico e delle tecnologie e competenze professionali disponibili per l’illuminazione pubblica, gli strumenti di finanziamento degli interventi di riqualificazione energetica, l’utilizzo dei certificati bianchi, il ricorso ai bandi di Consip, i finanziamenti europei, ecc. sono stati gli argomenti oggetto di esame e valutazione. Le Linee Guida pertanto racchiudono e delineano quel percorso cognitivo ed economico/finanziario che dovrebbe fornire ai Sindaci e loro amministratori le conoscenze di base, indispensabili, ai fini di una gestione energeticamente efficiente e sostenibile degli impianti e del territorio di loro competenza, mettendoli nella condizione di essere in grado di programmare interventi di efficientamento energetico e sviluppare politiche volte alla riduzione dei consumi. Ad oggi le Linee Guida rappresentano un documento intermedio e sperimentale ai fini della definizione di quel percorso di riferimento standardizzato e semplificato atto a promuovere sia la riqualificazione degli impianti sia una loro gestione più competente e consapevole dal punto di vista della sostenibilità ambientale e dell’efficienza energetica. Distribuito e presentato ad oggi almeno 2000 Comuni ed alle diverse categorie d’interlocutori, viene difatti presentato sul mercato con l’invito a proporre revisioni, integrazioni, aggiornamenti ecc. L’obiettivo è quello di riuscire, entro la fine della prossima annualità, ad integrarlo con quelle tematiche che al momento, per limiti di tempo e/o non emerse e/o non individuate, non sono state affrontate, in modo da renderlo un documento di riferimento completo per i pubblici amministratori e per chiunque interessato ad operare nel settore. La creazione delle “Linee Guida” è stata peraltro l’occasione ed il mezzo di coinvolgimento di tutti i maggiori interlocutori del settore, l’input alla spontanea creazione di quei Network operativi che ancora oggi stanno portando avanti lo sviluppo del Progetto.

Il Modello Sperimentale di Audit Energetico è stato sviluppato con l’obiettivo di garantire una corretta valutazione dello stato dell’impianto d’illuminazione pubblica ai fini dell’elaborazione di un progetto di riqualificazione energetica. La corretta valutazione dell’impianto consentirà e garantirà inoltre, sia il raggiungimento del miglior risultato, in termini di efficienza energetica conseguibile grazie alla realizzazione dell’intervento, sia una maggiore attendibilità della previsione di rientro del finanziamento richiesto per la sua realizzazione. Grazie alla scheda elaborata si dovrebbe pervenire all’elaborazione di una fotografia puntuale dell’impianto sul quale si vuole intervenire, sia in merito allo stato tecnologico sia in merito alle prestazioni energetiche fornite. La sua compilazione potrà inoltre servire al Comune per l’elaborazione del Pric, documento ad oggi in possesso solo da un numero limitatissimo di Comuni. Il Modello, ad oggi in fase sperimentale attraverso la realizzazione di Audit energetici gratuiti presso alcuni Comuni aderenti al Progetto, viene a creare un uniformità nella valutazione degli impianti da parte delle Esco ed una certezza valutativa per il Comune, non in grado di verificare quanto le proposte di efficientamento pervenutegli, a seguito di Bando e/o su sua richiesta, siano state progettate in funzione di un’analisi puntuale dell’impianto.

Per quanto attiene alle attività ed iniziative realizzate ai fini dell’integrazione degli operatori coinvolti vi sono l’approfondimento dell’analisi del settore e della sua evoluzione, l’ampliamento del Sito Web con l’integrazione di un Database degli impianti, la realizzazione di 15 audit energetici gratuiti e la sottoscrizione di 7 Accordi di Partenariato quali: Agesi, Federesco, Provincia di La Spezia, Agenzia per l’Energia della Provincia Autonoma di Trento, Comune di Potenza, CRESME Consulting S.r.l., SO.SVI.MA. S.p.a.

Da questi accordi di partenariato hanno preso vita sia la costituzione e/o il rafforzamento dei Network esistenti sia la progettazione e/o sviluppo di progetti sperimentali di aggregazione di Comuni al fine di facilitarli ad intraprendere il percorso verso l’efficientamento energetico dei loro impianti. Tra questi sono in discussione 2 progetti, uno con i Comuni della Costiera Amalfitana (redazione dei Pric e Audit energetico) e l’altro con quelli di La Spezia (Stato di consistenza impianti per riscatto rete ai fini dell’efficientamento). Di particolare rilievo è il Network dei Comuni che raggiunge ad oggi un numero di contattati direttamente pari a 1410, aderenti diretti pari a 183, ed aderenti indiretti pari a 500. L’obiettivo è di poter disporre, nel corso della prossima annualità, dei dati

relativi agli impianti di almeno 200 Comuni e portare a conoscenza dei risultati del Progetto almeno 2450 Comuni circa, quelli tra i 5000 e i 50000 abitanti.

Principali soggetti esterni coinvolti

Università degli Studi di Milano

Analisi degli indici di resa cromatica, test percettivi sul contrasto percepito in immagini digitali, test sulla resa cromatica della sorgente e della riflettanza del materiale, elaborazione di metodo di calcolo del contrasto percepito, elaborazione di indice percettivo di resa cromatica, software per il calcolo del contrasto percepito, software per il calcolo di indici di resa cromatica, visualizzazione in realtà virtuale.

Politecnico di Milano

Analisi degli indici di resa cromatica, misure spettrali su sorgenti e apparecchi a LED, misure illuminotecniche in edificio pubblico (biblioteca) presso il Comune Pilota, progettazione di apparecchio innovativo modulare a LED per applicazioni outdoor "PLUS".

Università Roma Sapienza

Stato dell'arte di LED, analisi dei sistemi integrati LED – Fotovoltaico per applicazioni stradali, Illuminazione urbana e scenari di progettazione, analisi di impatto dell'illuminazione artificiale notturna sull'ambiente naturale, misure spettrali su sorgenti tradizionali e a LED.

INRIM: caratterizzazione degli apparecchi di illuminazione per le misure, misure di inquinamento luminoso presso il Comune Pilota e/o a Torino.

AIDI: studio su inquinamento luminoso presso il Comune Pilota.

Comune di Marcallo con Casone: è il Comune Pilota, dove vengono installati gli impianti innovativi. Messa a disposizione del territorio comunale e della biblioteca comunale per campagne di monitoraggio illuminotecnico, collaborazione per installazione nuovo impianto (ENEA è stata membro della commissione esaminatrice del bando per la progettazione e realizzazione degli impianti innovativi).

Associazioni ESCo (AGESI e FEDERESCO): collaborazione nella redazione della prima stesura delle Linee Guida economico-finanziarie e individuazione nuove tematiche di interesse da proporre ai Comuni nella prossima edizione delle Linee Guida; realizzazione audit energetici gratuiti secondo il modello sperimentale messo a punto in collaborazione con ENEA; individuazione di nuove tematiche di interesse da proporre ai Comuni; docenze ai workshop per i Comuni organizzati da ENEA. Tutte le attività sono state svolte a titolo gratuito.

CONSIP: Contributo alla redazione delle linee guida e docenze di presentazione della Convenzione CONSIP Servizio Luce 2 ai workshop per i Comuni.

ANCI: Contributo alla redazione e soprattutto alla diffusione delle linee guida sia tramite il sito ANCI sia tramite newsletter per i Comuni. Ha ospitato ENEA all'Assemblea Nazionale dei Comuni (Padova, novembre 2010) per la presentazione del progetto Lumière.

Network dei Comuni: contributo alla raccolta dei dati sull'illuminazione pubblica, sullo stato degli impianti e sulle difficoltà tecniche economiche e burocratiche per la realizzazione di interventi di efficientamento e risparmio energetico

Provincia di La Spezia, con l'obiettivo di promuovere concretamente iniziative di efficienza energetica sul territorio, con particolare attenzione alla riqualificazione degli impianti di illuminazione pubblica tramite la diffusione a tutti i Comuni delle Linee Guida economico-finanziarie e di impostare un progetto per la realizzazione di una smart-street.

Agenzia per l'Energia della Provincia Autonoma di Trento, il cui impegno si è concretizzato nell'adesione di tutti i Comuni della Provincia e nella realizzazione di un Workshop per la presentazione ai Sindaci e tecnici comunali e responsabili delle Comunità montane trentini delle tematiche esposte nelle Linee Guida Lumière.

Comune di Potenza, nell'ambito dell'accordo con CRESME, ha preso parte a lavori specifici con Lumière insieme alla Provincia di Potenza.

CRESME Consulting S.r.l., che ha portato le sue competenze al servizio degli organismi pubblici dell'Italia Meridionale coinvolgendoli nel network Lumière, ha organizzato un Workshop per i Comuni del Centro-Sud che si è tenuto a Potenza nel mese di maggio 2011 e, infine, con ENEA anche nell'individuazione e nell'elaborazione di

nuove tematiche di interesse dei Comuni da trattare nella prossima edizione delle Linee Guida economico-finanziarie.

SO.SVI.MA. S.p.a., con l'obiettivo di entrare in contatto in modo capillare con i comuni della Sicilia e di realizzare due audit energetici gratuiti presso gli impianti di due Comuni della provincia di Palermo.

Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

(Referente G. Fasano)

La domanda di efficientamento energetico degli edifici ed in particolare l'esigenza di migliorare la prestazione energetica dell'involucro, opaco e trasparente, e degli impianti di condizionamento degli ambienti, è aumentata considerevolmente negli ultimi decenni e il trend è ancora fortemente in crescita. I materiali e componenti di involucro e le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento invernale ed estivo (sistemi a compressione con motori elettrici) e l'illuminazione sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici. In particolare il rischio è di dover aumentare significativamente la potenza installata senza un corrispondente aumento del consumo con il risultato di un costo dell'energia più alto.

Il Piano nazionale, in accordo con la Direttiva Europea, individua una serie di misure per il miglioramento dell'efficienza energetica che prevede nel settore del civile (residenziale e terziario) l'obiettivo di risparmio energetico pari a 81530 GWh al 2016. Si tratta di obiettivi di risparmio energetico impegnativi ma possibili, tenendo conto delle iniziative già messe in atto, quali ad esempio: il contenimento dei consumi energetici negli edifici, alcuni interventi di fiscalità a favore del risparmio energetico previsti nella attuale Legge Finanziaria ed il quadro normativo vigente, tra cui il DLgs. 192/05 e s.m.i. ed il DLgs. 115/08. Da considerare, inoltre, i nuovi indirizzi della Direttiva 31/2010 che fissa particolari valori prestazionali per gli edifici del settore pubblico che dovranno rispettare standard di consumo a energia quasi zero.

Attualmente si registra una fase critica, dovuta alla situazione economica e alle difficoltà del mercato di poter far riferimento a strumenti e applicazioni, per quanto concerne lo sviluppo di tecnologie e materiali innovativi (sistemi di controllo e regolazione, sistemi schermanti, materiali ad alta efficienza per l'involucro opaco e trasparente ecc.) e lo sviluppo di metodologie di diagnosi energetica e di metodologie di valutazione degli interventi di recupero energetico di edifici, pubblici e privati, e in particolare per quelli di pregio architettonico e nelle aree archeologiche di proprietà pubblica. Pertanto la necessità di poter disporre di dimostrativi e di indicazioni operative per la riqualificazione energetica degli edifici è una esigenza molto sentita dagli operatori del settore.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Lo scopo del progetto è di definire e mettere a disposizione degli operatori del settore opzioni e pacchetti di tecnologie che consentano di raggiungere l'obiettivo di efficienza energetica, evitando incrementi significativi dei costi di costruzione. A tal fine si sono sviluppate tecnologie, sistemi e componenti per il controllo, gestione e regolazione degli impianti di condizionamento, elettrici e illuminazione, considerando i profili di utenza e gli scambi energetici con la rete elettrica, applicando tecnologie e sistemi intelligenti avanzati per il sistema integrato edificio- impianto- clima- utente (Smart Building).

Le attività portate avanti per il raggiungimento di tali obbiettivi sono state le seguenti:

- Determinazione dei parametri climatici di riferimento su cui basare la normativa.
- Sviluppo di una metodologia ed un procedimento di calcolo per l'Indice di Severità del Clima , con riferimento al periodo estivo.
- Definizione dei benchmark dei consumi energetici degli edifici per tipologia, destinazione d'uso (edifici commerciali e istituti bancari) e per determinate fasce climatiche.
- Definizione di sistemi avanzati di Smart Building per il residenziale.
- Sviluppo di linee guida per la progettazione di sistemi a basso consumo di energia nobile da adottare specie per quegli edifici critici dal punto di vista del carico termico estivo.
- Sviluppo di metodologie e linee guida per gli edifici di pregio con la stesura di linee guida e schede tecniche di indagine a supporto del decisore politico e del settore professionale.
- Sviluppo di linee guida e sistemi di classificazione semplificata dei sistemi di illuminazione avanzati e componenti (semi)trasparenti di involucro in grado di indirizzare il progettista ed il gestore dell'edificio nella scelta dei materiali, delle tecnologie e delle soluzioni più idonee.

Le attività svolte risultano anche di supporto:

- all'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;

- al completamento del recepimento delle Direttiva 91/2002/e sull'efficienza energetica degli edifici a cui mancano ancora i decreti attuativi per gli impianti di condizionamento estivo e per quelli di illuminazione, questi ultimi per il settore del non residenziale;
- alla predisposizione di provvedimenti e nuove misure per il recepimento della Direttiva 31/2010 sull'efficienza energetica degli edifici.

Aggiornamento dei parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva

L'attività ha lo scopo di colmare alcune delle lacune esistenti nella normativa tecnica e nei documenti tecnici pre-normativi per quanto concerne i dati riguardanti il comportamento energetico degli edifici, con particolare attenzione al periodo estivo, nelle varie zone del territorio nazionale e per le varie destinazioni d'uso nei comparti terziario ed abitativo. Lo studio si propone quindi di avviare il processo di aggiornamento di tali dati, assicurando nel contempo il collegamento con i gruppi di lavoro CEN (Comitato Europeo di Normazione) preposti. Lo scopo finale è quindi fornire dei dati d'ingresso per:

1. la stima della prestazione energetica degli edifici; nello specifico, il lavoro proposto fornisce una linea guida per determinare alcuni dei dati necessari per il calcolo del fabbisogno di energia, per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici secondo: le norme UNI TS 11300 parte 1,2,3 e 4.
2. La verifica termoigrometrica dei componenti opachi dell'involucro edilizio secondo la UNI EN ISO 13788:2003
3. Il calcolo del carico termico invernale di progetto secondo UNI EN 12831:2006.
4. Il calcolo del carico termico estivo di progetto secondo UNI EN 15255:2008.
5. Il calcolo della temperatura interna estiva in assenza di impianto di climatizzazione secondo le UNI EN ISO 13791:2005, UNI EN ISO 13792: UNI 10375:1995.

Questa attività ha portato alla realizzazione dell'*anno climatico caratteristico* per le province italiane delle regioni del centro sud (Abruzzo, Umbria, Basilicata, Lazio, Marche, Campania, Puglia, Calabria, Molise, Sicilia). Le stazioni meteo selezionate, 57 ubicate in prossimità dei rispettivi capoluoghi di provincia, sono rappresentative delle loro caratteristiche climatiche. La normativa europea in cui è descritto il procedimento per la costruzione dell'anno caratteristico è la EN ISO 15927-4, in cui si definiscono i criteri di interpolazione da usare. I dati utilizzati nel calcolo, in accordo con la normativa e misurati secondo i metodi specificati nella "WMO Guide No. 8", sono:

- temperatura [°C];
- irradianza solare globale su piano orizzontale [W/m²];
- umidità relativa [%];
- velocità del vento [m/s].

I primi tre sono considerati parametri chiave per il calcolo dell'energia necessaria per la climatizzazione estiva ed invernale degli edifici; il vento è considerato parametro secondario. I dati meteorologici sono elaborati in maniera diversa dalla semplice statistica descrittiva operata a fini puramente meteorologici; è necessario porre particolare attenzione al controllo della qualità e validità dei dati. In sintesi, la procedura di costruzione dell'anno tipo climatico prevede la selezione di dati orari relativi a mesi estratti da un record pluriennale e la loro unione con un metodo di «*smoothing*». La procedura è stata realizzata in due fasi:

- selezione del mese che meno si scosta dai corrispondenti, su tutta la serie storica;
- adattamento di inizio e fine di ogni record mensile per ottenere una transizione graduale tra un mese ed il successivo.

Il recepimento in Italia della Direttiva Europea 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia, attraverso l'emanazione del Dlgs.192/05 e del successivo Dlgs.311/06, prevede la certificazione energetica in edilizia.
La certificazione si traduce, tra l'altro, nella valutazione di un parametro, il fabbisogno di energia primaria specifico della costruzione, e nella successiva assegnazione, in funzione del valore di tale parametro, della costruzione a una classe di efficienza energetica.

Al momento sono stati fissati i limiti al fabbisogno solo per quanto riguarda la climatizzazione invernale. Il territorio nazionale è stato suddiviso, infatti, in zone climatiche invernali in conformità a un indice di severità climatica definito dai gradi-giorno invernali e sono stati individuati i valori limite del fabbisogno energetico su tale base.

La diffusione dei sistemi di condizionamento estivi, con il conseguente aumento dei consumi energetici, rende necessario procedere, anche in tal caso, alla definizione di zone climatiche estive contraddistinte da un *indice di severità climatica estivo*. La definizione di questo indice estivo presenta maggiori difficoltà rispetto al corrispondente indice invernale giacché le variabili climatiche di cui tenere conto sono più numerose e più

complesse da valutare. La definizione proposta nella prima annualità comprendeva anche il caso invernale e consentiva quindi una uniformità nella classificazione indipendentemente dal periodo climatico dell'anno. Nel documento elaborato nella seconda annualità si esponevano i risultati di una prima applicazione di tale indice al caso estivo prendendo come modello di calcolo, per il fabbisogno energetico, una villetta isolata e si proponeva una conseguente classificazione del territorio italiano.

Per l'indice di severità climatico si è proceduto nella presente annualità ad applicare la metodologia sviluppata nelle precedenti annualità ed applicata in tale fase ad edifici di civile abitazione, ad edifici del settore terziario al fine di verificarne l'applicabilità anche in questo ambito. Si è così confermata la possibilità effettiva di classificare il territorio italiano anche sulla base di zone climatiche estive, in analogia a quanto attualmente esistente per il periodo invernale, permettendo di definire dei limiti di energia primaria necessaria anche per il raffrescamento.

Edifici tipo e indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio

L'attività è quello di definire indici e livelli di consumo (benchmark) di edifici del settore terziario aventi diverse destinazione d'uso, quali: edifici ad uso bancario e grande distribuzione commerciale, ad integrazione di quanto fatto nelle precedenti annualità per scuole, alberghi, uffici, grandi magazzini ed edifici residenziali. Questo studio ha consentito di poter ampliare il quadro di riferimento e di disporre di dati su settori poco conosciuti e carenti di informazioni. L'attività, attraverso studi mirati sul sistema edificio-impianto, si pone anche l'obiettivo di fornire al legislatore gli elementi di valutazione oggettivi utili per la redazione delle norme in tema di usi finali dell'energia, indirizzino le scelte programmatiche e strategiche per il raggiungimento degli obiettivi sul risparmio energetico e la riduzione delle emissioni dei gas serra.

L'attività ha fornito un inquadramento sulla situazione legislativa a livello europeo e nazionale, e la caratterizzazione del parco edilizio distinti per:

- diverse destinazioni d'uso (edifici ad uso istituti di credito e grande distribuzione commerciale);
- le varie tipologie edilizie;
- le diverse condizioni climatiche ;
- le caratterizzazioni tipologiche e impiantistiche del sistema edificio impianto.

Questo consentirà un recepimento a livello nazionale maggiormente coerente della normativa europea (tra cui la direttiva 91/2002/CE, 31/20210/CE e della direttiva 32/2006/CE) riguardante le prestazioni energetiche degli edifici e il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio impianto in modo particolare per i consumi elettrici e la valutazione dei livelli di efficienza energetica ottenibili in funzione della fattibilità delle soluzioni tecnologiche.

E' stato effettuato anche uno studio finalizzato alla definizione di una metodologia che consente di poter svolgere analisi energetiche negli edifici alla luce delle normative cogenti e determinare le caratteristiche strutturali ed impiantistiche di "edifici tipo" al fine di condurre una valutazione di fattibilità degli interventi di riqualificazione energetica, in funzione di diverse ipotesi di intervento, sia di tipo strutturale che impiantistico.

Lo sviluppo di modelli di valutazione del sistema elettrico nazionale, che preveda l'integrazione dei sistemi edificio/impianto, è finalizzata anche alla promozione di azioni per la applicazione di nuove tecnologie per la co-trigenerazione e la generazione distribuita di energia elettrica. Dallo studio sono emersi una serie di considerazioni, quali:

- le forti differenze nei consumi, per il periodo invernale e quello estivo, per gli edifici costruiti in diverse zone climatiche, Milano, Roma e Palermo;
- la differenza che si manifesta tra edifici esistenti e quelli costruiti secondo il DLgs 192/05 tale differenza è di circa il 20%;
- la necessità di definire più indicatori per le diverse destinazioni d'uso, per gli alberghi, le scuole e gli uffici ;
- la incidenza significativa sui consumi elettrici dovuti agli ausiliari degli impianti e quella dovuta agli impianti di illuminazione;
- per il periodo estivo, il maggior consumo energetico degli impianti di condizionamento rispetto a quelli per il riscaldamento per le zone B.

Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso centro commerciale

Le stime sono state effettuate incrociando le informazioni provenienti da fonti diverse e "testandole" con le interviste effettuate su un campione rappresentativo. Le motivazioni per cui è stato necessario mettere a punto una specifica metodologia sono stati sostanzialmente due:

- il primo, quello di dare una dimensione quantitativa allo stock di centri commerciali presente in Italia, e la loro dislocazione territoriale;

- il secondo era quello di affiancare alla misurazione quantitativa la caratterizzazione qualitativa di tali fabbricati, in funzione soprattutto delle informazioni necessarie a stimare il fabbisogno energetico e sui tipi e modalità di interventi manutentivi necessari all'efficientamento energetico.

Il patrimonio edilizio utilizzato dai centri commerciali non è trattato statisticamente in forma organica da alcuna fonte istituzionale. Alcuni produttori statistici rilevano frammenti di informazione di carattere quantitativo (in date diverse, con modalità di rilevazione differenti, a scopi differenti). L'attività per pervenire alla quantificazione del fenomeno è stata:

1) la ricognizione in sede Sistan e presso organismi associativi del commercio;
2) l'esame dei modelli di rilevazione e le note metodologiche;
3) l'acquisizione delle banche dati, comprese le informazioni non divulgate;
4) l'analisi di congruità e di coerenza fra le diverse misurazioni;
5) la stima finale sulla base delle qualità statistiche dei diversi documenti.

Le banche dati considerate sono state le seguenti:

- Censimento ISTAT dell'industria commercio, artigianato e istituzioni (2001) – superficie degli spazi impiegati dal settore commerciale: queste informazioni approssimano la necessità di spazi in relazione al tipo di attività esercitata dai diversi tessuti del commerciale, in funzione del numero di addetti impiegato Queste informazioni sono risultate propedeutiche per il disegno campionario (la stratificazione territoriale).
- Agenzia del Territorio, Banca dati catastale – numero unità immobiliari urbane ad uso commerciale: esso riguarda tutte le unità immobiliari commerciali, ed è aggiornata al 2009, a differenza dei Censimenti.
- Rilevazione dell'attività edilizia ISTAT – numero edifici ad uso commerciale nei permessi per edificare rilasciati fra il 2000 e il 2009: il dato, che non è diffuso pubblicamente è stato acquisito, esso riguarda unicamente il flusso di nuove realizzazioni edilizie; è stato anche acquisito il dato relativo all'annualità 2008 concernente il dettaglio "centro commerciale".
- Vari profili informativi degli organi associativi del commercio: essi hanno il merito di registrare gli iscritti alle associazioni e le caratteristiche degli esercizi di vendita; spesso conservano e aggiornano banche dati (che sono state oggetto di acquisto dal Cresme) con informazioni sull'articolazione tipologica delle unità commerciali (per esempio: negozi di vicinato, centri commerciali, ipermercati, parchi commerciali, ecc).
- Ministero dello Sviluppo Economico: il MISE registra annualmente la consistenza di diversi tipi di esercizio commerciale, purtroppo non i centri commerciali così come definiti in premessa; tali informazioni hanno consentito tuttavia delle importanti riflessioni ed elaborazioni in ordine alle dinamiche temporali e alle propensioni territoriali.

Non esiste un archivio di informazioni sulle caratteristiche costruttive ed impiantistiche degli edifici utilizzati unitariamente in centro commerciale (esiste, sia pure molto deficitaria, unicamente per gli edifici ad uso abitativo) Sì è resa indispensabile pertanto la realizzazione di una rilevazione, di carattere campionario. Essa si è articolata in un campione di Società che gestiscono unitariamente i diversi centri e in un altro campione riguardante gli "*spazi retail*", ossia i diversi negozi e servizi che compongono l'attività generale del centro, ma porre quesiti sul sistema costruttivo dei manufatti e sul tipo di impianti in dotazione presuppone dei soggetti ai quali somministrare il questionario. Sono stati quindi individuati gli interlocutori, nei due tipi descritti nelle righe precedenti, a cui somministrare il questionario, che svolgono la loro attività all'interno degli immobili "specializzati".

Il modello di rilevazione è stato realizzato con l'affiancamento dell'Enea, ed è composto dai seguenti ambiti:

1. caratteristiche costruttive del fabbricato;
2. epoca di costruzione e stato manutentivo;
3. dimensioni del fabbricato (numero piani, superficie dei piani e delle stanze, ecc);
4. caratteristiche delle superfici vetrate e sistemi eventuali di ombreggiamento;
5. dotazione e caratteristiche degli impianti di climatizzazione.

Il risultato delle indagini effettuate porta ad un numero di 1114 Centri commerciali, per una superficie lorda utilizzabile (Gross Leasable Area, GLA) pari a poco più di sedici milioni di m^2, mediamente il 70% della superficie totale dell'edificio, con le seguenti tipologie dimensionali:

- Centro commerciale di vicinato o quartiere (fino a 5.000 m^2 di GLA): rappresentano il 15% degli immobili e il 3% delle superfici;
- Centro Commerciale di piccole dimensioni (da 5.000 a 20.000 m^2): il 60% degli immobili e il 42% delle superfici;
- Centro Commerciale di medie dimensioni (da 20.000 a 40.000 m^2): il 19% degli immobili e il 35% delle superfici;

- Grande Centro Commerciale (da 40.000 a 80.000 m^2): il 5% degli immobili e il 16% delle superfici;
- Centro Commerciale Regionale di area estesa (oltre 80.000 m^2): l'1% degli immobili e il 4% delle superfici.

La concentrazione territoriale è elevata, ma non come gli altri immobili non residenziali: poco più del 30% di tali edifici è concentrato in sole 9 provincie, nell'ordine: Milano, Torino, Brescia, Roma, Bologna, Napoli, Perugia Como e Padova.

Se si guarda alle superfici, il 30% è assorbito da 8 provincie: Milano, Torino, Roma, Brescia, Cosenza, Napoli, Como e Catania. Il 50% si distribuisce fra le prime 22 provincie. Anche a livello delle maggiori aree geografiche la distribuzione non è strettamente proporzionale agli abitanti, ma segue una "moda" determinata dalle epoche di costruzioni: i primi centri commerciali sono sorti nel Nord del Paese, mentre ultimamente ne vengono realizzati molti nelle aree meridionali. Ad oggi, il 34,7% degli edifici è localizzato nell'Italia Nord Occidentale, il 23.6% nell'Italia Nord Orientale, il 17,4% nelle aree centrali del Paese, mentre solo il 24.2% è nel Sud dell'Italia e nelle Isole. Negli ultimi 10 anni, il flusso medio annuo di immobili per Centri commerciali di nuova realizzazione è pari a circa il 3% dell'esistente, notevolmente più elevato delle altre destinazioni d'uso edilizie.

Il periodo più produttivo per la realizzazione dei Centri commerciali è quello degli anni '90, durante i quali sono stati aperti quasi il 45% degli immobili. In Italia, il fenomeno ha cominciato ad affermarsi soltanto con gli anni '80, in particolare nella seconda metà. Solo fra il 2001 e il 2010 sono stati realizzati il 35% degli immobili.

La provincia con il maggior numero di edifici è Milano (75 centri), seguita da Torino (54), Brescia (46), e Roma (45). Fra le prime province, i complessi edilizi con l'estensione maggiore di GLA sono a Como e a Milano (con una superficie media di 17500 m^2), seguono Perugia e Bergamo (17200 m^2).

Di seguito si riporta (Figura 156) la distribuzione del numero di edifici (*Fonte: Elaborazioni Cresme per ENEA – 2011)*.

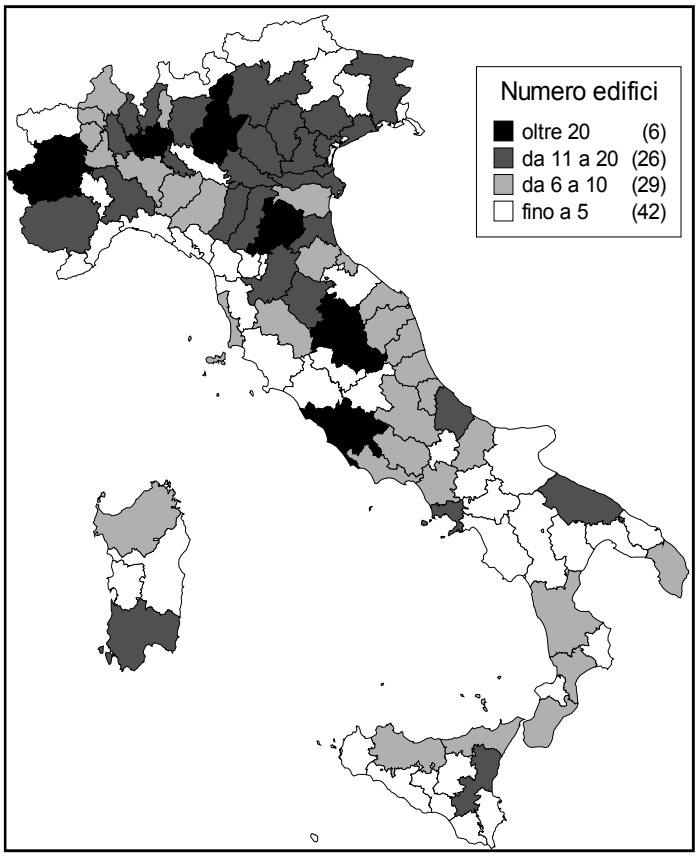


Figura 156. Distribuzione del numero di edifici destinati a centri commerciali

In termini di superfici edilizie che ospitano i Centri Commerciali, la provincia di Milano detiene l'8,2% del totale nazionale, con 1,3 milioni di m^2, seguita da Torino con 775940 m^2, Brescia (675400 m^2) e Roma (622200 m^2); la provincia meno dotata di Centri commerciali è, invece, Enna con un solo centro di 8.000 m^2.

In termini di consumo di suolo da parte dei Centri commerciali, misurato nel rapporto fra superficie degli immobili esclusivamente ad uso commerciale e la superficie complessiva dei territori provinciali, si ha al primo posto Milano, con 662 m^2 ogni km^2 di territorio, segue Napoli con 333 m^2 su km^2 di territorio, Como (293 m^2), Lodi (224 m^2) Trieste (218 m^2); per la provincia di Roma si hanno 126 m^2 ogni km^2 di territorio.

In rapporto agli abitanti la ripartizione si modifica sensibilmente: in testa alla classifica c'è Lodi con ben 80 m^2 ogni 100 abitanti; seguita da Rovigo (75 m^2) e Vercelli (72 m^2); Milano è al 33° posto con 33 m^2 ogni 100 abitanti e Roma al 77° posto con 17 m^2.

Come si evince dalla Tabella 47, i 1114 Centri commerciali sviluppano una superficie complessiva di circa 16 milioni di m^2. Circa il 75% dei fabbricati misura meno di 20000 m^2, solo il 6% misura oltre 40000 m^2; tuttavia il 55% delle superfici sono espresse dal 25% dei centri commerciali, con 272 edifici di grande dimensione (oltre 20000 m^2).

Le tipologie costruttive e le modalità d'uso

La tipologia edilizia prevalente è quella della "piastra" ad 1 o 2 piani (il 41%), mentre il 39,5% assume le forme della classica galleria commerciale; solo il 15% è multipiano.

Tabella 47. Distribuzione territoriale dei Centri Commerciali nel 2010, per Regione (Fonte: elaborazioni e stime Cresme su dati Istat e indagine Cresme 2011)

REGIONE	CENTRI COMMERCIALI		SUPERFICI CENTRI COMMERCIALI	
	Numero	% su Italia	Migliaia di m^2	% su Italia
Piemonte	132	11,8%	1644,2	10,3%
Valle d'Aosta	3	0,3%	69,2	0,4%
Lombardia	232	20,8%	3602,7	22,5%
Liguria	20	1,8%	204,1	1,3%
Trentino Alto Adige	12	1,1%	144,7	0,9%
Veneto	103	9,2%	1651,9	10,3%
Friuli Venezia Giulia	24	2,2%	288,1	1,8%
Emilia Romagna	124	11,1%	1344,7	8,4%
Toscana	60	5,4%	611,2	3,8%
Umbria	26	2,3%	404,7	2,5%
Marche	38	3,4%	463,8	2,9%
Lazio	70	6,3%	1041,7	6,5%
Abruzzo	40	3,6%	534,9	3,3%
Molise	7	0,6%	64,4	0,4%
Campania	60	5,4%	888,1	5,5%
Puglia	30	2,7%	738,8	4,6%
Basilicata	8	0,7%	132,8	0,8%
Calabria	36	3,2%	781,4	4,9%
Sicilia	57	5,1%	989,8	6,2%
Sardegna	32	2,9%	422,9	2,6%
ITALIA	**1114**	**100,0%**	**16024,1**	**100%**

Il 48% degli immobili è realizzato con la struttura in cemento armato e tamponature in pannelli prefabbricati. Un altro 30% è costituito da struttura portante in calcestruzzo armato e pareti in muratura (come abbiamo visto si tratta di immobili costruiti quasi esclusivamente dopo il 1980). Solo il 6% è fatto in calcestruzzo armato e vetro. Il 48% si sviluppa su 1 piano fuori terra, il 40% su due piani. Quasi la metà dispone di un piano interrato.

La maggior parte delle categorie descritte è in funzione almeno 12 ore al giorno, molte vanno anche oltre le 12 ore, oltre i 2/3 sono aperti nel weekend.

La copertura degli immobili è generalmente piana, in pannelli prefabbricati (42%), oppure in laterocemento (31%). Nel primo caso l'illuminazione diurna è garantita da aperture isolate termicamente nel 75% dei casi. Nel caso del laterocemento il 64% ha aperture isolate termicamente, nel 12% del campione non sono isolate e nel 24% non vi sono aperture per l'illuminazione diurna.

I serramenti e gli elementi ombreggianti

Nel 34% dei casi analizzati non esiste un sistema di isolamento delle superfici opache verticali: il 30% possiede pannelli prefabbricati pre-isolati, il 12% ha un isolamento ad intercapedine, l'8% una parete ventilata e solo il 7% un isolamento a cappotto. La superficie vetrata, rispetto alla superficie esterna verticale, è piuttosto scarsa: il 46% degli edifici non raggiunge il 5%, mentre Il 28% degli edifici registra un rapporto fra il 5% e il 10%. Le superfici trasparenti sono principalmente in vetro (75%) e in policarbonato (21%). Il telaio degli infissi è per oltre il 90% in alluminio, con vetro doppio (nel 78%). La metà degli immobili ha elementi ombreggianti costituiti da aggetti esterni fissi per il 58%. Il 17% ha aggetti esterni mobili ed il 13% ha schermi interni.

Gli impianti di climatizzazione

La climatizzazione mista (ossia una unica macchina che provvede al riscaldamento e al raffrescamento) è molto diffusa (48% dei casi) e spesso sostituisce, particolarmente nelle zone climatiche calde, l'impianto di riscaldamento oppure, nelle altre aree, lo integra.

Gli spazi comuni sono climatizzati nella quasi totalità dei casi (oltre il 90%) da una centrale termica separata con terminali e diffusori. Solo il 7% circa è dotato di macchine indipendenti. L'alimentazione più frequente impiegata è il gas (nel 39,5% dei centri) e l'elettrico (54,7%), segue il gasolio nel 4,2%. Quote assolutamente inferiori (intorno allo 0,5%) sono coperte da biomassa e GPL.

Il combustibile gassoso viene impiegato per il 79% solo per il riscaldamento e per il 19% sia per riscaldamento che per raffrescamento. L'alimentazione elettrica, invece, viene adoperata per il 50% solo per il freddo e l'altra metà per riscaldamento e raffrescamento. Il Gasolio, più frequente nel Mezzogiorno, viene impiegato sia per il solo caldo (25%) che per il solo freddo (37,5%) che per entrambi (37,5%).

I sistemi di emissione dell'aria e/o di riscaldamento sono di diverso tipo: prevalgono le canalizzazione in controsoffitto (55,8%) con diffusori posizionate in vario modo: soprattutto a soffitto (46%) e nelle pareti (9,2%). Vi sono poi le canalizzazioni a vista nel 16% dei casi con il 14,6% di diffusione tramite bocchette; i tubi a vista (13,1%) con diversi tipi di diffusione e, infine i tubi non a vista e terminali split (12%).

Fra i sistemi di climatizzazione e di trattamento dell'aria (Tabella 48), prevale l'UTA nel 40,2%, con una quota crescente nelle zone climatiche più fredde. Segue il rooftop (31,5%) con pesi più elevati (fino al 45,5% nelle aree calde, così come il sistema split.

Tabella 48. Distribuzione dei centri commerciali per tipologia del generatore di calore e/o di trattamento dell'aria

RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO	Zone climatiche:					
	A e B	C	D	E	F	Totale
UTA	27,3	37,0	36,7	43,6	66,7	40,2
Rooftop	45,5	29,6	34,7	28,7	33,3	31,5
Caldaia tradizionale	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	1,1
Chiller	0,0	7,4	2,0	3,2	0,0	3,3
Cogeneratore	0,0	3,7	0,0	0,0	0,0	0,5
Split/multisplit/VRV	18,2	22,2	24,5	17,0	0,0	19,6
Teleriscaldamento	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,5
Pompa di calore ad assorbimento a gas	0,0	0,0	2,0	1,1	0,0	1,1
Altro	9,1	0,0	0,0	3,2	0,0	2,2
Totale	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso banche

Anche per definire gli edifici ad uso bancario è stato necessario definire una apposita metodologia, che ricalca quanto detto per i centri commerciali. Le banche dati considerate sono le seguenti:

- Censimento ISTAT sulla popolazione e le abitazioni (2001) – numero di edifici ad uso uffici: il modello di rilevazione prevede il censimento degli edifici adoperati ad uso ufficio ma, tuttavia, il dato non viene pubblicato se non in forma aggregata con le diverse destinazioni diverse dal residenziale (commercio, industria, magazzino, ecc.). Sono stati acquisiti i dati a livello provinciale disaggregato e comunale in forma aggregata (causa gli obblighi di segretezza dei dati sensibili).
- Censimento ISTAT dell'industria commercio, artigianato e istituzioni (2001) – superficie degli spazi impiegati dal settore creditizio, o meglio dell'intermediazione finanziaria e monetaria: queste informazioni approssimano la necessità di spazi in relazione al tipo di attività esercitata dai diversi tessuti del terziario. Queste informazioni sono risultate propedeutiche per il disegno campionario e l'individuazione dei soggetti da intervistare.
- Agenzia del Territorio, Banca dati catastale – numero unità immobiliari urbane ad uso ufficio: esso riguarda tutte le unità immobiliari A10, anche quelle riconducibili ad una sola stanza e presenti in edifici destinati ad altro uso. A differenza dei Censimenti, essa è aggiornata al 2009.
- Rilevazione dell'attività edilizia ISTAT – numero edifici ad uso credito nei permessi per edificare rilasciati fra il 2000 e il 2008: il dato, che non è diffuso pubblicamente, riguarda unicamente il flusso di nuove realizzazioni edilizie, ma ha permesso di aggiornare il dato del 2001.
- Liste degli istituti bancari accreditati in Italia – Banca d'Italia e ABI: tali liste, consentono fra l'altro di avere le Direzioni generali, cioè le funzioni che meglio si adattano ad essere ospitate da un intero edificio.

I dati ufficiali di riferimento relativi al numero di edifici ad uso non residenziale provengono dalle liste Banca d'Italia e ABI. In particolare tali informazioni si riferiscono al numero di edifici adibiti ad uso bancario di tipo puntuale relativo a ciascuna organizzazione (Ragione sociale della banca), ma non al numero di edifici occupati.

Alla fine del 2010 sono risultati presenti sul territorio nazionale 76 gruppi di banche, con 33727 unità operative, diffusamente dislocate nelle diverse aree del Paese; il maggior numero di queste occupa porzioni di edificio, generalmente al piano terra.

Gli edifici ad esclusivo o prevalente uso bancario sono stimati in 1469 unità (Tabella 49) e sviluppano una superficie complessiva di 5,5 milioni di m^2. Il 30% di tali edifici è concentrato in sole 4 province: Milano, Roma, Torino e Firenze, mentre il 50% si distribuisce fra le prime 14 province; anche a livello di macro aree geografiche la distribuzione non è omogenea: il 58,2% degli edifici è localizzato nell'Italia Settentrionale, il 22,2% nelle aree centrali del Paese, mentre solo il 19,6% è nel Sud dell'Italia.

Tabella 49. Edifici ad uso banca nel 2010 – Regioni
(Elaborazioni e stime Cresme su dati Istat e indagine Cresme 2011)

REGIONE	EDIFICI AD USO BANCA		SUPERFICI EDIFICI AD USO BANCA	
	Numero	% su Italia	Migliaia di m^2	% su Italia
Piemonte	129	8,8%	473,7	8,6%
Vali e d'Aosta	5	0,3%	7,8	0,1%
Lombardia	360	24,5%	1,360,0	24,3%
Liguria	46	3,1%	138,1	2,5%
Trentino Alto Adige	44	3,0%	135,3	2,5%
Veneto	109	7,4%	337,0	6,1%
Friuli Venezia Giulia	37	2,5%	126,4	2,3%
Emilia Romagna	126	8,6%	441,8	8,1%
Tose ana	134	9,1%	422,6	7,7%
Umbria	18	1,2%	46,5	0,8%
Marche	32	2,2%	113,3	2,1%
Lazio	142	9,7%	1,025,4	18,7%
Abruzzo	22	1,5%	75,7	1,4%
Molise	4	0,3%	20,0	0,4%
Campania	72	4,9%	219,5	4,0%
Puglia	56	3,8%	154,1	2,8%
Basilicata	8	0,5%	24,2	0,4%
Calabria	22	1,5%	71,2	1,3%
Scilla	72	4,9%	201,1	3,7%
Sardegna	31	2,1%	86,1	1,6%
ITALIA	**1469**	**100,0%**	**5479,7**	**100%**

Negli ultimi 10 anni, il flusso medio annuo di edifici di nuova realizzazione è pari a circa lo 0,8% dell'esistente. Mediamente più basso delle altre destinazioni d'suo edilizie. Più di un edificio su quattro è stato realizzato in epoca anteriore al 1919, il periodo più produttivo per le nuove realizzazioni sono gli anni '80 (Tabella 50).

Tabella 50. Numero edifici uso bancario per epoca di costruzione
(Fonte: Elaborazioni Cresme per ENEA – 2011)

	Numero	%
prima del 1919	400	27,2%
Dal 1920 al 1945	76	5,2%
Dal 1946 al 1961	159	10,8%
Dal 1962 al 1971	83	5,6%
Dal 1972 al 1981	152	10,3%
Dal 1982 al 1991	283	19,2%
Dal 1992 al 2001	200	13,6%
Dal 2002 al 2008	117	8,0%
TOTALE	1.469	100,0%

La provincia con il maggior numero di edifici è Milano (225 immobili) seguita da Roma (120), Torino (69), Firenze (48) e Napoli (45). Seguono poi Bologna (36), Genova (30) e Bari (28). Queste prime 8 provincie rappresentano il 40% dell'edificato per il credito in Italia.

Nel relativo rapporto sono riportati i dati dettagliati e le figure che illustrano la distribuzione provinciale numero e la superficie degli edifici ad uso bancario, oltre al rapporto tra la superficie complessiva degli edifici ad uso bancario con la superficie territoriale, (m^2 edifici/km^2 territorio) (dati 2010).

In termini di rapporto fra superficie degli immobili esclusivamente ad uso bancario e la superficie complessiva dei territori provinciali, Milano vede 446 m^2 ogni km^2 di territorio, segue Roma, con 182 m^2 su km^2, Trieste (171 m^2), Napoli (136 m^2) e Prato (118 m^2).

In rapporto agli abitanti la ripartizione si modifica sensibilmente: in testa alla classifica c'è Siena con 37 m^2 ogni 100 abitanti; seguita da Roma, Sondrio e Milano (intorno a 25 m^2 ogni 100 abitanti).

Le aree geografiche e gli edifici tipo

Le aree settentrionali

- Il 58% degli edifici interamente utilizzati dalla banche (856) è collocato nelle regioni settentrionali. 225 immobili nella sola provincia di Milano, 69 a Torino, 36 a Bologna e 30 a Genova. Queste sono le provincie settentrionali con la più elevata concentrazione di fabbricati per il credito.
- Il 70% degli immobili (600 edifici) ricade nella zona climatica E. Le altre zone climatiche contano 257 edifici.
- Il maggior numero di edifici (250) risale a prima del 1919, ulteriori 182 fabbricati sono sorti dopo il 1981 e prima del '90. Circa 114 appartengono invece al decennio '70-'80.
- Il 52% degli edifici è isolato, con una quota in crescita nei periodi più recenti. Trattandosi, come abbiamo visto di immobili spesso "storici" il restante 48% è contiguo ad altri fabbricati con uno o più lati.
- Il sistema costruttivo è per il 50% in cemento armato e muratura, ben il 40% è stato dichiarato essere in muratura portante (anche in questo caso per l'epoca costruttiva non recente degli immobili); quasi l'1 % è in c.a. e vetro.
- Le dimensioni unitarie risultano in crescita nei periodi più recenti, e seguono con tutta probabilità le strategie diffusive e di concentrazione del sistema bancario: una diffusione del numero di istituti negli anni '70, quindi con edifici di dimensioni ridotte; una concentrazione negli anni '80 e una razionalizzazione negli ultimi vent'anni: la superficie media dei palazzi storici (ante 1919) è intorno a 4800 m^2, scende a 1300 m^2 negli anni '70, per risalire a 5800 negli anni 2000.
- Il maggior numero di fabbricati (il 52%) ha 2 finestre per stanza con infissi in alluminio per il 52% dei casi (il 34% sono in alluminio); la maggior parte possiede i doppi (75,4%) o tripli vetri (13,6%). La maggior parte è dotata di schermi esterni (persiane, avvolgibili, ecc.).
- Molti gli impianti di riscaldamento alimentati a gas (il 56%) minore è l'impiego di elettricità (16%) e di gasolio (13%). I sistemi di raffrescamento prevedono invece per l'85% l'alimentazione elettrica.
- L'emissione dell'aria avviene sia attraverso frequentemente attraverso fan-coil (30%), seguito dalle bocchette d'aria a soffitto (23%) e dai radiatori (15%).
- Negli ultimi anni, il 73% delle banche all'interno dei propri edifici ha messo in pratica accorgimenti per il risparmio energetico. In particolare le lampade a basso consumo (76%); la gestione della temperatura (72%); il sistema di temporizzazione dell'illuminazione esterna (46%).
- Il 19% degli edifici bancari ha impianti ad energia di fonte rinnovabile, il 16% impianti fotovoltaici e il 3% biomasse.
- L'attenzione verso l'efficienza energetica edilizia si presenta piuttosto diffusa nelle aree settentrionali: negli ultimi 3 anni (2008-2010) il 47% ha dato luogo ad interventi di nuovi impianti o ristrutturazione o sostituzione di parti obsolete: il 16% ha sostituito il generatore di calore; l'11% ha installato impianti fotovoltaici; l'8% ha isolato l'involucro esterno e il 6% ha sostituito infissi e finestre.

Le aree centrali

- Nelle regioni centrali sono ubicati 326 edifici. Nella sola provincia di Roma ce ne sono 120, a Firenze, 48 e a Siena 15.
- Il 47% (153 edifici) ricade nella zona climatica D, il 45% (147) in zona E.
- 191 edifici sono stati realizzati prima degli anni '70, ulteriori 117 fabbricati sono sorti dopo il 1981. Circa 92 sono stati realizzati negli ultimi vent'anni.
- Circa la metà degli edifici (45,3%) è isolato, la quota cresce negli edifici costruiti dopo il 1980.
- Il sistema costruttivo prevalente, considerata l'epoca di costruzione, è in muratura portante (42.3%) e in cemento armato e muratura (35%); pochi gli edifici realizzati con tipologie costruttive differenti (circa il 12% sono realizzati con l'impiego strutture in c.a. e facciate in vetro).
- La dimensione media degli edifici è di 2350 m^2 e sono sviluppati prevalentemente su quattro piani con ascensore.
- Il 51%, ha due finestre per stanza, il 33% ne ha due. La metà degli infissi sono in alluminio (il 33% sono in legno e il 14% in acciaio). Molto superiore il numero dei doppi o tripli vetri (89%) rispetto ai singoli. La maggior parte è dotata di schermi interni (tendaggi o veneziane) ed esterni.
- Gli impianti di riscaldamento più numerosi sono alimentati a gas (il 59%) ma viene utilizzato molto anche l'impiego di elettricità (36%). Le tubature sono interne alle pareti.

- L'emissione dell'aria avviene sia attraverso fan-coil (32%), sia con bocchette d'aria a soffitto (22%) che split (16%). Per il sistema di raffrescamento viene utilizzato prevalentemente il chiller (43%) seguito dallo split (36%) e dal gruppo frigorifero (11%).
- Solo il 9% dei fabbricati è dotato di impianti a fonti rinnovabili, prevalentemente fotovoltaico.
- Il 68% ha adoperato accorgimenti finalizzati al risparmio energetico, soprattutto nell'impiego di lampadine a basso consumo (81%) ma anche attraverso controlli sulla temperatura (56%) e sull'illuminazione esterna (44%) ed interna (31%).
- Un po' meno diffuso rispetto alle aree settentrionali l'intervento per aumentare l'efficienza energetica degli immobili: negli ultimi 3 anni (2008-2010) il 32% ha dato luogo ad interventi di nuovi impianti o ristrutturazione o sostituzione di parti obsolete: il 9% ha sostituito il generatore di calore, il 6% ha installato o sostituito le pompe di calore, Il 4% ha isolato l'involucro dall'interno.

Le aree meridionali

- Il Mezzogiorno conta "solo" 287 edifici (il 15,5%); la provincia di Napoli ha 45 fabbricati ad uso bancario, 28 ne ha Bari, 26 Palermo, 15 Cagliari.
- Il 47% (135 fabbricati) è collocato in comuni ricadenti nella zona climatica C; il 38% (110) in zona D.
- Contrariamente a quanto rilevato nel Centro-Nord, oltre la metà (il 53%) degli immobili è stato realizzato dopo gli anni '80. Soltanto il 38% è sorto prima del 1970.
- Il 43% edifici è isolato, con una quota in crescita negli anni '70.
- Il sistema costruttivo nel Mezzogiorno è in cemento armato e muratura per il 58% dei casi, segue la muratura portante (29%) e calcestruzzo armato e vetro (l'8%).
- Mediamente gli edifici sono più ridotti che altrove: 1900 m^2, in calo rispetto alle dimensioni unitarie che caratterizzavano gli immobili bancari negli anni '80: 2400 m^2.
- Il 48% dei fabbricati ha 2 finestre per stanza, il 37% ne ha una; gli infissi prevalenti sono in alluminio (55%, il 31% è in legno); molto superiore il numero dei doppi o tripli vetri (87%) rispetto ai singoli; la maggior parte è dotata di schermi interni (80%), rari sono gli aggetti esterni fissi (10%).
- Gli impianti di climatizzazione più numerosi sono alimentati ad elettricità (il 54% per il riscaldamento e l'81% per il raffrescamento) minore è l'impiego di gas (30%) e di gasolio (16%).
- L'emissione dell'aria avviene sia attraverso fan-coil (31%), split (25%) e bocchette aria a soffitto (22%) Il sistema di condizionamento, quando impiegato esclusivamente per il raffrescamento impiega soprattutto il chiller (il 58%); quando invece viene impiegato anche per riscaldamento o per integrazione del calore utilizza lo split (51%).
- Solo il 12% degli immobili è dotato di impianti a fonti rinnovabili (fotovoltaico) e il 60% degli istituti di credito usa alcuni accorgimenti per il risparmio energetico, in particolare lampade a basso consumo (54%); gestione della temperatura (37%) e controllo dell'illuminazione esterna (29%) e interna (23%).
- Negli ultimi 3 anni (2008-2010) il 20% ha dato luogo ad interventi di nuovi impianti o ristrutturazione o sostituzione di parti obsolete per l'efficienza energetica.

Nel rapporto tecnico sono inserite anche le tabelle per la distribuzione nelle zone Nord Ovest, Nord EST Centro, Sud e isole.

Le caratteristiche dimensionali e strutturali degli edifici

I 1469 edifici sviluppano una superficie complessiva di 5,48 milioni di m^2 e una volumetria pari a oltre 18,5 milioni di m^3. Circa la metà dei fabbricati è di medio-grandi dimensioni: il 48% supera i 1.000 m^2. Tuttavia il 62% delle superfici e delle volumetrie (ca. 11,5 milioni di m^3) sono espresse dal 16% degli edifici ad uso bancario: 236 edifici di grande dimensione (oltre 5000 m^2). Questi ultimi sono quasi esclusivamente concentrati nelle regioni centro-settentrionali del Paese.

Il 48% degli immobili è realizzato con la struttura in cemento armato e tamponature in muratura e il 38% è costituito da muratura portante (si pensi che il 43% è datato prima del 1960); il 65% si sviluppa su un numero di piani fuori terra da 3 a 5; il 2,3% è oltre gli 8 piani; il 77% è dotato anche di piano interrato; infine il 20% ha il piano terra aperto (su pilotis).

I serramenti e gli elementi ombreggianti

Ogni stanza d'ufficio ha mediamente una o due finestre (rispettivamente il 37% e il 47% delle stanze). Il telaio è prevalentemente in alluminio (55%) seguito dal legno (31%) e dall'acciaio (10%). Il 71% delle finestre montano il doppio vetro, il 16,2% il triplo vetro. La superficie delle stanze è prevalentemente compresa fra 11 e 20 m^2.

Per quanto riguarda i sistemi ombreggianti, l'81% degli edifici ne è dotato. Di questi, il 14,4% possiede aggetti esterni fissi (10,2%) e/o mobili (4,2%); solo il 16% è dotato di schermi esterni (persiane, avvolgibili).

Gli impianti

La dotazione di impianti per la climatizzazione, estiva ed invernale, è estesa all'universo degli intervistati. Molto diffusa (nel 45% dei casi) la climatizzazione mista (caldo e freddo), che spesso sostituisce, particolarmente nelle zone climatiche calde, l'impianto di riscaldamento oppure, nelle altre aree, lo integra.

Il combustibile maggiormente impiegato nel riscaldamento è il combustibile gassoso (51%) seguito dall'elettrico (11,4%, particolarmente impiegate le pompe di calore soprattutto nelle aree climaticamente calde) e dal gasolio (11,4%). Biomassa e teleriscaldamento registrano una quota complessiva pari all'8,3%.

Per i sistemi di climatizzazione estiva, naturalmente il peso preponderante è dell'elettrico (85%), ma non mancano sistemi che impiegano gas naturale e altri combustibili. Il 15%, inoltre utilizza fonti rinnovabili, in particolare pannelli solari fotovoltaici nell'81% dei casi.

I sistemi di emissione dell'aria e/o di riscaldamento sono di diverso tipo: prevalgono le bocchette d'aria (33,6%) posizionate in vario modo: a soffitto (22,5%) nelle parte superiore delle pareti (7,2%) e nel basso delle pareti (3,9%). Segue il fan-coil (30,9%), gli split (15,2%), i radiatori (11,4%), mentre i termoconvettori rappresentano l'8%.

I tipi di generatore di calore o di trattamento d'aria installato sono soprattutto caldaia (il 64%) e condizionatore fisso (il 51%, quasi sempre associato a pompa di calore). Il 7,6% impiega il cogeneratore e il 17,2% l'unità trattamento aria (UTA). Ogni camera ha il sistema di regolazione della temperatura nel 70% dei casi. Il 15,4% impiega fonti rinnovabili, in particolare solare termico (68%).

Definizione di una metodologia per l'audit energetico negli edifici ad uso residenziale e terziario

Con tale attività, si è voluta definire una metodologia di riferimento per la diagnosi energetica degli edifici, in conformità del D.Lgs. 115/08 e del D.Lgs. 192/05 e s.m.i. per gli edifici ad uso residenziale e terziario, mirata al contenimento degli usi finali di energia elettrica e termica. Nel rapporto di ricerca sono descritte nel dettaglio le procedure che consentono di:

- rilevare i parametri significativi del sistema edificio-impianto;
- acquisire e analizzare i dati storici di fatturazione energetica;
- valutare i contratti di fornitura dell'energia;
- calcolare i fabbisogni e gli utilizzi di energia primaria per gli impianti elettrici, l'illuminazione, il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria, il trattamento dell'aria;
- calcolare l'energia prodotta da fonti rinnovabili (fotovoltaico, solare termico, biomasse);
- individuare i sottosistemi in cui le energie disperse sono maggiori;
- individuare le migliori modalità di conduzione e gestione dell'edificio;
- valutare, da un punto di vista tecnico-economico, gli interventi di retrofit energetico;
- valutare l'opportunità di impiego di metodi più accurati per stimare i flussi energetici (campagne di misure e monitoraggio, simulazioni dinamiche del sistema).

Le procedure di calcolo sono corredate da tabelle e schede tecniche di riferimento, che hanno lo scopo di facilitare il lavoro del soggetto che dovrà svolgere l'audit, e rimandano alle normative tecniche del settore in vigore in Italia e in Europa. L'obiettivo finale del lavoro è colmare un vuoto normativo in materia di diagnosi energetica e favorire soprattutto le Pubbliche Amministrazioni che promuovono tali iniziative e non hanno a disposizione uno strumento metodologico di riferimento per una chiara definizione delle procedure che i tecnici competenti dovrebbero seguire.

Per diagnosi energetica del sistema edificio-impianto s'intende una procedura sistematica finalizzata alla conoscenza degli usi finali di energia e all'individuazione e all'analisi di eventuali inefficienze e criticità energetiche dell'edificio e degli impianti presenti. La diagnosi energetica prevede una serie di operazioni consistenti nel rilievo ed analisi di dati relativi al sistema edifico-impianto in condizioni standard di esercizio (dati geometrico-dimensionali, termofisici dei componenti l'involucro edilizio, prestazionali del sistema impiantistico) nell'analisi e nelle valutazioni economiche dei consumi energetici dell'edificio. La finalità di una diagnosi energetica è quella di individuare modalità con cui ridurre il fabbisogno energetico e valutare sotto il profilo costi-benefici i possibili interventi, che vanno dalle azioni di retrofit a modelli di esercizio/gestione ottimizzati delle risorse energetiche.

Nel momento in cui viene "fotografato" energeticamente l'edificio, la diagnosi si pone l'obiettivo di capire in che modo è utilizzata l'energia (ricostruzione di un bilancio in usi finali), individuare eventuali cause di sprechi e quali interventi possono essere posti in essere, al fine di valutare non solo la fattibilità tecnica, ma anche e soprattutto quella economica delle azioni proposte. Gli obiettivi di una diagnosi energetica sono:

- definire il bilancio energetico del sistema edificio-impianto e individuare i possibili recuperi delle energie disperse;

- valutare le condizioni di comfort e di sicurezza necessarie;
- individuare appropriate tecnologie *energy-saving* e valutarne le opportunità tecnico-economiche;
- ottimizzare le modalità di gestione del sistema edificio-impianto (contratti di fornitura di energia, modalità di conduzione) ai fini di una riduzione dei costi di gestione.

Al fine di valutare la prestazione energetica del sistema edificio-impianto occorre predisporre:
- un modello energetico (termico ed elettrico) che riassuma la tipologia di utenza, le potenze installate, i profili di utilizzazione e le ore di funzionamento degli impianti;
- un bilancio energetico che descriva l'andamento dei flussi energetici caratteristici dell'edificio in modo da valutare in maniera puntuale i consumi specifici, le criticità e gli interventi da considerare.

Nello schema riportato in Figura 157, tratto dalla UNI EN 15265:2008, sono mostrati i principali flussi energetici di un edificio.

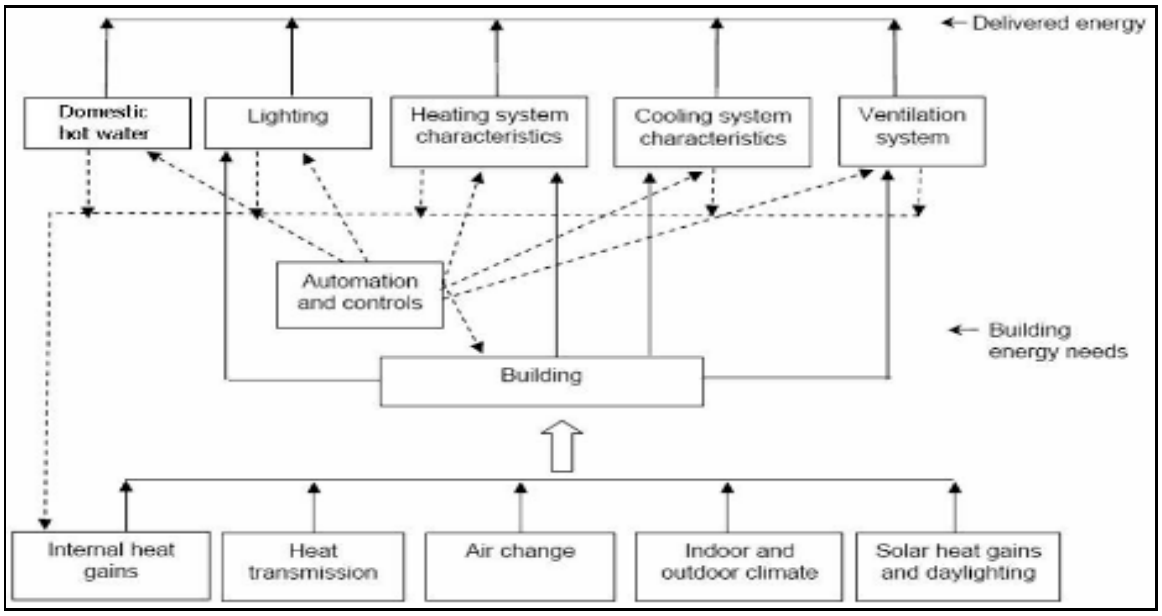


Figura 157. Principali flussi energetici di un edificio

L'esito della diagnosi energetica consente, in conclusione, di valutare il fabbisogno caratteristico del sistema edifico-impianto e di individuare degli indicatori specifici di richiesta di energia primaria (kWh/m^2 o kWh/m^3), rappresentativi della prestazione energetica dell'edificio. Eventuali differenze emerse dal confronto degli indicatori con quelli "reali" ricavati dalle fatturazioni energetiche consentono di valutare l'accuratezza delle ipotesi assunte, eventuali disfunzioni riscontrabili nell'effettivo esercizio degli impianti installati, nonché una gestione non ottimale da parte dell'utenza.

Dato che il calcolo energetico è svolto rispetto ad un anno meteorologico "statistico", i dati di fatturazione, ove possibile, andrebbero "normalizzati" e resi indipendenti dagli anni climatici a cui si riferiscono. Per la normalizzazione si possono utilizzare indici di severità climatica riferiti agli anni di fatturazione, ad esempio i Gradi Giorno invernali ed i Gradi Giorno estivi basati sulla temperatura sole-aria. Se lo storico è sufficientemente lungo, l'operazione di media delle fatturazioni tra i vari anni disponibili può essere sufficiente ad annullare gli effetti di stagioni particolarmente calde o fredde. In definitiva, il confronto può portare alla validazione del procedimento o alla sua revisione, con l'introduzione di analisi aggiuntive.

Nella seconda fase della diagnosi sono stati individuati e valutati gli interventi per migliorare le prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto.

Una volta verificata la possibilità di poter ottenere una diminuzione sostanziale dei fabbisogni energetici dell'edificio, si procede alla simulazione degli interventi, ipotizzandone la realizzazione a livello di involucro, di impianti termici, di impianto di illuminazione, di impianti di produzione da fonti rinnovabili. Sono da valutare non solo le singole azioni, ma anche possibili interventi integrati su più sistemi, in modo da evidenziare eventuali conflitti o sinergie (ad esempio, ottenere una sostanziale diminuzione del fabbisogno di energia termica dell'involucro senza contemporaneamente prevedere la sostituzione del generatore di calore può portare quest'ultimo a lavorare costantemente a fattori di carico troppo bassi e dunque inefficienti).

Nella relazione finale di diagnosi energetica sono descritti dall'auditor soltanto i possibili interventi di riqualificazione energetica del sistema edificio-impianto di cui sia stata accertata la fattibilità tecnica (incluso il rispetto dei vincoli paesaggistici, ambientali, architettonici, archeologici) ed economica. I principali indicatori economici d'investimento che è possibile utilizzare in queste valutazioni sono:

- VAN (valore attuale netto);
- IP (indice di profitto);
- TIR (tasso interno di rendimento) o IRR (*internal rate of return*);
- TRA (tempo di ritorno attualizzato);
- TR (tempo di ritorno semplice) o SP (*simple payback time*).

La determinazione del valore dei flussi energetici deve essere effettuata preferibilmente sulla base dei dati e delle informazioni ricavabili dalla documentazione disponibile, dalle interviste all'utenza e nella fase di sopralluogo, prestando comunque attenzione a salvaguardare l'economicità in termini di tempo e risorse delle operazioni di diagnosi. Qualora alcuni dati non fossero disponibili o se la loro rilevazione risultasse troppo impegnativa, si possono utilizzare le procedure semplificate e i valori pre-calcolati forniti dalle normative e citati nel rapporto. In particolare l'impegno di maggiori risorse da parte dell'auditor va concentrato nei sottosistemi e nelle zone termiche più energivore.

Dati di benchmark

L'attività è stata finalizzata ad individuare il livello dei consumi energetici di sistemi edificio-impianto rappresentativi del parco nazionale. A tale scopo sono state svolte diverse simulazioni dinamiche su modelli edilizi ad uso "istituti di credito ed assicurativi" riconducibili a edifici esistenti e a nuovi edifici, al fine di definirne le diverse prestazioni energetiche, confrontarle ed evidenziarne le criticità. La metodologia utilizzata per svolgere l'analisi, in particolare, può riassumersi nei seguenti punti:

- individuazione dei dati climatici appropriati al fine di ricondurre le analisi alla variabilità delle condizioni nazionali;
- definizione di un edificio-tipo su cui effettuare le analisi al variare dei parametri caratterizzanti;
- definizione di un set di varianti da applicare all'edificio-tipo sulla base di specifiche tecnologie costruttive, assegnate per diversa epoca di costruzione e collocazione sul territorio nazionale;
- valutazione dei fabbisogni per la climatizzazione dei modelli tramite simulazioni dinamiche effettuate con il software TRNSYS;
- valutazione dei consumi energetici riconducibili agli impianti di climatizzazione, facendo riferimento a tipologie impiantistiche ricorrenti, seguendo l'approccio standard riportato nelle specifiche tecniche UNI TS 11300-2 (2008) e UNI TS 11300-3 (2010).

Dati climatici

Al fine di considerare un insieme sufficientemente rappresentativo delle condizioni climatiche del territorio nazionale, sono stati selezionati sette capoluoghi di provincia che, sulla base della classificazione nazionale di riferimento (D.P.R. 412, 1993), appartengono a diverse zone climatiche, come mostrato in Figura 158 e nella Tabella 51.

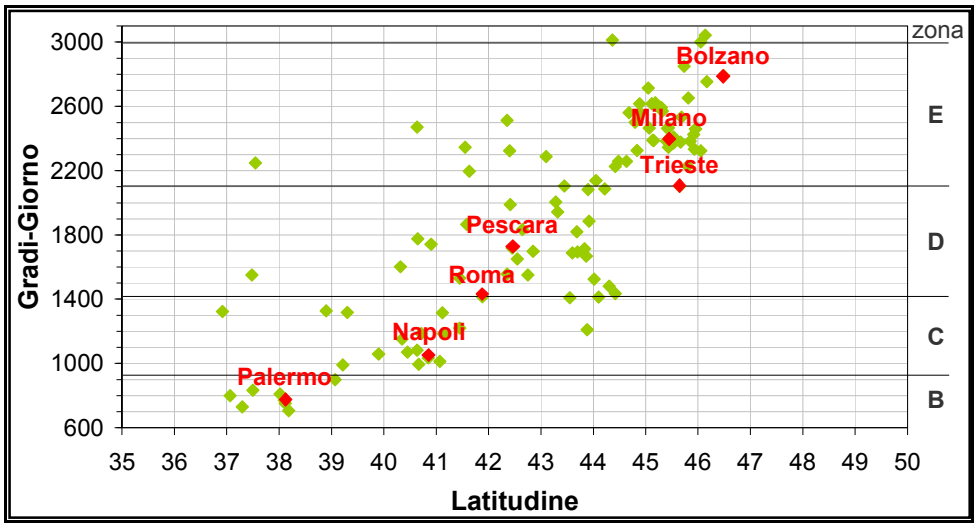


Figura 158. Selezione delle località per il presente studio in base alla classificazione climatica nazionale di riferimento

Tabella 51. Località selezionate in base alla classificazione climatica riportata nel D.P.R. 412 (e ss. mm. e i.)

	Bolzano	Milano	Trieste	Pescara	Roma	Napoli	Palermo
Gradi-giorno	2791	2404	2102	1718	1415	1034	751
Zona climatica	E	E	E	D	D	C	B

Per svolgere le simulazioni su base oraria sono stati utilizzati i file climatici TRY (Test Reference Year) disponibili nella banca dati del software TRNSYS.

Allo scopo di verificare che le analisi fossero condotte con dati orari coerenti con quelli medi mensili riportati nella norma UNI 10349 (nel caso si vogliano utilizzare i risultati ottenuti con il presente studio per estendere, pur se con interpolazioni di prima analisi, le valutazioni ad altre specifiche realtà climatiche nazionali), i dati climatici di libreria TRNSYS di temperatura dell'aria e di radiazione solare globale incidente sull'orizzontale sono stati elaborati in valori medi mensili e messi a confronto con quelli di norma. Come si può desumere dai grafici che seguono, i dati climatici rivelano in linea di massima andamenti analoghi, con scostamenti medi annuali superiori al 10% solo nel caso della temperatura dell'aria di Milano (15%) e di Napoli (13%) (considerate leggermente più "fredde" dal file climatico rispetto a quanto rilevabile secondo norma). Come esempio si riportano in Figura 159 alcuni dati climatici elaborati per la città di Milano.

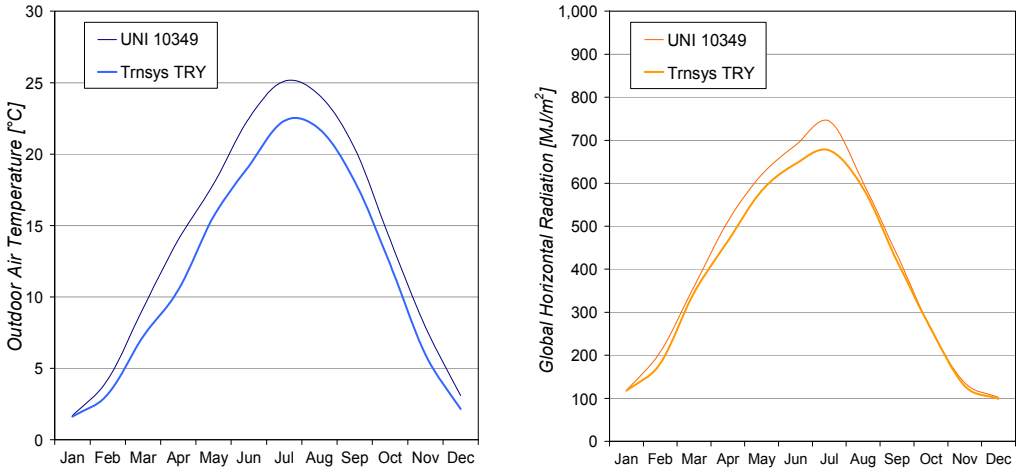


Figura 159. Valori medi mensili di temperatura dell'aria e di radiazione solare globale di Milano

Impostazione del modello

Per similitudine funzionale, gli istituti di credito ed assicurativi sono stati assimilati alla generica tipologia di istituto bancario. Secondo Zevi (2003), gli istituti bancari comprendono caratteristiche relative alle destinazioni d'uso del terziario commerciale per quanto riguarda le aree accessibili al pubblico e caratteristiche relative alle destinazioni d'uso del terziario non commerciale per quanto riguarda i locali destinati alle attività direzionali, gestionali ed amministrative. La specificazione degli spazi interni dipende principalmente dal ruolo di influenza territoriale della sede considerata. Vengono infatti individuati tre livelli "gerarchico-direzionali" principali:

1. sedi centrali, con raggio d'influenza nazionale e internazionale, sono caratterizzate essenzialmente da locali adibiti ad uffici;
2. filiali, con raggio di influenza regionale e provinciale, ospitano sia funzioni amministrative e gestionali sia attività d'agenzia;
3. agenzie, con raggio d'influenza locale, dedicata esclusivamente al contatto e all'erogazione di servizi specifici al pubblico – l'estensione degli spazi è tale da impegnare solo parte di un edificio, generalmente il piano terra (per garantire l'accessibilità).

La ricerca muove perciò da un edificio-tipo con geometria rettangolare (30 m x 12 m) a doppio affaccio contrapposto, caratterizzato da 6 piani fuori terra e da un piano interrato occupato da ambienti non condizionati (es. parcheggi e locali tecnici). L'edificio è strutturato come una filiale, con l'intero piano terra occupato da funzioni di agenzia e i cinque piani superiori adibiti alle attività amministrative e gestionali, occupati perciò da locali per uffici. In tal modo si potranno ottenere risultati relativi ai soli uffici (a rappresentare una sede centrale), alla sola agenzia e alla combinazione dei due (filiale).

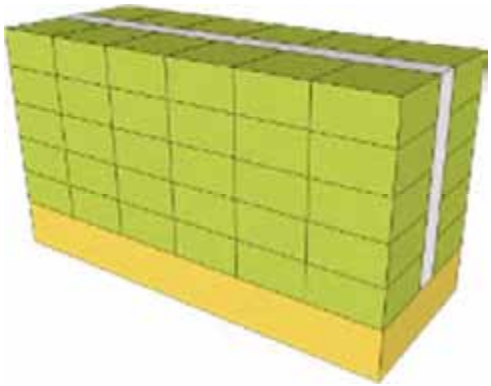


Figura 160. Schema tridimensionale degli ambienti condizionati dell'edificio-tipo.
In verde gli uffici singoli dei piani superiori e in giallo il piano dedicato alle attività di agenzia

Le aperture sono posizionate esclusivamente sulle due facciate principali, per consentire un'analisi di sensitività sugli effetti dovuti ai diversi orientamenti principali. Le varianti apportate all'edificio-tipo per definire il set di simulazioni sono di tipo tecnologico-costruttivo, e le diverse caratteristiche sono state selezionate al fine di considerare realtà edilizie riconducibili a tre principali epoche costruttive nazionali.

Epoca contemporanea. Edifici di nuova costruzione caratterizzati da requisiti di involucro che rientrano nei limiti del D.Lgs. 195 (2005) e succ. modif. e integ. Tali requisiti riguardano in primo luogo il massimo valore di trasmittanza termica degli elementi d'involucro, definiti nell'allegato C del D.Lgs. 311 (2006); in secondo luogo, il D.P.R. 59 (2009) prescrive minimi valori di massa superficiale o massimi valori di trasmittanza periodica per gli elementi opachi d'involucro verticale e di copertura, per le località che non ricadono in zona climatica F e in cui il valore medio mensile di irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione sia maggiore o uguale a 290 W/m^2. Tra i capoluoghi considerati, Pescara, Roma, Napoli e Palermo rispondono a queste condizioni, ma il rispetto delle prescrizioni, indicate in Tabella 52, è stato garantito anche nel caso delle altre località.

Tabella 52. Limiti di massa superficiale e trasmittanza termica periodica prescritti dal D.P.R. 59/09

	Massa Superficiale [kg m^{-2}]	Trasmittanza Termica Periodica [W m^{-2} K^{-1}]
Strutture opache verticali	230	0,12
Strutture opache orizzontali o inclinate	-	0,20

Anni compresi tra il 1960 e il 1980. Corrispondono al periodo di più intensa urbanizzazione in Italia, cui risale buona parte degli edifici attualmente utilizzati come uffici: questi edifici sono caratterizzati da tecnologie pressoché indifferenziate sul territorio.

Epoca tradizionale, cui risalgono gli edifici più vecchi, generalmente caratterizzati da murature pesanti in mattoni o pietra.

Piani adibiti ad uffici – Sede centrale

Il blocco superiore dell'edificio, composto da 5 piani, è destinato alle attività amministrative e gestionali ed è suddiviso in un ambiente di distribuzione centrale e due setti laterali contenenti ciascuno 30 ambienti-ufficio, caratterizzati dalle seguenti dimensioni: 25 m^2 di superficie utile e 67,50 m^3 di volume interno netto. Lo schema planimetrico dei singoli piani è mostrato in Figura 161.

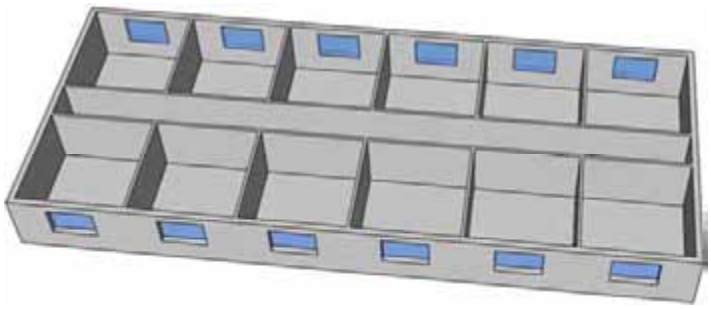


Figura 161. Schema tridimensionale di uno dei piani adibiti ad uffici
(porzione finestrata convenzionale)

Poiché il volume edilizio contente gli uffici è caratterizzato da un doppio affaccio contrapposto e simmetrico, è stato possibile considerare le diverse esposizioni Nord-Sud ed Est-Ovest.

Caratteristiche costruttive

In questo paragrafo sono stati presi in esame le opzioni tecnologico-costruttive considerate e di queste descritte le prestazioni e le caratteristiche tecnico-energetiche dei componenti edilizi i esame. A titolo esemplificativo si riportano in Tabella 53 le caratteristiche termofisiche degli elementi costruttivi per l'edificio *nuovo convenzionale*.

Tabella 53. Caratteristiche termofisiche degli elementi costruttivi opachi nell'edificio nuovo convenzionale per la zona climatica E (Milano, Bolzano, Trieste)

	s [cm]	U [W m^{-2} K^{-1}]	M_s [kg m^{-2}]	C [kJ m^{-2} K^{-1}]	Y_{ie} [W m^{-2} K^{-1}]
Pareti perimetrali	35,0	0,33	264	261	0,06
Copertura	53,0	0,30	462	396	0,04
Solaio verso locali non riscaldati	38,5	0,32	309	262	0,10
Solai interni	31,0	0,77	299	257	-
Tramezzi interni	11,0	1,57	92	84	-

Le finestre, anch'esse con trasmittanza variabile secondo i requisiti di legge, coprono una superficie pari a 1/8 dell'area di pavimento, che corrisponde al 23% della facciata al netto delle strutture. Globalmente, l'involucro della parte adibita ad uffici presenta le caratteristiche termofisiche indicate in Tabella 54.

Tabella 54. Caratteristiche termofisiche complessive dell'involucro del blocco per uffici nel caso dell'edificio nuovo convenzionale

	Trasmittanza media [W m^{-2} K^{-1}]	Massa superficiale media [kg m^{-2}]	Capacità termica media [kJ m^{-2} K^{-1}]
Zona E	0,47	284	261
Zona D	0,53	284	260
Zona C	0,59	283	260
Zona B	0,69	283	259

Apporti termici interni

Nei piani adibiti alle attività amministrative e gestionali, riguardo gli apporti termici interni sono state assunte le indicazioni della specifica tecnica UNI TS 11300-1 (2008) per valutazioni adattate all'utenza, che definiscono i carichi termici complessivi (dovuti alla presenza di persone, all'illuminazione artificiale e alla presenza di apparecchiature) e un profilo base di applicazione di tali carichi (vedi UNI TS 11300). Nello studio, poiché richiesto dal software di simulazione al fine di definire le diverse componenti radiative e convettive, i carichi termici sono stati suddivisi tra le diverse fonti (occupanti, luci, apparecchiature elettriche) in base a pesature desunte dal Quaderno Tecnico Svizzero SIA 2024 (1994).

Per quanto riguarda questi locali ad uso uffici, sono stati quindi individuati 8,4 W/m^2 di apporti dovuti all'illuminazione artificiale, 5,6 W/m^2 dovuti alle apparecchiature elettriche e 6 W/m^2 dovuti alla presenza di persone (corrispondenti a due utenti per ufficio in attività sedentaria), applicati secondo i profili riportati nel seguito.

Tabella 55. Profili orari di applicazione dei carichi termici interni per i locali ad uso ufficio

	Luci		Apparecchiature		Persone	
	Lun-Ven	Sab-Dom	Lun-Ven	Sab-Dom	Lun-Ven	Sab-Dom
00:00-07:00	12%	12%	18%	18%	0%	0%
07:00-17:00	100%		100%		100%	
17:00-24:00	12%		18%		0%	

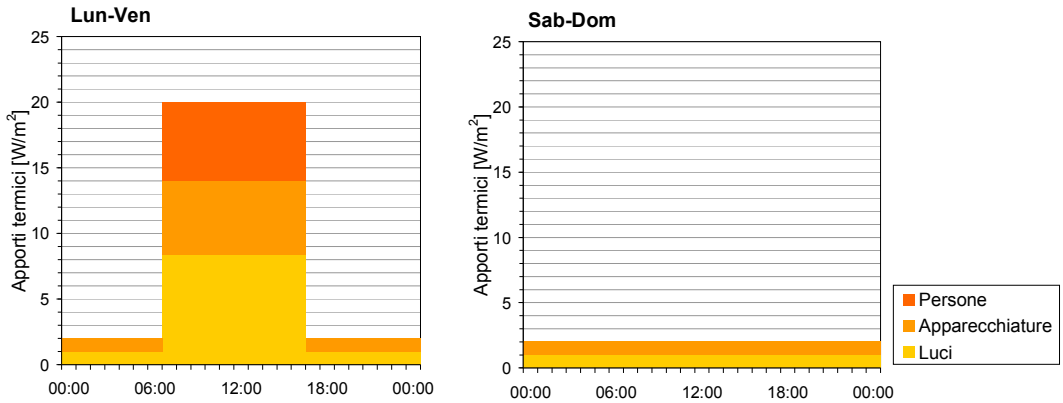


Figura 162. Profili orari dei carichi termici interni complessivi, in W/m^2, nei locali ad uso ufficio

Per quanto riguarda la zona di distribuzione, invece, sono stati considerati i soli carichi dovuti all'illuminazione artificiale, sempre secondo UNI TS 11300-1, posti pari a 8 W/m^2 ed applicati secondo il profilo riportato Tabella 56.

Tabella 56. Profilo orario di applicazione dei carichi termici dovuti all'illuminazione artificiale per l'ambiente di distribuzione

	Luci	
	Lun-Ven	Sab-Dom
00:00-07:00	12,5%	12,5%
07:00-17:00	100%	
17:00-24:00	12,5%	

Flussi d'aria

I flussi d'aria impostati nel bilancio termico dell'edificio sono stati considerati con condizioni termoigrometriche corrispondenti a quelle dell'ambiente esterno.

Per quanto riguarda la definizione del tasso di ricambio d'aria, sono state assunte come riferimento le indicazioni della specifica tecnica UNI TS 11300-1 (2008) per valutazioni adattate all'utenza, che, al fine di determinare la portata di ventilazione necessaria per soddisfare l'esigenza di qualità dell'aria interna, richiama la norma UNI EN 15251 (2008) sui criteri di determinazione dei parametri relativi all'ambiente interno da considerare nelle valutazioni delle prestazioni energetiche degli edifici. In particolare, per quanto riguarda il tasso di ricambio d'aria necessario a garantire un adeguato livello di qualità dell'aria interna, secondo la norma UNI EN 15251.

E' stata selezionata la categoria di qualità dell'ambiente standard (II) di un edificio poco inquinato (funzione della qualità dei materiali di costruzione utilizzati), con un tasso di ricambio d'aria complessivo risultante per gli uffici pari a 1,40 l/(s m^2), che corrisponde a 1,90 vol/h.

Per quanto riguarda le ore in cui l'edificio non è occupato, la norma consente di considerare un tasso di ventilazione minimo compreso tra 0,10 e 0,20 l/(s m^2) per garantire aria interna sufficientemente fresca all'inizio del periodo di occupazione (in coerenza con i valori convenzionali di infiltrazione naturale dell'aria attraverso l'involucro edilizio). Tali valori sono stati riportati all'interno del modello di simulazione impostando un tasso di infiltrazione costante di 0,15 l/(s m^2), pari a 0,20 vol/h. Per quanto riguarda i locali non condizionati, sono stati applicati i soli ricambi d'aria dovuti a infiltrazioni (0,20 vol/h).

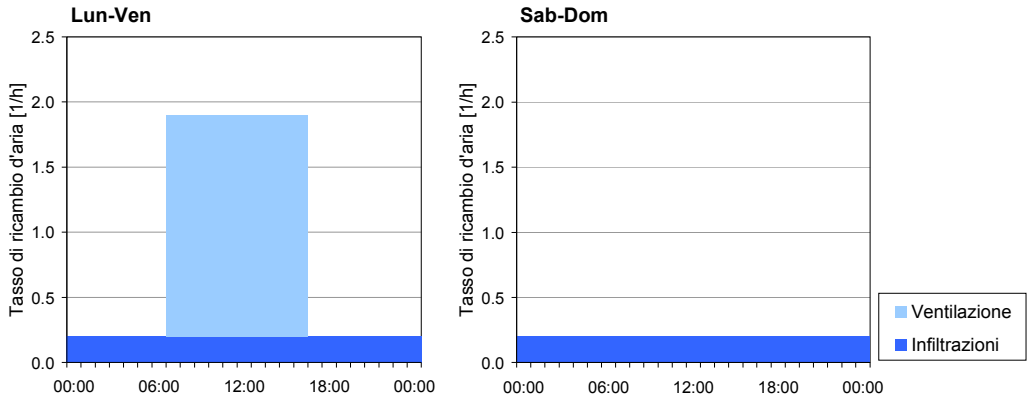


Figura 163. Profili orari del tasso di ricambio d'aria, in 1/h, per i locali adibiti a uso ufficio

Piano adibito ad agenzia – Agenzia

Il piano terra dell'edificio è caratterizzato da una superficie netta di 360 m^2 e da un volume netto di 1260 m^3 ed è stato organizzato sulla base di un esempio di distribuzione riportato su Zevi (2003) per un'agenzia bancaria di media importanza.

In base alle proporzioni suggerite da tale schema, la superficie del locale è stata ripartita in un'area per il pubblico (di 150 m^2) ed una per gli impiegati (210 m^2). Quest'ultima è stata ulteriormente suddivisa in una metà ad open-space (sportelli) e una metà ripartita da tramezzi (uffici dedicati alle operazioni di particolare importanza, delicatezza e/o riservatezza).

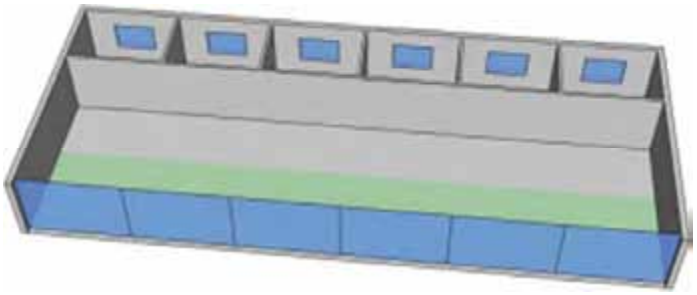


Figura 164. Schema tridimensionale del piano adibito ad agenzia.
In verde la porzione di superficie aperta al pubblico

Per quanto riguarda l'estensione delle superficie vetrate, in tutti i casi considerati l'intera facciata principale a delimitare la zona accessibile al pubblico è coperta da una vetrina, mentre la facciata principale che chiude gli uffici dedicati alle operazioni riservate presenta una singola finestra per ufficio, delle medesime dimensioni di quelle presenti ai piani superiori per le soluzioni convenzionali (per un'estensione totale di 18,9 m^2).

Dato che le superfici vetrate non sono distribuite in modo simmetrico tra le due facciate principali, in questo caso le esposizioni considerate sono quattro: Nord, Sud, Est e Ovest.

Caratteristiche costruttive

Nel caso del locale ad uso agenzia le opzioni tecnologico-costruttive sono state ridotte a tre, che corrispondono a quelle di tipo convenzionale riconducibili alle epoche considerate. Tale scelta è dettata principalmente dal fatto che soluzioni estremamente leggere quali quella sandwich e superfici completamente vetrate al di fuori della vetrina, infatti, andrebbero in conflitto con l'esigenza di sicurezza legata alla destinazione d'uso del piano.

In tutti i casi considerati, gli elementi vetrati utilizzati sono composti da una vetrocamera con lastra antisfondamento da 8 mm verso l'esterno e lastra di sicurezza da 6 mm verso l'interno: il trattamento superficiale delle lastre e il gas all'interno del vetrocamera è stato variato per rispettare, nel caso degli edifici di nuova costruzione, i requisiti di trasmittanza di legge. Per ragioni di privacy, inoltre, le superfici vetrate sono sempre schermate tramite tende interne di colore chiaro che, secondo quanto suggerito dalla UNI TS 11300-1 (2008) presentano un fattore di ombreggiamento di 0,2.

A titolo esemplificativo si riporta una descrizione relativa a edifici di nuova costruzione.

Edifici di nuova costruzione

Per gli edifici di nuova costruzione, gli elementi costruttivi opachi sono i medesimi della soluzione nuova convenzionale per i piani dedicati agli uffici, mentre quelli finestrati, definiti in modo da rispettare i limiti di trasmittanza prescritti dal D.Lgs. 311 (2006), sono caratterizzati dalle proprietà riassunte nella Tabella 57.

Tabella 57. Caratteristiche degli elementi d'involucro trasparente dei piani ad uso uffici per l'edificio nuovo vetrato

Zona	Vetro			Telaio	U totale [W/(m^2 K)]
	Tipo	U [W/(m^2 K)]	g		
E	Vetrocamera basso-emissiva, argon	1,65	0,58	Al (a taglio termico)	1,74
D	Vetrocamera basso-emissiva, aria	1,93	0,58	Al	2,19
C	Vetrocamera basso-emissiva, aria	2,07	0,58	Al	2,30
B	Vetrocamera, aria	2,70	0,59	Al	2,81

Globalmente, l'involucro della parte adibita ad agenzia presenta le caratteristiche termofisiche riportate in Tabella 58.

Tabella 58. Caratteristiche dell'involucro del piano adibito ad agenzia nel caso dell'edificio di nuova costruzione

	Trasmittanza media	Massa superficiale media	Capacità termica media
	[W/(m^2 K)]	[kg/m^2]	[kJ/(m^2 K)]
Zona E	0,65	260	228
Zona D	0,73	260	228
Zona C	0,76	260	228
Zona B	0,87	259	227

Apporti termici interni

La definizione delle caratteristiche di occupazione del locale di agenzia, che è stata modellata come un'unica zona termica, si è basata su valutazioni puntuali riguardo alle diverse componenti dei carichi interni.

I guadagni dovuti alla presenza di persone sono stati stimati sulla base degli indici di affollamento riportati dalla norma UNI 10339 (1995) e ai dati di produzione metabolica derivati dalla UNI EN ISO 7730 (2006). In particolare, l'indice di affollamento è stato calcolato come una combinazione tra quello relativo ad uffici singoli (in riferimento alla zona ripartita da tramezzi) e quello per gli uffici "*open space*", per un totale di 0,1 persone/m^2. La produzione metabolica assunta è quella per attività leggere condotte in piedi (applicazione tipica ad aree di vendita e banche) e corrisponde a 90 W/persona: il carico termico corrispondente è quindi di 9 W/m^2, che è stato poi modulato in base alla schedule riportata nella Tabella 59.

Tabella 59. Profili orari di applicazione dei carichi termici interni per occupazione relativa al locali ufficiosi agenzia

	Zona addetti (58%)		Zona pubblico (42%)		Totale Agenzia	
	Lun-Ven	Sab-Dom	Lun-Ven	Sab-Dom	Lun-Ven	Sab-Dom
00:00-08:00	0%	0%	0%	0%	0%	0%
08:00-12:00	100%		100%		100%	
12:00-14:00	100%		0%		58%	
14:00-16:00	100%		100%		100%	
16:00-17:00	100%		0%		58%	
17:00-24:00	0%		0%		0%	

I carichi termici dovuti alle luci artificiali sono stati desunti dalla norma svizzera SIA 380/4 (2006) sulla valutazione dei consumi elettrici degli edifici, che determina la potenza installata degli apparecchi d'illuminazione sulla base dei requisiti di illuminamento prescritto per le diverse destinazioni d'uso (ns. rif. UNI EN 12464-1, 2004) e in funzione dell'efficienza luminosa media delle lampade. In particolare, per la zona dedicata al pubblico sono stati considerati i requisiti delle aree di *reception* (200 lx e 8,5 W/m^2), mentre per la zona dedicata agli impiegati sono stati considerati quelli relativi alle aree per scrittura, lettura ed elaborazione dati (500 lx e 16 W/m^2), per un requisito di illuminamento complessivo di 374 lx e un carico elettrico corrispondente di 12,85 W/m^2. Considerando la pratica corrente, le luci sono considerate sempre accese durante le ore di occupazione (dalle 8:00 alle 17:00), mentre durante le ore notturne e del weekend è considerato il 10% di accensione dovuto alla presenza di luci di sicurezza.

La presenza delle apparecchiature elettriche è stata applicata secondo la schedule relativa ai locali per uffici, analogamente a quanto già introdotto in precedenza, modulando il carico termico costante indicato all'interno della UNI TS 11300-1 (2008): ne risulta una potenza installata di 7,51 W/m^2 considerata per la sola zona dedicata agli addetti (che copre il 58% della superficie totale), e una potenza installata complessiva di 4,36 W/m^2. I carichi termici globali risultanti sono riportati nei grafici che seguono.

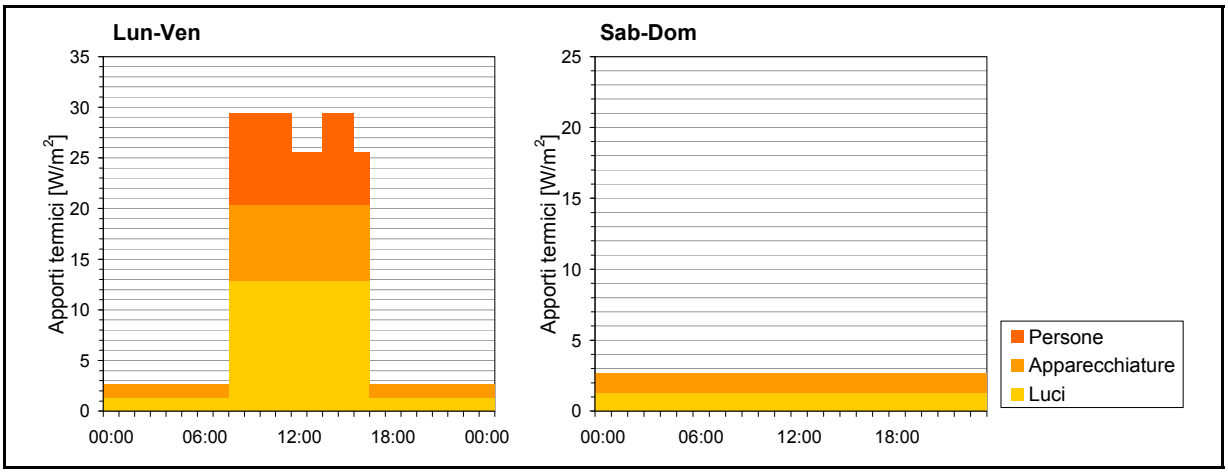


Figura 165. Profili orari dei carichi termici interni complessivi dell'agenzia

Flussi d'aria

I tassi di ricambio d'aria sono stati valutati, anche in questo caso, sulla base delle indicazioni della norma UNI EN 15251 per qualità dell'ambiente standard (II) ed edificio poco inquinato. Per definire il locale ad uso agenzia sono stati combinati i dati suggeriti per uffici open-space e per uffici singoli analogamente a quanto fatto per il profilo di occupazione, ottenendo così un tasso di ricambio d'aria complessivo pari a 1,33 l/(s m^2), che corrisponde a 1,37 vol/h, da garantire secondo il profilo di occupazione dell'edificio. Anche in questo caso, durante le ore in cui l'edificio non è occupato, è stato considerato un tasso d'infiltrazione costante di 0,15 l/(s m^2), pari a 0,20 vol/h.

Caratteristiche costruttive combinate – Filiale

Le caratteristiche costruttive degli edifici adibiti a filiale, con entrambe le funzioni di agenzia e amministrative, come combinazione delle parti sono riportate nella Tabella 60.

Tabella 60. Caratteristiche termofisiche complessive dell'involucro dell'edificio intero adibito a filiale a seconda della località climatica e della soluzione costruttiva considerata

		MI	BZ	TS	PE	RM	NA	PA
Nuovo Convenzionale	U [W/(m^2 K)]	0,53			0,61		0,67	0,80
	Ms [kg/m^2]	266			266		265	265
	C [kJ/(m^2 K)]	246			245		245	244
Nuovo Vetrato	U [W/(m^2 K)]	0,76			0,87		1,02	1,23
	Ms [kg/m^2]	194			194		194	194
	C [kJ/(m^2 K)]	169			169		168	168
60/80 Convenzionale	U [W/(m^2 K)]	1,36						
	Ms [kg/m^2]	262						
	C [kJ/(m^2 K)]	231						
60/80 Vetrato	U [W/(m^2 K)]	1,47						
	Ms [kg/m^2]	144						
	C [kJ/(m^2 K)]	130						
Tradizionale	U [W/(m^2 K)]	1,40					1,35	
	Ms [kg/m^2]	605					527	
	C [kJ/(m^2 K)]	519					399	

Impostazione degli impianti

Al fine di considerare una prestazione impiantistica relativa ad una dotazione di larga diffusione, si è fatto riferimento alle modalità di valutazione dei rendimenti delle componenti dell'impianto e dei consumi elettrici dovuti agli ausiliari suggerite dalla specifica tecnica UNI TS 11300.

Come impianto convenzionale è stato considerato un sistema a ventilconvettori a 4 tubi, dedicati a riscaldamento e raffrescamento, alimentati da caldaia a gas e da macchina frigorifera centralizzati e associati ad un sistema di ventilazione/aria primaria.

Per quanto riguarda l'impianto di riscaldamento, sono stati ipotizzati sistemi di generazione e distribuzione diversi a seconda dell'epoca di costruzione dell'edificio, sulla base dei dati di riferimento riportati all'interno della UNI TS 11300-2.

Il rendimento dei generatori, così come i consumi elettrici dovuti agli ausiliari delle caldaie, sono stati valutati sulla base della procedura riportata in Appendice B della UNI TS 11300-2, a partire dalla taglia della macchina e dal fattore di carico orario ottenuti con le simulazioni del presente studio.

Per il raffrescamento è stato ipotizzato l'utilizzo di rete di distribuzione, terminali di emissione e sistema di regolazione analoghi a quanto ipotizzato per il riscaldamento, assumendo quindi i dati di riferimento riportati all'interno della UNI TS 11300-3. Per quanto riguarda la macchina frigorifera la specifica tecnica prevede una valutazione del rendimento mensile basata sul fattore di carico e sulla curva di efficienza del generatore: due diverse curve di efficienza (Figura 166) sono state utilizzate a partire da dati nominali di rendimento differenziati tra gli edifici di nuova costruzione (EER_{nom} pari a 5,0) e quelli più vecchi (EER_{nom} pari a 3,5).

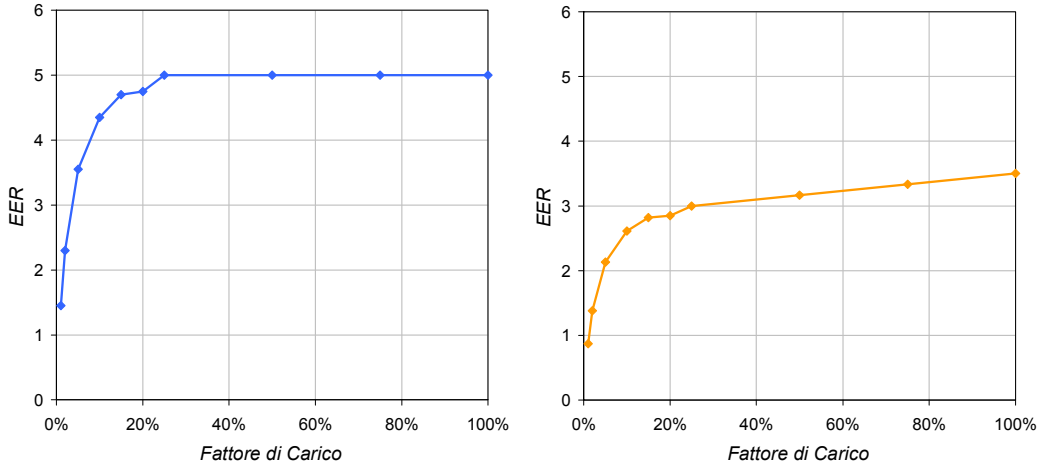


Figura 166. Curve di efficienza delle macchine frigorifere utilizzate nello studio, per edifici di nuova costruzione (sx) e i più vecchi (dx)

Per ricondurre ai consumi elettrici dovuti agli ausiliari per emissione e distribuzione sono stati stimati:

- portata d'aria media dei ventilconvettori di 300 m^3/h, con 12 terminali installati per piano (sia per gli uffici che per l'agenzia);
- portate di fluido vettore dimensionate per i singoli casi a partire dal carico termico;
- potenza elettrica dei ventilatori del sistema di ventilazione/aria primaria dimensionati sulla base della portata d'aria di rinnovo necessaria a rispettare i requisiti di qualità dell'aria interna.

Valutazioni energetiche

Il fabbisogno di climatizzazione della stagione invernale e di quella estiva degli edifici simulati è stato valutato sull'intero arco dell'anno, non vincolando alle limitazioni del periodo di riscaldamento ex D.P.R. 412, in modo analogo a quanto previsto dalla specifica tecnica UNI TS 11300-1 per valutazioni adattate all'utenza.

Riguardo la regolazione delle condizioni termiche interne, nella pratica comune i consumi di energia per condizionamento sono ricondotti a set-point di temperatura dell'aria, generalmente imposti a valori nominali di 20 °C per riscaldamento e 26 °C per raffrescamento. Ciononostante, nel presente studio l'edificio è stato regolato impostando in TRNSYS la temperatura operativa (parametro di riferimento per determinare le effettive condizioni di comfort) poiché, in caso di temperature superficiali sfavorevoli, è prassi diffusa quella di correggere il set-point di temperatura dell'aria per compensare il parametro radiante.

Le simulazioni del fabbisogno termico dell'edificio, sono state effettuate impostando la domanda termica e frigorifera nei periodi di occupazione dell'edificio (dalle 07:00 alle 17:00), mentre per le restanti ore il sistema edilizio è stato considerato in condizioni di free-floating.

Domanda di energia

La prima valutazione di confronto tra le soluzioni edilizie considerate è stata effettuata sulla base del fabbisogno di energia termica e frigorifera richiesto dagli edifici per mantenere le condizioni ambientali interne nominali (20 °C e 26 °C di temperatura operativa rispettivamente per riscaldamento e raffrescamento, durante gli orari di occupazione).

Nei grafici di Figura 167 è riportato il fabbisogno specifico di riscaldamento totale annuale relativo ai soli piani adibiti ad uffici, che potrebbero rappresentare un edificio dedicato ad una sede centrale, valutato per le diverse caratteristiche costruttive considerate, per le tre principali località d'analisi (Milano, Roma, Palermo) e per le due esposizioni Nord-Sud ed Est-Ovest.

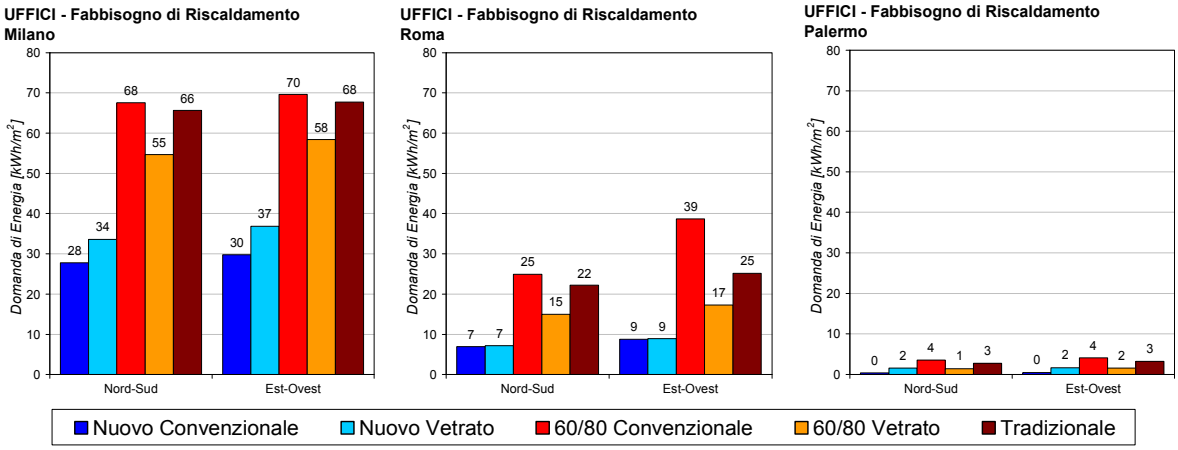


Figura 167. Fabbisogno di riscaldamento specifico relativo ai piani ad uso uffici nelle città di Milano, Roma e Palermo

Per quanto riguarda la stagione invernale, gli edifici di nuova costruzione, caratterizzati da elementi d'involucro che rispettano i più recenti limiti di trasmittanza, presentano le migliori prestazioni. Tra i due, in particolare, quello convenzionale presenta sempre i minori fabbisogni, dimostrando che i superiori guadagni solari attraverso le superfici vetrate non sono in grado di compensare le maggiori dispersioni per trasmissione attraverso le medesime superfici.

Tra gli edifici risalenti ad epoche precedenti, quelli convenzionali, caratterizzati da elementi opachi con trasmittanza particolarmente alte e superfici vetrate limitate, risultano sempre in fabbisogni molto più alti rispetto a quello vetrato: quest'ultimo, infatti. si avvantaggia sia di maggiore radiazione solare entrante attraverso le vetrate sia di superfici verticali opache con una trasmittanza prossima a quella di legge (0,36 W/(m^2 K)). In linea generale, l'edificio con esposizione Nord-Sud presenta fabbisogni più bassi di quello con esposizione Est-Ovest, grazie ai maggiori guadagni solari durante i mesi invernali negli uffici rivolti a Sud.

Per quanto riguarda la stagione estiva, gli edifici caratterizzati dalle migliori prestazioni sono quelli caratterizzati da minori superfici vetrate (Nuovo Convenzionale, 60/80 Convenzionale e Tradizionale), grazie ai minori carichi termici solari che ne derivano. In particolare, le soluzioni più performanti risultano essere sempre quelle più vecchie, nonostante le trasmittanze di tutti gli elementi d'involucro siano superiori a quelle attualmente prescritte per legge.

Nei grafici di Figura 168 sono riportati i valori di fabbisogno di raffrescamento per gli edifici considerati.

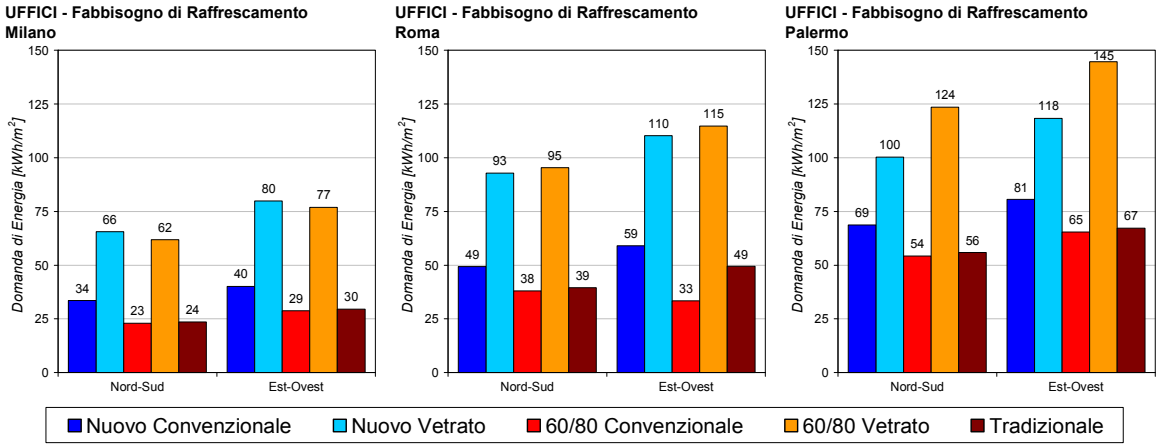


Figura 168. Fabbisogno di raffrescamento specifico relativo ai piani ad uso uffici nelle città di Milano, Roma e Palermo

L'edificio con le peggiori prestazioni del caso di Milano, la località più settentrionale, è quello nuovo vetrato, mentre a Roma e Palermo, è quello 60/80 vetrato. Il vantaggio della soluzione vetrata di nuova costruzione rispetto a quella risalente agli anni 60/80 cresce nell'andare in località caratterizzate da maggiori fabbisogni di

raffrescamento e da maggiore radiazione solare incidente. Anche per la domanda di raffrescamento gli edifici esposti ad Est e Ovest rivelano fabbisogni maggiori: al contrario della condizione invernale, infatti, la radiazione solare incidente a Sud durante le ore centrali della giornata nella stagione estiva dà uno scarso apporto a causa della maggiore altezza solare.

Effetti dell'ombreggiamento

Allo scopo di valutare quali differenze prestazionali estive possano essere riconducibili all'utilizzo di elementi ombreggianti, è stato effettuato un approfondimento d'analisi prevedendo l'installazione di veneziane mobili esterne per i locali ad uso uffici.

La strategia di ombreggiamento è modellata considerandone l'attivazione su tutti le esposizioni ad eccezione di quella Nord, e con livello di radiazione solare diretta incidente sulla superficie vetrata pari a 100 W/m^2 (Beccali e Ferrari, 2003).

Nel software di simulazione, la tipologia di ombreggiamento è stata dunque posta come "esterna" e con decremento dei guadagni solari attraverso le finestre dovuto ad un fattore di ombreggiamento del 30% relativo a veneziane di colore chiaro (Butera 1995).

I valori percentuali di riduzione del fabbisogno di raffrescamento in conseguenza all'installazione degli schermi solari per i diversi orientamenti considerati nelle città di Milano, Roma e Palermo sono riportati in Tabella 61.

Tabella 61. Percentuali di riduzione del fabbisogno di raffrescamento dovuti all'ombreggiamento delle superfici vetrate, per le esposizioni considerate nelle città di Milano, Roma e Palermo

	Esposizione Nord-Sud			Esposizione Est-Ovest		
	Milano	**Roma**	**Palermo**	**Milano**	**Roma**	**Palermo**
Nuovo Convenzionale	7%	9%	10%	9%	10%	10%
Nuovo Vetrato	12%	15%	14%	12%	13%	14%
60/80 Convenzionale	9%	9%	8%	11%	11%	10%
60/80 Vetrato	15%	17%	15%	15%	15%	14%
Tradizionale	9%	9%	9%	11%	11%	10%

Si può notare, come prevedibile, che il maggior beneficio ottenibile considerando gli effetti dell'ombreggiamento è riconducibile alle soluzioni vetrate, con valori crescenti al diminuire della latitudine.

Risultati relativi al piano adibito ad agenzia – Agenzia

Nei grafici delle figg. Figura 169 e Figura 170 è riportato il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento del solo piano adibito ad agenzia, analizzato per le diverse caratteristiche costruttive considerate, per le tre principali località d'analisi (Milano, Roma, Palermo) e per le diverse esposizioni (l'orientamento è determinato dalla posizione della vetrina che delimita lo spazio aperto al pubblico).

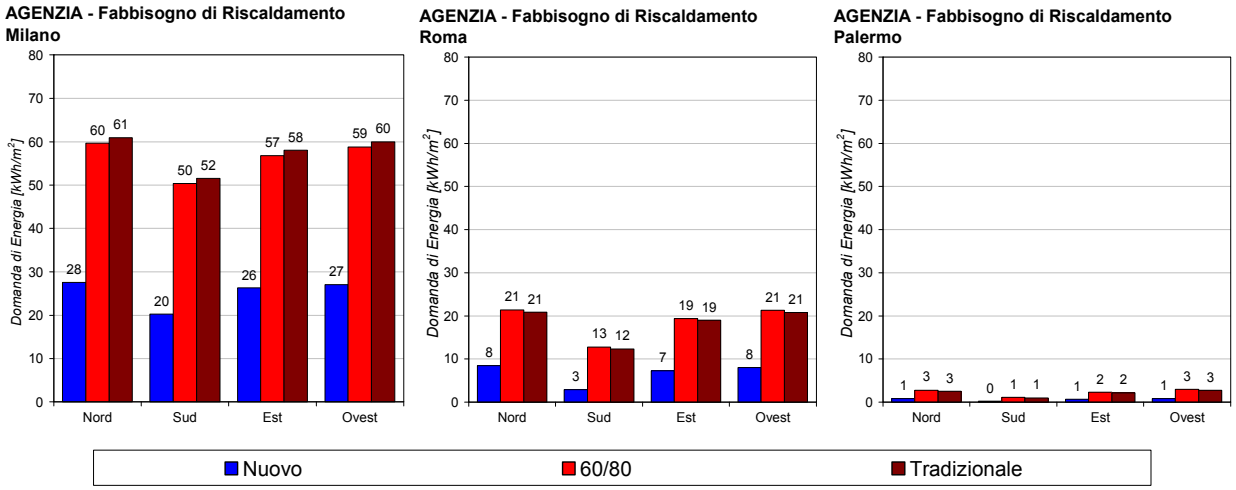


Figura 169. Fabbisogno di riscaldamento specifico relativo al piano agenzia nelle città di Milano, Roma e Palermo

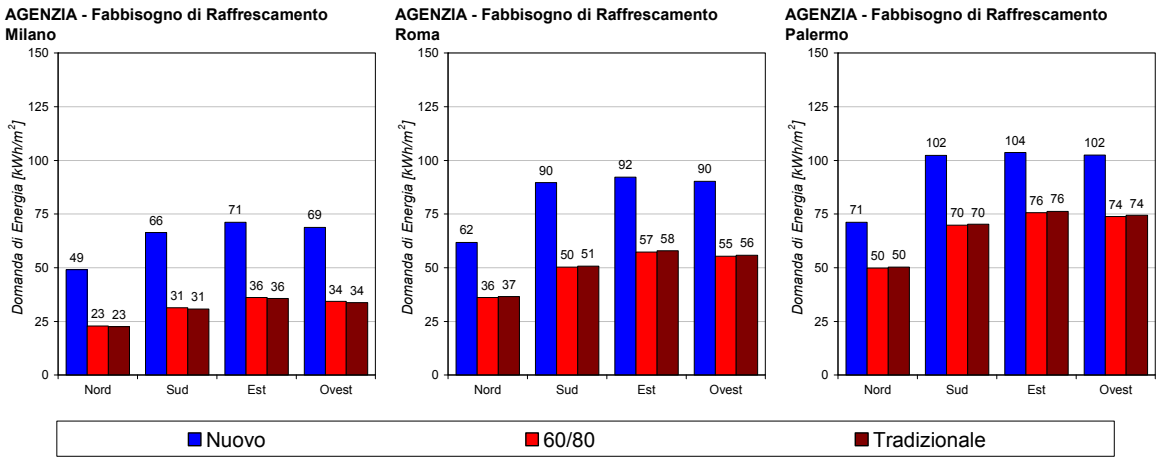


Figura 170. Fabbisogno di raffrescamento specifico relativo al piano agenzia nelle città di Milano, Roma e Palermo

Analogamente a quanto visto nel caso dei piani adibiti ad uffici, anche nel caso del locale di agenzia la soluzione di nuova costruzione presenta minori fabbisogni di riscaldamento e maggiori fabbisogni di raffrescamento rispetto agli edifici risalenti ad epoche precedenti. Per quanto riguarda la stagione invernale la spiegazione risiede nella minore trasmittanza degli elementi, mentre per la stagione estiva la causa può essere ritrovata nella presenza dello strato isolante all'interno degli elementi d'involucro opaco, che tende a trattenere maggiormente il carico termico interno.

Risultati relativi all'edificio completo – Filiale

Nei grafici che seguono è riportato il fabbisogno di riscaldamento annuale dell'edificio completo dei locali ad uso uffici e del piano adibito ad agenzia, valutato per le diverse caratteristiche costruttive considerate, per le diverse esposizioni (si consideri l'orientamento della vetrina dell'agenzia) e per le tre località principali.

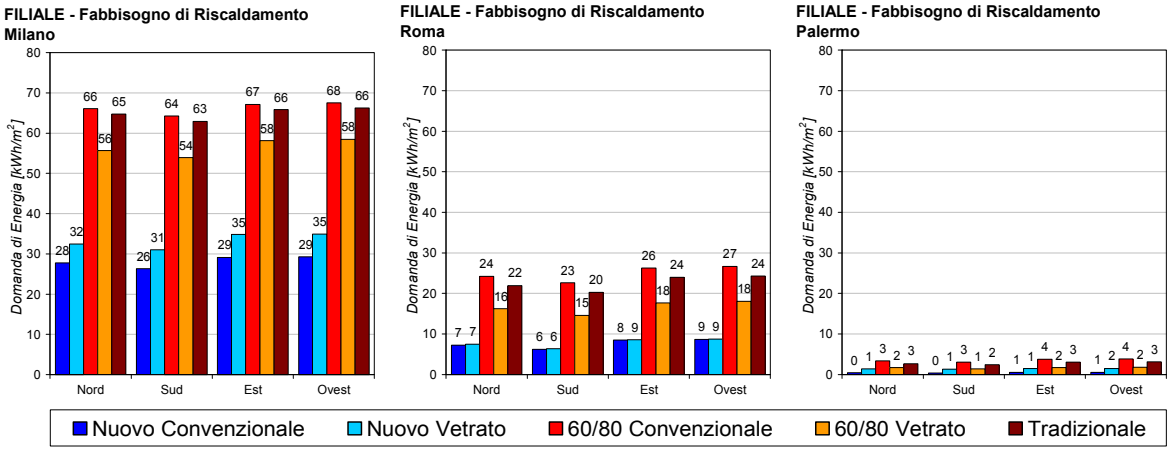


Figura 171. Fabbisogno di riscaldamento specifico relativo all'edificio ad uso filiale nelle città di Milano, Roma e Palermo

Per quanto riguarda la stagione invernale, appare evidente come le trasmittanze più basse degli elementi d'involucro negli edifici di nuova costruzione siano collegati a domande termiche molto più basse rispetto agli edifici "esistenti" (la differenza si attesta tra il 60% e il 70% nel caso degli edifici convenzionali). Tra gli edifici di epoca precedente, la soluzione sandwich-vetrata attesta le migliori prestazioni: rispetto alle soluzioni convenzionali del passato, la maggiore dispersione termica per trasmissione, dovuta alla trasmittanza media di involucro più elevata, viene in questo caso compensata dai maggiori guadagni solari attraverso le ampie superfici vetrate.

Le maggiori superfici vetrate rivelano invece significativi svantaggi per quanto riguarda la stagione estiva (Figura 172), sia considerando l'edificio vetrato degli anni 60/80 sia considerando quello di nuova costruzione.

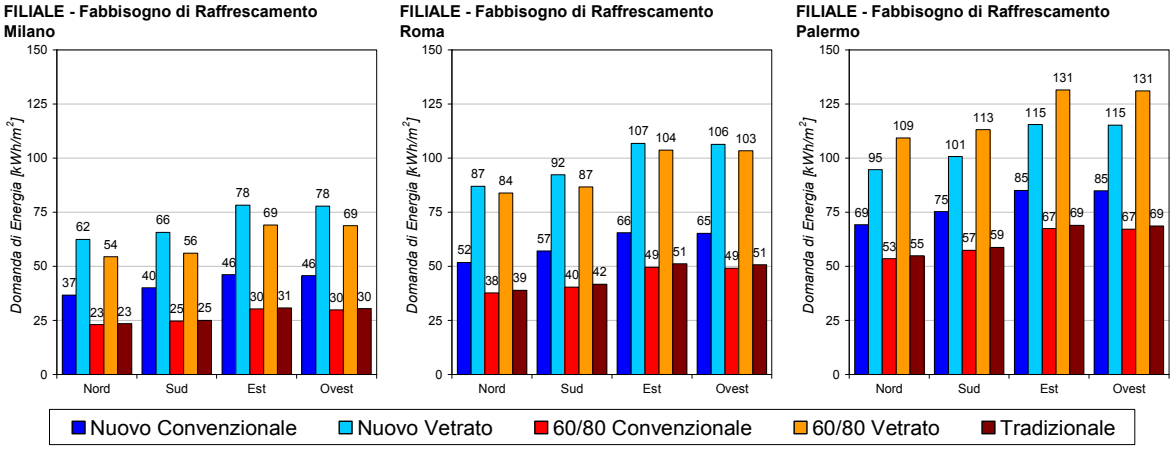


Figura 172. Fabbisogno di raffrescamento specifico per l'edificio ad uso filiale nelle città di Milano, Roma e Palermo

Diversamente da quanto visto per l'inverno, in estate gli edifici caratterizzati dalle migliori prestazioni sono quelli esistenti convenzionali, con superfici finestrate standard ed elementi opachi privi di isolante, mentre quello caratterizzato dai fabbisogni più alti è quello nuovo vetrato: gli scarti tra queste soluzioni si attestano tra il 40% e il 60%, con valori decrescenti andando verso località più calde. La presenza dell'isolante nelle strutture d'involucro, in particolare, è una caratteristica molto importante, poiché questo contribuisce a contenere all'interno dell'edificio il calore prodotto dalle fonti interne durante le ore di occupazione e quindi a mantenere una temperatura interna mediamente più alta.

Dimensionamento degli impianti

I dimensionamenti del generatore dell'impianto di riscaldamento sono stati effettuati sulla base del picco di domanda rilevato con le simulazioni dinamiche degli edifici, mentre nel caso dell'impianto di raffrescamento il picco di domanda sensibile è stato sommato al picco di domanda latente valutato sulla base dell'entalpia massima dell'aria esterna per le diverse località, come da indicazioni della specifica tecnica UNI TS 11300-3.

Consumo di energia

A partire dai valori di fabbisogno energetico determinati con le simulazioni dinamiche TRNSYS, sono stati elaborati i valori di consumo di energia, per il riscaldamento invernale e per il raffrescamento estivo, secondo l'impiantistica di base descritta in precedenza, avvalendosi dell'approccio standard contemplato dalle specifiche tecniche UNI TS 11300-2 e UNI TS 11300-3. Sulla base della medesima specifica tecnica, sono stati anche valutati i consumi di energia elettrica dovuti agli ausiliari degli impianti di climatizzazione, oltre a quelli dovuti ad illuminazione e alle apparecchiature elettriche.

Al fine di confrontare complessivamente le diverse fonti energetiche, i valori di consumo di energia sono stati trasformati in energia primaria:

- al gas naturale è stato applicato un fattore di conversione pari ad 1;
- l'energia elettrica è stata convertita in tonnellate equivalenti di petrolio tramite il valore di 0,187 x 10^{-3} tep/kWh_{el} (come indicato dalla Delibera EEN 3/08) e successivamente trasformato in kWh di energia primaria tramite il fattore di conversione della UNI TS 11300-2 di 11,86 x 10^{3} kWh_{prim}/Tep (efficienza globale di conversione pari a 0,45).

Valutazioni di dettaglio sono state infine effettuate sulla composizione dei consumi elettrici dovuti agli ausiliari d'impianto, per evidenziare la quota relativa al sistema di generazione frigorifera: i consumi elettrici per la distribuzione (pompe di circolazione) ed emissione (ventilatori dei ventilconvettori) sono simili per entrambe le stagioni, ma quelli associati alla generazione frigorifera (ventilatori del condensatore) costituiscono un ulteriore carico nel solo periodo di raffrescamento.

Risultati relativi ai piani adibiti ad uffici – Sede centrale

La Tabella 62 mostra i consumi energetici annuali disaggregati per le diverse fonti e il consumo totale di energia primaria relativi ai piani adibiti ad uffici per la località di Milano. La composizione dei consumi in termini di energia primaria è visualizzata in Figura 173 .

Tabella 62. Consumi energetici annuali disaggregati per fonte e consumo totale di energia primaria relativi ai piani adibiti ad uffici nella località di Milano

		Riscaldamento (gas) [kWh/m^2]	Raffrescamento (elettricità) [kWh/m^2]	Ausiliari d'Impianto (elettricità) [kWh/m^2]	Illuminazione e Apparecchiature (elettricità) [kWh/m^2]	Totale Energia Primaria [kWh/m^2]
Nord-Sud	Nuovo Convenzionale	33,39	12,28	39,60	54,30	268,87
	Nuovo Vetrato	40,52	19,84	43,12	54,30	300,56
	60/80 Convenzionale	101,07	15,28	40,33	54,30	344,84
	60/80 Vetrato	83,99	30,10	43,35	54,30	367,31
	Tradizionale	98,55	15,39	40,06	54,30	341,95
Est-Ovest	Nuovo Convenzionale	35,61	13,84	40,30	54,30	276,10
	Nuovo Vetrato	44,58	23,22	44,65	54,30	315,54
	60/80 Convenzionale	103,86	17,72	40,91	54,30	354,31
	60/80 Vetrato	89,08	36,40	44,87	54,30	389,73
	Tradizionale	101,45	17,85	40,62	54,30	351,55

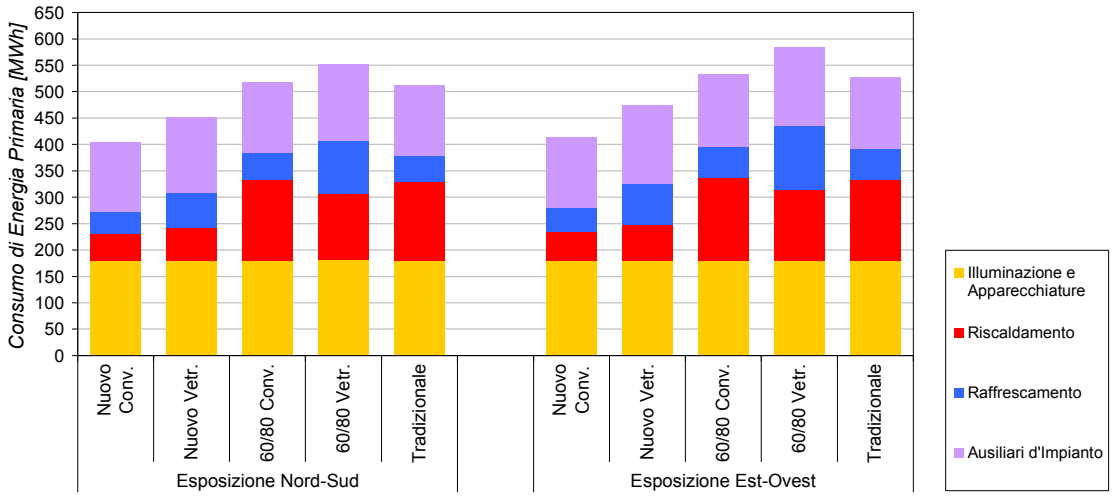


Figura 173. Composizione del consumo di energia primaria per i piani adibiti ad uffici nella città di Milano

Il maggior consumo di energia primaria è associato alla tipologia 60/80 vetrata, che presenta sia una quota consistente di riscaldamento (seconda solo a quelle degli edifici 60/80 convenzionale e tradizionale) sia la massima quota di raffrescamento tra tutte le soluzioni considerate.

Gli edifici "convenzionale degli anni 60/70" e "tradizionale" mostrano risultati del tutto analoghi sia complessivamente sia per composizione dei consumi. Pur essendo caratterizzati da un fabbisogno di raffrescamento inferiore rispetto all'edificio nuovo convenzionale, entrambi rivelano consumi elettrici correlati superiori, a causa delle diverse caratteristiche d'impianto e in particolare al EER nominale del generatore più basso rispetto a quello considerato per gli edifici di nuova costruzione. Questi ultimi, infatti, presentano in ogni caso consumi di energia primaria inferiori a quelli degli edifici più vecchi.

Per quanto riguarda gli ausiliari d'impianto, i risultati mostrano come la componente più consistente sia quella relativa ai ventilatori del sistema di ventilazione/aria primaria, che copre mediamente il 60% dei consumi totali dovuti agli ausiliari. Diversamente, gli ausiliari della caldaia hanno un peso trascurabile sul totale dei consumi per gli ausiliari nonostante Milano sia la località caratterizzata dal maggiore carico di riscaldamento tra quelle considerate.

Analisi parametrica delle prestazioni energetiche di edifici residenziali finalizzata all'implementazione di un sistema di classificazione energetica dei serramenti

Lo studio, limitato al solo parco immobiliare residenziale, si pone l'obiettivo di porre le basi su cui poter determinare i criteri, le valutazioni e l'implementazione della metodologia che definiranno il metodo di classificazione ed etichettatura energetica dei serramenti.

La finestra è uno dei componenti edilizi tramite il quale può essere garantita la riduzione dei consumi energetici dovuti alla climatizzazione dell'involucro su cui è applicata. Per poterla classificare però occorre conoscerne sia le prestazioni intrinseche che il relativo risparmio energetico conseguibile nell'edificio in termini di domanda di

energia, analisi che potrà essere condotta successivamente confrontando le singole risposte ottenute nelle varie fasi di calcolo. A tal proposito le simulazioni che seguiranno saranno orientate a quantificare i fabbisogni energetici di alcuni edifici presi come riferimento, in funzione delle diverse variabili termo-fisiche che caratterizzeranno i serramenti selezionati. Lo studio sarà condotto considerando:

- 10 tipologie di serramenti;
- 3 tipologie di edificio;
- 3 località di riferimento;
- 4 classi di permeabilità all'aria.

L'obiettivo è porre le basi per l'individuazione di una funzione tale da consentire la classificazione energetica di ogni altra tipologia di serramento comunque configurato, purché di esso si conoscano i valori delle variabili indipendenti attraverso le quali sono stati caratterizzati i serramenti studiati.

Serramenti di riferimento

È noto che il fattore solare (g), la trasmittanza termica complessiva (U_w) e la permeabilità all'aria (Q), siano grandezze sufficienti per poter descrivere e caratterizzare il comportamento termico dei componenti trasparenti e opachi che compongono una finestra. L'intenzione quindi è quella di definire alcune tipologie di serramenti, descrivendone tutti i rispettivi componenti (telaio, vetro etc.), anche in riferimento ai prodotti proposti dal mercato, caratterizzandoli attraverso i suddetti parametri.

Lo studio evidentemente deve estendersi ad una vasta gamma di prodotti per tener conto, in particolar modo i componenti trasparenti, di tutte le tecnologie di cui si dispone attualmente, finalizzate al miglioramento della prestazione energetica del serramento, sia in estate che in inverno.

A tal proposito le vetrate isolanti scelte sono state caratterizzate secondo valori di $0,22 \leq \mathbf{g} \leq 0,64$ e $0,55 \leq \mathbf{U_g} \leq 2,84$, conferendo così a questi elementi proprietà tali da poter garantire il raggiungimento di differenti livelli prestazionali.

Per quanto riguarda il telaio sono stati considerati 3 valori di trasmittanza termica $\mathbf{U_f}$, che caratterizzano elementi le cui prestazioni variano da livelli mediocri a livelli ottimali.

Il serramento così potrà essere configurato tramite diverse combinazioni, selezionando di volta in volta profili e vetrate con caratteristiche differenti; in questo modo sarà possibile ottenere comportamenti energetici del serramento del tutto eterogenei tra loro. Nella Tabella 63sono riportate le tipologie dei prodotti individuati, caratterizzati secondo i valori di U_w , g, e Q.

Tabella 63. Serramenti di riferimento

Cod. Rif.	Tipologia V.I.	U_w W/(m^2 K)	U_f W/(m^2 K)	U_g W/(m^2 K)	g %	g_n %	$\tau_{l,n}$ %
S1	4-12-4	3,59	5,5	284	0,6	0,76	0,81
S	4-16-4	2,69	2,2	2,73	0,60	0,76	0,81
S3	Low_e 4-12-4	1,97	2,2	1,68	0,48	0,61	0,79
S4	Low_e - argon - 4-16-4	1,66	2,2	1,21	0,48	0,0	0,79
S5	Solar filter - 4-12-4	1,92	2,2	1,61	0,30	0,36	0,6
S6	Solar filter XT - 4-12-4	1,89	2,2	1,57	0,22	0,26	0,61
S7	Tripla 4-16-4-16-10	1,17	1,1	0,88	0,35	0,44	0,63
S8	Tripla 4-16-4-16-10	0,97	1,1	0,55	0,27	0,34	0,55
S9	Controllo Solare 4-12-4	3,59	5,5	2,84	0,28	0,27	0,19
S10	Isolante 4-16-4-16-4	1,00	1,1	0,60	0,39	0,50	0,73

Nella configurazione geometrica del serramento tipo, è stato considerato un rapporto tra superficie del telaio e superficie del serramento pari al 25%, in linea con quanto indicato nelle norme di riferimento.

Nessuna ulteriore considerazione è stata fatta circa le proprietà termo-fisiche del distanziatore delle vetrate isolanti in quanto, lo stesso, rientra nella determinazione del valore di trasmittanza termica globale U_w. Ai fini del calcolo quindi si è ipotizzato che le vetrate isolanti ne adottassero uno in alluminio, al quale sono state mantenute invariate le prestazioni termiche in tutte le fasi di calcolo.

Negli edifici a torre, dove sono presenti alcune logge, sono stati valutati gli effetti dinamici delle schermature dovuti alle ombre portate dagli elementi aggettanti, sia orizzontali che verticali, sulle finestre; negli altri casi, in mancanza di tali elementi di ostruzione, è stato previsto un coefficiente di riduzione dell'energia solare incidente

pari al 10%, così da tener conto della posizione dell'infisso montato in posizione arretrata rispetto al filo esterno dell'edificio stesso.

In tutte le tipologie edilizie considerate la superficie dei serramenti è stata fissata ad un valore pari ad 1/8 rispetto alla superficie calpestabile, come previsto dalle norme specifiche per il settore residenziale. Nel caso della casa unifamiliare tale rapporto è variato leggermente (1/7) per tener conto della presenza delle portefinestre necessarie a mettere in comunicazione gli ambienti interni con quelli esterni.

Edifici di riferimento

La scelta degli edifici su cui eseguire le simulazioni ha rappresentato un punto fondamentale dello studio. Una determinata tipologia edilizia infatti individua, in generale, uno specifico fattore di forma, rende più o meno determinante l'orientamento dell'edificio e tende a caratterizzare il comportamento termico degli appartamenti che compongono l'involucro, intervenendo in modo rilevante sulla definizione dei consumi energetici.

Risulta quindi evidente che lo studio non possa riferirsi ad una sola di esse, ma debba includerne necessariamente un numero sufficientemente ampio, tale da consentire di individuare come e in che misura vengano influenzati i consumi finali.

Di seguito si riportano le 3 tipologie di edifici che si ritiene siano soddisfacenti, per forma, dimensione e caratteristiche geometriche, a studiare tutte le variabili prima menzionate:

- casa unifamiliare;
- casa in linea;
- casa a torre.

È bene evidenziare inoltre che tali edifici rappresentano una porzione importante del parco nazionale di edilizia residenziale, sia in termini di geometria che di dimensioni e tipologia.

Parametri energetici

I valori di trasmittanza termica dei componenti opachi sono stati individuati secondo quanto previsto dai DD.lgs. 192/05 e 311/06, in funzione delle zone climatiche prese come riferimento. Tali valori sono stati maggiorati del 10% per tener conto della presenza di eventuali ponti termici, e sono riportati nella Tabella 64.

Tabella 64. Valori di trasmittanza termica dei componenti opachi

Valori Trasmittanza W/(m^2 K)	Taranto	Terni	Torino
Copertura	0,42	0,35	0,33
Pareti verticali	0,44	0,39	0,37
Solaio contro terra	0,46	0,39	0,36
Solaio intermedio	0,75	0,75	0,75

I carichi termici interni, dovuti sia alla presenza di persone che all'uso di elettrodomestici, sono stati fissati secondo quanto previsto dalla norma UNI TS 11300-1 [5], nella formula relativa alla valutazione di progetto o standard riportata di seguito:

$$\Phi_{int} = 5.294\, A_f - 0.01557\, A_f^2$$

Le condizioni operative di progetto sono state riassunte nella Tabella 65.

Tabella 65. Condizioni operative di progetto

Parametri	Set-point operativo
Temperatura int. invernale	20 °C
Temperatura int. estiva	26 °C
Periodo di riscaldamento	tutto l'anno
Orario di riscaldamento	24 ore al giorno
Potenza impianto Riscaldamento	Illimitata
Potenza impianto Raffrescamento	Illimitata
Potenza impianto deumidificazione estiva	Illimitata
Infiltrazioni	Funzione della permeabilità dei serramenti
Controllo solare manuale	Non presente
Apporti interni	Secondo norma UNI TS 11300-1

La potenza dell'impianto è stata posta ad un livello illimitato ritenendo tale approssimazione accettabile in quanto lo studio è relativo solamente al calcolo di energia netta.

Il numero di ricambi d'aria orari è stato fissato considerando: i dati climatici del luogo, la tipologia di edificio, la classe di permeabilità all'aria e le superfici dei serramenti installati [6], le indicazioni fornite dal D.lgs. 192/05 e s.m.i. Anche l'orientamento degli edifici, che rappresenta un parametro determinante sui consumi, è stato valutato con attenzione. Alcune tipologie edilizie infatti, come è stato già evidenziato, sono composte da più appartamenti che presentano necessariamente orientamenti diversi, influenzando in modo determinante i fabbisogni energetici dell'involucro. Per questa ragione, in considerazione dei dati climatici delle 3 città prese come rifermento, sono state eseguite diverse simulazioni variando di volta in volta questo parametro, al fine di poter scegliere opportunamente quello più significativo.

In questa fase di screening iniziale sono state esaminate le vetrate isolanti trattate con il solo coating basso emissivo e, in alcuni casi per completezza, a filtro solare. I calcoli relativi alle città esaminate hanno comunque evidenziato tra l'altro che la casa unifamiliare ovviamente, avendo le pareti esposte su ogni lato, non necessita di ulteriori valutazioni.

Città di riferimento

La nostra Penisola è caratterizzata da 6 zone climatiche differenti. Ciò comporta ovviamente che le strategie energetiche necessarie a raggiungere le condizioni di comfort termo-igrometrico negli ambienti confinati non debbano necessariamente sempre coincidere; al contrario invece, potrebbe configurarsi in alcuni casi la necessità di proteggersi in modo prioritario nei periodi caldi, in altri in quelli freddi. Sicuramente comunque, sussistendo nel nostro Paese un clima di tipo mediterraneo, queste due esigenze coesisteranno quasi sempre, raggiungendo alternativamente livelli di importanza differenti. A tal proposito è bene considerare che in quasi tutti gli edifici appartenenti al settore residenziale è presente un impianto di riscaldamento, gli impianti di raffrescamento invece, nonostante siano in rapida crescita, non hanno ancora raggiunto i livelli di diffusione dei primi. Per questo motivo il calcolo terrà conto del fabbisogno energetico sia per il riscaldamento che per il raffrescamento, valutando in quest'ultimo caso anche l'energia spesa per la deumidificazione, essendo questo aspetto legato ovviamente anche alla classe di permeabilità all'aria dei serramenti.

Prima di proseguire con lo studio è opportuno considerare che le prestazioni della finestra non sono indipendenti dai dati climatici esterni, di conseguenza, per ognuna di esse, dovrebbe essere ricercato un numero di etichette energetiche pari a quello delle zone climatiche presenti in Italia. Tale circostanza renderebbe ovviamente la diffusione di questo strumento assai limitata, generando inevitabilmente confusione tra gli utenti finali. Per ovviare a questo problema sono state eseguite numerose simulazioni, considerando i dati climatici di diverse città, con lo scopo di valutare se il comportamento energetico dei serramenti applicati sull'involucro fosse tale da consentire l'accorpamento di più zone climatiche. A tal proposito, nella fase di analisi/valutazione sono stati fissati i seguenti due obiettivi:

- il primo è stato quello di constatare entro quali limiti, definiti dai Gradi Giorno (GG), i fabbisogni energetici dell'involucro, ottenuti in funzione delle diverse tipologie di serramenti montati, restituivano lo stesso trend, verificando in questo modo anche se all'interno di una stessa zona climatica potevano configurarsi, per uno stesso serramento, comportamenti energetici differenti tali da non consentirne la classificazione.
- Il secondo è stato quello di valutare la discrepanza, in termini di valori assoluti, tra i fabbisogni energetici ottenuti nelle diverse zone climatiche, in questo modo si sono potute individuare quelle che potevano essere rappresentate da un'unica etichetta energetica dei serramenti.

Per questi motivi le simulazioni hanno interessato diverse città selezionando dapprima quelle che, pur appartenendo alla stessa zona climatica, presentavano forti differenze dei valori di GG, e successivamente altre le quali, nonostante avessero avuto una differenza di GG minima, appartenevano comunque a zone climatiche differenti. Da questo primo screening iniziale, visti i risultati dei fabbisogni energetici ottenuti, si è potuto procedere all'accorpamento delle zone climatiche secondo lo schema che segue, agevolando così l'utilizzo e la diffusione dell'etichetta energetica dei serramenti:

- 1° gruppo: A, B, C;
- 2° gruppo: D;
- 3° gruppo: E, F.

Definiti questi gruppi, lo step successivo è stato quello di individuare le 3 città di riferimento, ognuna appartenente e rappresentativa di ognuno di essi, per poter iniziare il calcolo definitivo.
Il criterio adottato per la scelta è stato quello di calcolare, per tutte le città appartenenti ad ogni gruppo individuato, la media dei GG pesata sulla popolazione. Le città di riferimento individuate sono state quindi quelle

caratterizzate dal numero di GG più vicini ai valori appena trovati, in questo modo sono stati considerati i climi più rappresentativi ai fini dello studio di analisi comparativa. La scelta è pertanto ricaduta su:

- Taranto, appartenente alla zona climatica C, rappresentativa del primo gruppo;
- Terni, appartenente alla zona climatica D, rappresentativa del secondo gruppo;
- Torino, appartenente alla zona climatica E, rappresentativa del terzo gruppo.

Codice di simulazione

In questo paragrafo è descritto il codice di simulazione scelto, TRNSYS, e le sue caratteristiche di funzionamento. Lo studio condotto infatti necessita della valutazione delle prestazioni sia dei serramenti, in considerazione anche dei dati spettrali che li caratterizzano, che delle componenti opache, in considerazione degli aspetti dinamici che li investono. Lo strumento opera mediante bilancio energetico orario in relazione alla zona termica considerata, utilizzando il metodo z-transform.

Fabbisogni energetici per il riscaldamento (HEATING)

I risultati delle simulazioni sono stati riportati integralmente nei report tecnici specifici. Dalle simulazioni risulta evidente che la prestazione peggiore, in termini del fabbisogno energetico per il riscaldamento, venga restituita sempre dal serramento S9. Gli altri componenti trasparenti studiati sono stati invece suddivisi, per comodità di lettura, in due gruppi principali poiché mostrano, per ognuno di essi, risposte vicine tra loro. I gruppi sono stati così composti:

- il primo a cui appartengono i serramenti: S10, S4, S7, S3 e S8;
- il secondo a cui appartengono i serramenti: S1, S2, S5 e S6.

Nell'individuarli si è tenuto conto dei valori dei fabbisogni energetici dell'involucro, ottenuti attraverso l'applicazione dei diversi serramenti, e si è proceduto ad accorpare quelli che presentavano tra loro una discrepanza inferiore al 6% rispetto al valor medio. I componenti appartenenti al primo gruppo garantiscono in assoluto i fabbisogni energetici più bassi, quelli appartenenti al secondo raggiungono fabbisogni energetici superiori rispetto al primo, mediamente in misura pari al 26%.

Come era prevedibile le risposte migliori, nel periodo invernale, sono state raggiunte da quelle tipologie di serramenti caratterizzate dalla combinazione dei valori di trasmittanza (U_w) più bassi e del fattore solare (g) più alti. Tale aspetto si è inoltre evidenziato dal comportamento energetico restituito dei serramenti S5 e S6. Gli stessi infatti, trattati con coating a filtro solare, pur avendo valori di trasmittanza confrontabili con i serramenti appartenenti al primo gruppo, vengono penalizzati dai valori piuttosto contenuti del fattore solare poiché, riducendo l'apporto solare gratuito, riducono di conseguenza la propria prestazione complessiva, incidendo negativamente sul fabbisogno energetico invernale dell'involucro. La domanda di energia media infatti aumenta in questi casi di circa il 25% rispetto al valor medio raggiunto con l'ipotetico impiego dei serramenti appartenenti al primo gruppo. Un'idea più chiara che ci consente di quantificare come tali parametri influenzino i fabbisogni energetici dell'involucro edilizio si può avere confrontando il risparmio conseguito, tramite l'applicazione delle diverse tipologie di serramenti studiati, normalizzato rispetto a S9; in alcuni casi, quando le combinazioni di U_w e g risultano ottimali, viene superata la soglia del 70%.

Un altro aspetto che emerge è il peso differente che hanno il fattore solare (g) e la trasmittanza energetica (U_w), sulle prestazioni energetiche dell'intero involucro. In particolare l'analisi dei risparmi ottenuti tramite i serramenti S1 e S5 porta a conclusioni interessanti, utili per quantificare l'influenza di questi due parametri sulla domanda di energia netta; il primo serramento (S1) infatti, presenta lo stesso valore di U_w e un valore circa doppio di g rispetto a S9, il secondo invece (S5) presenta lo stesso valore di g e un valore dimezzato di U_w rispetto a S9. Dal confronto dei dati risulta che la trasmittanza termica sia il parametro che influisca maggiormente sulla prestazione complessiva dell'involucro, almeno in riferimento al periodo invernale, eccetto in rari casi; in generale infatti, tale condizione tende ad invertirsi negli edifici isolati ubicati nelle zone climatiche più calde.

I livelli prestazionali raggiunti dai serramenti studiati devono comunque necessariamente essere ricondotti anche alle classi di permeabilità all'aria considerate. Le simulazioni mostrano i fabbisogni energetici raggiunti nelle 3 città, relativamente ad ogni tipologia di serramento, in funzione delle 4 classi di permeabilità all'aria esaminate: risulta che le curve relative alle classi Q(3) e Q(2) restituiscono valori molto vicini tra loro, al contrario, quelle relative alle classi Q(1) e Q(0), pur restituendo valori molto prossimi, si discostano notevolmente rispetto alle prime due. Una stima più precisa per quantificare in che misura questo parametro influenzi le prestazioni dei serramenti può essere condotta analizzando i dati da cui si stimano i risparmi conseguibili normalizzati rispetto ai serramenti di classe Q(0); in alcuni casi si raggiungono valori vicini all'80%.

Fabbisogni energetici totali (HEATING+ COOLING)

Lo studio si è esteso necessariamente anche all'analisi dei fabbisogni energetici annui (Heating + Cooling). In questo caso i dati dimostrano che la prestazione peggiore sull'involucro venga restituita dai serramenti S1, S2 e S9. Volendo individuare anche qui dei gruppi significativi, si potrebbe avanzare la seguente ipotesi:

- il primo a cui appartengono i serramenti: S3, S4, S5, S6, S7, S8, S10 (Q1);
- il secondo a cui appartengono i serramenti: S1, S2, S9 (Q2).

Nell'individuarli si è tenuto conto dei valori dei fabbisogni energetici totali dell'involucro, ottenuti attraverso l'applicazione dei diversi serramenti, e si è proceduto ad accorpare quelli che presentavano una discrepanza inferiore al 6% rispetto al valor medio.

I serramenti che appartengono al primo gruppo garantiscono in assoluto i fabbisogni energetici totali più bassi, quelli appartenenti al secondo gruppo invece raggiungono fabbisogni energetici superiori mediamente del 21,8 % rispetto al primo. Diversamente da quanto ipotizzabile i serramenti S5 e S6, trattati con coating a filtro solare, hanno restituito una risposta energetica discreta, ma non ottimale. Infatti si sono registrati valori generalmente più bassi rispetto a quelli ottenuti dagli altri componenti appartenenti al primo gruppo. Anche in questo caso, i livelli prestazionali raggiunti dai vari serramenti devono necessariamente essere ricondotti alle classi di permeabilità all'aria considerate. Dai dati è emerso che la discrepanza maggiore si registra nel passare dalla classe Q(2) alla classe Q(1).

Le analisi condotte hanno evidenziato che la permeabilità all'aria influisce in modo determinante sulla domanda di energia netta. Lo studio ha dimostrato che le diverse configurazioni dei serramenti studiati, anche se basate su valori dei parametri g, Q e U_w molto diversi, portino comunque a risultati assoluti molto vicini tra loro in termini di fabbisogno di energia netta; più precisamente è emerso che ognuno dei gruppi selezionati restituisce valori della domanda di energia che differiscono in misura inferiore al 6%.

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

Nel settore del civile, residenziale e non, la domanda di energia è in crescita, soprattutto per quanto investe il settore elettrico. Molto sentita è l'esigenza poter disporre di studi e ricerche per migliorare l'efficienza energetica del sistema edificio- impianto, utilizzando sistemi di Domotica e/o di Smart Building e sistemi integrati da fonte rinnovabile. Negli ultimi anni diverse attività si sono focalizzate sullo studio e sviluppo di questi sistemi, ma con approcci poco integrati nel sistema edificio impianto. La ricerca ha evidenziato la fattibilità dell'utilizzo di questi sistemi negli edifici e la convenienza tecnico-economica che tali applicazioni possono dare, evidenziando i casi e le tipologie di impianto più o meno convenienti in relazione alla destinazione d'uso e alla tipologia di sistema applicato.

Le attività prevedono lo sviluppo, applicazione e la valutazione di tecnologie, sistemi, componenti e dispositivi per il controllo, la gestione e la regolazione intelligente degli impianti (Smart Building) per minimizzare i consumi energetici negli edifici integrando a sistema gli impianti di illuminazione, di climatizzazione invernale e estiva integrati anche con nuovi sistemi a pompe di calore ad assorbimento, di climatizzazione assistiti da calore solare, sistemi innovativi di illuminazione efficiente, applicazioni di tecnologie informatiche per la razionalizzazione dei consumi energetici ed il controllo ambientale che potranno trovare applicazione in un complesso urbano significativo. Un risultato che si prevede di conseguire è quello della definizione di un kit domotico "fai da te", indirizzato all'utente, facilmente utilizzabile dall'utente con un minimo di una assistenza tecnica.

Sulla base delle attività realizzate nel corso dei primi due anni del programma, si è sviluppata una ricerca di approfondimento nel settore Ospedaliero, mirato a strutturare meglio le attività di diagnosi e benchmarking delle strutture del settore, che sono le più energivore del terziario.

La norma EN 16001 sui sistemi di gestione dell'energia, in accordo con l'art. 8 della direttiva 2006/32/CE apre nuove scenari per la diffusione di buone pratiche per l'efficienza energetica, e grazie alla previsione obbligatoria della diagnosi energetica iniziale e del monitoraggio continuo delle prestazioni energetiche, risulta uno strumento utile per la verifica effettiva delle performance degli interventi, per la verifica sul campo di eventuali certificazioni energetiche e per la realizzazione di indicatori energetici.

Questa attività rappresenta il primo step per sviluppare l'implementazione della norma presso le strutture ospedaliere, provvedendo a supportare l'azienda nella messa a punto del sistema di gestione dell'energia e nell'ottenimento della certificazione. L'attività ha portato come risultato la redazione di linee guida da diffondere presso le strutture ospedaliere per farne conoscere i benefici e facilitarne l'adozione a livello nazionale.

Sistemi di telegestione e telecontrollo nel settore ospedaliero

La gestione dell'energia negli ospedali è spesso poco considerata, sia perché lontana dal *core business*, sia per la bassa incidenza che ha sulle spese totali. Oltre ai costi, ai consumi e alle relative emissioni, in alcuni ambienti ospedalieri, come le sale operatorie, vi è la necessità di garantire, senza interruzioni non programmate, ben precise condizioni termo igrometriche, di filtrazione, di ricambi d'aria, etc.

La complessità impiantistica dei sistemi di condizionamento e trattamento aria, aumentata dalla ridondanza necessaria a garantire la continuità di servizio, si uniscono a molti altri impianti altrettanto indispensabili come quello idrico, dei gas medicali, antincendio, etc. Il controllo e la gestione sempre più efficiente, raffinata e spesso coordinata di tutti questi impianti richiede la presenza di un numero elevato di sensori e di sistemi di regolazione che sarebbe impossibile poter gestire singolarmente.

La presenza di sistemi di telegestione (TG) e telecontrollo (TC) in ambito ospedaliero si rivela oggi ancor più indispensabile per le necessità di controllo continuo e puntuale dei parametri prestazionali che, oltre alla primaria funzione del benessere dei malati e degli operatori, regolano anche la remunerazione e le penali dei contratti di servizi (di riscaldamento, condizionamento, etc.) sempre più basati sui risultati conseguiti. Lo studio analizza anche come queste esigenze siano tra di loro ottemperabili e come le diverse priorità caratterizzino come "ottusi" alcuni vincoli normativi, ad esempio le temperature di benessere legate al clima, spesso diverse dalle temperature termostatate previste e vincolate nei contratti. Lo studio si divide in quattro parti:

- nella prima si analizza il potenziale di efficienza energetica degli ospedali, delle possibili azioni tecniche/tecnologiche, informative e gestionali in connubio e/o supportate da sistemi di TG e TC, la definizione e caratterizzazione di questi sistemi e del loro ruolo rispetto a diverse categorie di utilizzatori.
- La seconda parte affronta una disamina delle tecnologie e dei protocolli utilizzati per la connessione/trasmissione dati. Trend e sviluppi futuri sono discussi in tre interviste con i principali fornitori di questi impianti.
- La terza parte presenta i risultati di due sondaggi, relativi ai sistemi di TG e TC in ambito sanitario, effettuati tra gli energy manager (EM) e le società di servizi energetici (SSE).
- La quarta parte, infine, è dedicata all'impianto di TG e TC dell'ospedale Sant'Andrea di Roma, all'analisi dei dati di consumo e ambientali registrati dall'impianto e a una campagna informativa e di sensibilizzazione rivolta agli utenti e al personale.

L'energia nelle strutture ospedaliere

L'obiettivo delle strutture sanitarie di assicurare le prestazioni mediche agli utenti, offrire un alto livello di comfort e garantire la salubrità degli ambienti, viene perseguito a fronte di un costo energetico ed economico che ha ampi spazi per essere rimodulato. Tuttavia, va osservato che sebbene i consumi in valore assoluto siano rilevanti, il costo dell'energia incide per pochi punti percentuali sul bilancio totale delle strutture stesse, e questo può costituire un freno all'efficienza energetica nel momento in cui viene decisa l'allocazione delle risorse.

Le forme di energia direttamente impiegate nel comparto ospedaliero sono principalmente energia termica ed energia elettrica. L'energia elettrica viene utilizzata per l'illuminazione, il condizionamento, il trattamento dell'aria, le apparecchiature medicali, i sistemi informatici, i servizi (cucina, lavanderia, etc.). Sui motori elettrici utilizzati per queste funzioni sarebbe sicuramente possibile effettuare interessanti azioni di miglioramento, con l'inserimento di variatori di velocità o la sostituzione con motori ad alta efficienza.

L'energia termica è utilizzata principalmente per le esigenze di climatizzazione degli ambienti anche in estate, per la produzione di acqua calda sanitaria e per ulteriori servizi quali la sterilizzazione, la mensa e la lavanderia. Dati di letteratura mostrano che sono possibili riduzioni intorno al 20% dei consumi con interventi sul condizionamento e il miglioramento dell'efficienza delle lampade e delle reti di distribuzione, fino ad arrivare intorno a valori del 50% impiegando le migliori tecnologie disponibili.

Ai fini di un uso corretto dell'energia, a fianco di azioni tradizionali tipiche del settore efficienza energetica (e.g. coibentazione, interventi sull'involucro, cogenerazione), un altro tassello fondamentale è rappresentato da un adeguato controllo sia delle trasformazioni delle fonti primarie nei vettori energetici (metano ed elettricità) nei vettori finali (calore, frigorie, movimentazione, etc.), sia dalla gestione dei consumi nelle varie utenze attraverso monitoraggio e controllo da un punto di vista qualitativo e quantitativo, con l'installazione di adeguata strumentazione. I sistemi di TG e TC sono di forte interesse per gli operatori e vengono sempre più spesso inseriti nell'elenco delle buone pratiche.

Telegestione e telecontrollo

I sistemi di TG e TC sono nati per il comando e la lettura a distanza di misuratori di energia elettrica, termica e gas naturale sulle linee di trasmissione e distribuzione, funzioni in seguito estese a vari parametri di processo e di

utilizzo degli impianti all'interno delle strutture. Essi permettono di avere una visione a distanza di quello che sta succedendo sul territorio o all'interno di una struttura, di registrarne il funzionamento con continuità e modificarne i parametri funzionali. Un sistema di TG e TC all'interno di una struttura sanitaria può essere utilizzato con obiettivi diversi in base alle esigenze dell'utente che ne usufruisce; le figure per le quali può risultare di interesse per gli aspetti energetici (per altro di minore priorità rispetto al controllo dello stato delle apparecchiature sanitarie) sono: la Regione per il controllo del rispetto delle condizioni contrattuali, l'Energy Manager come supporto all'efficientamento energetico ed economico, l'Ufficio tecnico per garantire la continuità di esercizio e la tempestività degli interventi e la Società di Servizi Energetici per esigenze contrattuali di controllo dei parametri prestazionali dei servizi erogati. Similmente questi soggetti saranno interessati a report che contengano informazioni e indicatori diversi e con differenti periodicità.

I risparmi energetici ottenibili con sistemi di TG e TC sono stimabili, a seconda del livello di automazione presente, attraverso le indicazioni della norma UNI EN 15232 "Prestazione energetica degli edifici – Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici" che fornisce coefficienti per valutazioni semplificate ad hoc per gli ospedali.

I sistemi di TG e TC possono anche rivelarsi un valido supporto nell'implementazione e nel mantenimento di un sistema di gestione dell'energia conforme alle norme EN 16001 e ISO 50001. In particolare si sono individuate le seguenti fasi:

- pianificazione iniziale degli interventi, in cui si richiede una analisi dei consumi storici su cui poi basare le operazioni di miglioramento;
- realizzazione e gestione degli interventi pianificati: in molti casi la gestione ottimizzata dei processi richiede sistemi di TG e TC; lettura e registrazione continua aiutano a prevenire scostamenti e individuarne le eventuali cause e le conseguenti azioni preventive o correttive;
- misurazione e controllo dei risultati: è necessario controllare e registrare i risultati che derivano dagli interventi effettuati per valutarne l'efficacia.

In generale tutte le volte che nelle norme compaiano richieste di registrazione o di documentazione, queste possono essere informatizzate con pacchetti che siano compresi o che dialoghino con quelli che controllano i sistemi di TG e TC.

Tecnologie e modelli disponibili di telecontrollo e telegestione

I sistemi di TG e TC presenti sul mercato sono caratterizzati da un'elevata flessibilità e adattabilità sia in fase di prima installazione che di integrazione con altri impianti già installati e di estensione delle funzionalità in un secondo momento. Non esiste un sistema standard, ma a seconda delle caratteristiche dell'edificio (struttura, pianta, etc.), degli impianti e strumenti già installati e delle necessità degli utenti ne viene confezionato uno su misura, mettendo insieme singole componenti oggi piuttosto standardizzate. Le differenze principali che caratterizzano questi apparati sono: modalità e protocolli di trasmissione dati (via cavo o wireless), sistema di acquisizione e report e interfaccia utente.

Trend e sviluppi futuri discussi insieme ai principali fornitori di soluzioni

Al fine di meglio comprendere gli andamenti tecnologici e di mercato attuali e futuri, sono state contattate tre aziende che ricoprono un ruolo di primaria importanza nel settore: ABB, Schneider Electric e Siemens. Con i tre interlocutori vi sono stati ripetuti contatti telefonici, via e-mail e incontri frontali.

Il mercato nel settore ospedaliero risulta in crescita data anche la sempre maggiore sensibilità a consumi e costi energetici. Sia Siemens che ABB per stimolare l'installazione di sistemi di TG e TC offrono una particolare formula contrattuale da stipulare con il cliente, nella quale si garantisce un certo miglioramento minimo delle prestazioni energetiche dopo l'installazione del sistema. A seguito di un audit energetico, si stima innanzitutto la riduzione del consumo energetico e il relativo risparmio economico. Una volta installato il sistema, se gli obiettivi prefissati non vengono raggiunti l'azienda garantisce comunque la differenza (contratto a garanzia di prestazioni). Secondo le aziende intervistate, un forte impulso al mercato potrebbe venire da una maggior attenzione e/o prescrizioni minime sulle classi della norma UNI EN 15232 per gli edifici nuovi o ristrutturati.

Indagine sull'uso e caratteristiche dei sistemi di TG e TC negli ospedali italiani

Le principali caratteristiche tecnico funzionali, il loro utilizzo, le criticità e i desiderata delle due principali categorie di utenti (EM - Energy Manager e SSE - Società di Servizio Energia) dei sistemi di TG e TC in ambito sanitario sono stati indagati attraverso due distinti questionari. Di seguito sono sintetizzate le risposte del questionario distribuito agli EM, mentre per quello rivolto alle SSE si evidenziano solo gli aspetti più significativi, dato il basso numero di risposte pervenute.

Il sistema di TG e TC è sempre presente nella struttura principale e in molti casi copre tutti gli edifici (72%), è molto spesso installato successivamente alla costruzione dell'edificio (65%), e generalmente da più di 5 anni (76%) ed è sempre di proprietà della struttura.

I risultati indicano che l'EM nella maggior parte dei casi (88%) non gestisce direttamente il sistema, anche se spesso (65%) ha collaborato alla definizione delle specifiche di impianto; la gestione è affidata ai servizi tecnici di manutenzione ed alle SSE.

Tra le apparecchiature installate si hanno nel 86% dei casi contatori di energia termica ed elettrica, anche se generalmente limitati alle sale di trasformazione dell'energia primaria e non nella distribuzione alle varie utenze, fatto che indica una particolare attenzione ai consumi energetici globali. Gli impianti di climatizzazione e ventilazione risultano sempre telecontrollati (100%); per la ventilazione anche la regolazione dei ricambi di aria negli ambienti avviene sempre in maniera automatica, mentre la regolazione comfort è gestita automaticamente nella maggior parte dei casi (95% circa).

Sul lato delle scelte tecnologiche, la trasmissione dati avviene su sistemi cablati ethernet e bus, che insieme coprono l'81% del totale, mentre la presenza di apparati wireless è bassa (15%) e costituita principalmente da collegamenti attraverso la rete cellulare (GSM/UMTS). Un sistema di reportistica standard è presente nel 65% delle strutture sanitarie. I report, nella maggior parte dei casi sono dei fogli di calcolo, ma non sono sempre presentati ad intervalli regolari: a volte lo si richiede solo in caso di necessità. Gli indicatori di prestazione e di consumi non sono ancora molto presenti, mentre vengono frequentemente riportate le segnalazioni di malfunzionamenti degli impianti e del sistema di supervisione. I report vengono utilizzati in più della metà dei casi per controllare le prestazioni fornite dalle SSE. Quasi tutti gli EM ritengono che il sistema sia utile e fondamentale ai fini dell'efficienza energetica della struttura, ma alcuni sottolineano che per una gestione ottimale rimane necessario l'intervento umano da parte di personale specializzato.

Le criticità descritte riguardano soprattutto le problematiche di integrazione e convivenza di piattaforme diverse, la complessità di utilizzo e la necessità di personale specializzato. In base all'esperienza con i sistemi attuali gli EM estenderebbero il sistema in special modo per la contabilità elettrica di sottozone o reparti.

Caso studio dell'Azienda ospedaliera Sant'Andrea di Roma

Il sistema di TG e TC dell'ospedale S. Andrea di Roma era inserito già nella progettazione iniziale, ma, dato il tempo intercorso tra l'inizio della costruzione nel 1974 e l'entrata in esercizio nel 2001, è stato necessario da subito un aggiornamento. Il ripristino delle funzionalità e il passaggio alla nuova concezione ha richiesto circa un anno, e, da alcune stime effettuate da Siemens, con la sola fase di ripristino e ottimizzazione del funzionamento degli impianti si è avuto un incremento di efficienza di circa il 30%.

L'attenzione del presente studio si è concentrata sulle condizioni di comfort degli ambienti del Pronto Soccorso (PS), in base agli accordi presi con la struttura ospedaliera.

La climatizzazione del PS è garantita da due unità di trattamento aria (UTA) - servite sia dagli assorbitori che dal gruppo frigo elettrico a compressione - che forniscono aria primaria per la climatizzazione e ventilazione e ricambi di aria necessari e da un impianto di climatizzazione a fancoil. Il funzionamento delle UTA è a "punto fisso", al massimo della portata e temperatura di immissione fissa.

In ogni zona è presente un'unità ambientale (termostato) che permette una regolazione indipendente locale della temperatura rispetto a quella di set-point impostata dal sistema di supervisione: la variazione consentita all'utente interno alla sala è di +/- 3 °C.

Sono stati registrati gli andamenti della temperatura interna della sala di aspetto e quella della sala gessi. Le due sale hanno caratteristiche di occupazione diverse, che si ripercuotono sull'andamento della temperatura. In entrambi i casi il profilo rimane prevalentemente al di sotto della linea di set-point prevista dal telecontrollo (24 °C). Nel caso della sala di aspetto (Figura 174), caratterizzata da un'elevata occupazione, il profilo di temperatura durante le ore di massima temperatura esterna supera quella di ventiquattro gradi, rimanendo comunque al di sotto della temperatura massima consentita di 26 °C (sono in un paio di giorni si supera tale soglia). Si garantiscono così le condizioni contrattuali di comfort, anche con elevata occupazione e livelli di temperatura esterna sopra la media (punte di 37 °C).

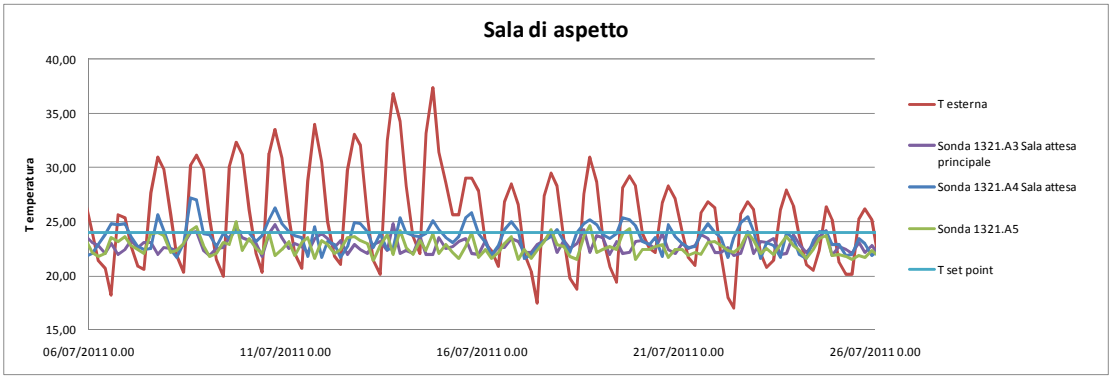


Figura 174. Andamento delle temperature interne nella sala d'aspetto del reparto di Pronto Soccorso

Analisi tecnico - economica del sistema installato

L'analisi economica di un sistema di TG e TC installato in un ambito ospedaliero è alquanto difficile da estrapolare sulla base di uno schema tipico di validità generale, data la grande quantità di variabili da considerare quali la struttura dell'edificio, l'architettura degli impianti di distribuzione di energia termica ed elettrica, il numero di punti di misura, il software di gestione, etc..

La TG e TC nel Sant'Andrea è caratterizzata dal controllo del sistema di climatizzazione e circa 3800 punti di acquisizione. Il costo attuale del sistema installato è stimato intorno a 600000 euro. A questo andrebbe aggiunto un costo di circa 200000 euro di progettazione, installazione e programmazione.

Ipotizzando che l'impianto di TG e TC garantisca i risultati previsti dalla norma (minori consumi del 10% in base ai fattori della EN 15232) questa spesa sulla base dei consumi attuali e dei costi dell'impianto avrebbe un tempo di ritorno dell'investimento di circa sei anni, inferiore alla vita utile che è di almeno dieci.

Nell'ipotesi invece di partire dalla situazione attuale, procedendo al solo aggiornamento del sistema con nuove strumentazioni per l'ottimizzazione della gestione dell'energia (misuratori di energia termica, frigorifera ed elettrica e inverter su motori di pompe e ventilatori), con un costo stimato intorno a duecentocinquantamila euro e un risparmio stimato con la EN 15232 del 4% il tempo di ritorno dell'investimento sarebbe di circa quattro anni.

Valutazione delle esperienze acquisite

La ricerca eseguita sui sistemi di telecontrollo dell'ospedale Sant'Andrea, seppur nei limiti strettissimi di tempo di validità del contratto assegnato alla FIRE, ha permesso di acquisire una serie di risultati e di valutazioni sul funzionamento effettivo dei sistemi di telecontrollo e sulle potenzialità degli stessi, limitatamente al solo comportamento nel periodo estivo. Direzione dell'ospedale e direzione dell'appaltatore hanno approvato la proposta di ricerca e solo grazie alla loro fattiva partecipazione è stato possibile raggiungere gli obiettivi di conoscenza qui presentati.

L'intervento, per i limiti di cui sopra, ha riguardato specificamente i locali del Pronto Soccorso ed ha colto l'impianto di TC e TG nel suo stato operativo, legato alla gestione contrattuale tra la direzione ospedaliera e la società di servizi. Allo stato attuale il TC e la TG dell'ospedale Sant'Andrea risponde fondamentalmente a tre diversi obiettivi:

- mantenere le condizioni di benessere;
- rispettare le condizioni contrattuali fra l'appaltatore e la direzione dell'ospedale riguardanti le prestazioni climatiche a regime;
- rispettare le condizioni contrattuali riguardando la gestione degli allarmi e delle non conformità.

L'analisi dei diagrammi di temperatura interna mostrano che questa rimane al di sotto dei 24 °C, salvo brevissimi periodi corrispondenti al picco di temperatura esterna delle ore quattordici. Una sola sonda ha misurato il superamento del limite di temperatura di 26 °C massimo contrattuale. L'appaltatore ha impostato il set-point a 24 °C e ha regolato, sulla base delle esperienze acquisite, l'azionamento dei ventilatori al massimo.

La coesistenza del controllo centralizzato e del termostato locale appare non solo come un passo intermedio rispetto all'obiettivo di una supervisione globalizzata, ma sembra avere almeno due motivi: da una parte permette al singolo operatore sanitario di adattare l'impianto alle proprie esigenze e alle apparecchiature presenti e funzionanti nella stanza, e dall'altra di rendere meno rigidi i rapporti tra l'appaltatore ed un personale come quello ospedaliero, diversificato, qualificato e con responsabilità di cura dei cittadini. Personale con il quale è interesse non aprire un contenzioso, sia per l'appaltante (la Regione in fase di gara e la direzione ospedaliera a livello di

gestione) che per l'appaltatore, che vuole avere un'immagine positiva della sua fornitura di servizi energetici agli enti pubblici. Un altro aspetto di cui c'è da tener conto nel passaggio dalla progettazione nelle condizioni nominali al vissuto quotidiano tra appaltante e appaltatore, è legato alle forti oscillazioni tipiche del clima italiano, in parte già di per sé evidenti nell'accettazione di due/tre gradi di oscillazione della temperatura interna, specie nelle sale con un'occupazione molto variabile e continue aperture di porte, in connessione con le condizioni di temperatura esterna.

Passando agli aspetti impiantistici, il progettista ha effettuato una serie di scelte nella garanzia della costanza della fornitura anche in presenza di guasti di una singola apparecchiatura. Questa scelta si manifesta nella coesistenza di due diverse fonti di produzione di freddo: un gruppo a compressione meccanica e una coppia di assorbitori alimentati dalle caldaie a gas naturale. Di regola, lavorano il compressore elettrico e un assorbitore, con il secondo assorbitore che ha la funzione di riserva e interviene solo nelle condizioni di carico estremo. La ridondanza così realizzata a livello di produzione di frigorie è stata prevista sia nella fase di trattamento dell'aria con la presenza di due UTA dedicate al solo pronto soccorso, che nella fase di distribuzione alle sale più importanti nelle quali coesistono i fancoil alimentati dalla centrale frigorifera e il sistema a tutta aria che assicura anche il controllo dell'umidità e i ricambi d'aria richiesti.

Nell'insieme l'impianto risulta affidabile sia per la diversificazione delle fonti utilizzate (energia elettrica e gas naturale) sia per la ridondanza dei fluidi distribuiti (acqua refrigerata ed aria trattata), naturalmente a spese di una maggiore complessità in tutti i vari stadi. Questa complessità impiantistica mal si sposa con il tradizionale approccio dell'efficienza energetica, per il quale si preferirebbe realizzare un collegamento diretto tra disponibilità e utilizzatore, con un sistema di distribuzione ad albero nel quale la misura degli usi finali è immediata e diretta.

Sintetizzando si può dire che le funzioni della TG e del TC nell'ospedale sono: di far arrivare stanza per stanza l'energia richiesta, di adempiere alle varie normative e alle diverse richieste (seppur contrastanti) e di garantire le continuità del servizio, intervenendo rapidamente sui guasti, il tutto contenendo la spesa e senza che ciò venga percepito come negativo dai pazienti e dal personale dell'ospedale. L'attenzione all'efficienza energetica da una parte si concentra sulla fase iniziale di produzione di calore e di frigorie e dall'altra nell'evitare le dispersioni più evidenti, ma al momento non interferisce con gli utilizzatori finali.

Ad esempio, le sale di attesa si trovano al mattino a 22 °C, ovvero due gradi in meno del valore contrattuale (quindi con un consumo indebito che si potrebbe provare ad eliminare), mentre a metà giornata, quando è forte la presenza di persone che apportano energia termica, raggiungono la temperatura di 26 °C; si potrebbe dire che le frigorie accumulate al mattino sono servite a non oltrepassare la temperatura massima prevista nel primo pomeriggio. In altri termini, se i termostati fossero effettivamente sempre regolati sui 24 °C contrattuali, nel pomeriggio sarebbe necessario un impianto dimensionato per le temperature di picco e non per quelle nominali; si potrebbe dunque risparmiare energia a spese di un maggiore investimento, utilizzato però per poche ore e giorni all'anno.

Sulla base di questa esperienza risalta che l'introduzione della funzione efficienza e risparmio in un impianto telecontrollato non può limitarsi al solo sistema di gestione, ma richiede una differente organizzazione impiantistica e di dimensionamento degli apparati, differenza che è relazionata al tipo di funzione svolta dall'edificio. Può essere interessante evidenziare che le temperature garantite per contratto nel periodo estivo possono rivelarsi ben inferiori a quelle di comfort e salutari raccomandate per gli impianti di condizionamento, che non dovrebbero essere inferiori ai 6 °C rispetto alla temperatura dell'aria esterna. Si tratta di un aspetto che andrebbe affrontato a livello normativo con maggiore attenzione.

Il primo passo per declinare maggiormente il sistema di TG e TC all'efficienza energetica è individuare i centri di costo almeno per macroaree e determinare come misurarne in prima battuta i vettori finali utilizzati (pur nella complessità dell'impianto della doppia alimentazione in centrale termica e delle doppie tipologie di modalità di cessione nell'utenza) e come riportare queste informazioni a chi utilizza le varie apparecchiature e regola i termostati. In passato si è sempre pensato alla regolazione telecontrollata come a un fatto che avrebbe invaso tutte le funzioni, eliminando l'intervento dei singoli utilizzatori; questa visione orwelliana non sembra oggi più proponibile e si vorrebbe poter contare sulla cooperazione e partecipazione attiva degli utenti sensibilizzati e corresponsabilizzati, con il sistema di TC e TG centrale che potrebbe svolgere funzioni di servizio agli utenti, memorizzando i dati e fornendo elaborazioni con continuità a tutte le persone coinvolte perché possano ricostruire i fenomeni legati alla loro attività, suggerendo le soluzioni ottimali, prevedendo gli effetti delle variazioni climatiche attraverso previsioni, etc. TC e TG rimangono così padroni degli impianti, ma diventano al contempo suggeritori degli utilizzatori. È un cammino favorito dall'elettronica decentralizzata, dalle interfacce utente molto personalizzabili e dalla crescita professionale degli operatori, grazie alla possibilità di produrre a basso costo benchmark, indicatori, etc. con i quali confrontarsi.

Valutazione della campagna di sensibilizzazione

Il materiale è stato preparato utilizzando una prima bozza e poi sviluppato dall'Unità di Servizi di Prevenzione Protezione ed Energy management della struttura sanitaria e processato dalla direzione ospedaliera, che ne ha verificato la compatibilità con la propria politica di comunicazione. Successivamente all'esposizione sarebbe stato necessario verificare le reazioni del personale e delle persone presenti al materiale, raccogliere le loro opinioni sulla leggibilità e sulla condivisione della presentazione e delle proposte, riesporre il materiale caduto o coperto da altri avvisi e passare poi a verificare la disponibilità a modificare il proprio comportamento, modifiche il cui effetto potrebbe essere verificato solo nella prossima estate e quindi richiederebbe un'azione di mantenimento della campagna. Le criticità di questa azione, con speciale riferimento al pronto soccorso nel quale si sono approfondite le analisi, sono legate da una parte al tipo di attività e dall'altra dalla difficoltà di monitorare i risultati. Questi possono essere effettuati o globalmente sull'analisi dei consumi, rilevando le modifiche di comportamento del personale sanitario e dei pazienti e loro accompagnatori. È stato detto che il comportamento ha degli effetti marcati sul consumo della climatizzazione e per poter monitorare gli effetti è necessario che i consumi per la climatizzazione siano misurabili in modo separato dai consumi globali, che siano anche suddivisi area per area per vedere l'effetto dei vari interventi ed infine che siano ben determinate le variazioni del clima esterno e le variazioni dei consumi.

Come esposto sopra non esistono strumenti di misura dei consumi per reparto, per cui si potrebbe tentare in linea di principio di leggere le eventuali variazioni dei consumi globali dell'ospedale. Le analisi conclusive esposte nel paragrafo precedente hanno indicato che i consumi per la climatizzazione, se pur rilevanti in assoluto, sono una frazione minoritaria dei consumi globali. Essi sono influenzati da numerosissimi parametri, per cui non appare lecito tentare di dedurne gli eventuali effetti della campagna di sensibilizzazione. Il monitoraggio dovrebbe invece riguardare gli atteggiamenti del personale a seguito di una campagna sufficientemente prolungata e basarsi su osservazioni dirette ed interviste, non compatibili con le tempistiche a disposizione per questo studio.

Le attività svolte hanno permesso per la prima volta di confrontare dei dati sperimentali con delle ipotesi di tipo progettuale, contrattuale e di tipo gestionale impostati in maniera del tutto indipendente tra loro. Al momento prevalgono gli aspetti di tipo sanitario e manutentivo rispetto a quelli dell'efficienza negli usi finali, per altro affidati al personale ospedaliero e mediati dal personale delle società di servizio.

Da questa esperienza sono emerse alcune indicazioni sulla necessità di coordinamento e integrazione tra le esigenze della proprietà degli ospedali, del personale che ci lavora e delle società di gestione. In particolare il telecontrollo così come esso si trova oggi può esplicare tutte le sue potenzialità all'interno delle sale ove le fonti vengono trasformate nei vettori, mentre il controllo e la gestione delle utenze è un tema per cui la coesistenza di diversi interessi rende complessa, ma indubbiamente interessante, la ricerca delle possibili soluzioni condivise.

Studio e progetto di un sistema di domotica per un kit "fai da te"

Le attività di ricerca legate allo studio dell'utilizzazione della domotica nel risparmio energetico, con riferimento ad un impianto "fai da te" per l'utente comune, hanno seguito i seguenti passaggi:

- indagine di mercato atta a valutare i componenti in produzione disponibili a banco, considerando tutti i principali produttori presenti;
- indagine sui prezzi di componenti, apparecchi e sistemi di cablaggio per la valutazione dei costi;
- analisi delle strategie di ottimizzazione degli impianti al fine di ottenere il massimo risparmio energetico;
- valutazione delle possibilità di comunicazione, controllo e di tele gestione nella ottimizzazione del sistema energivoro;
- dimensionamento di un sistema tipo con diversi livelli di complessità, qualità e costo;
- valutazione dell'analisi economica dell'investimento di ottimizzazione;
- discussione dei risultati tecnici ed economici ottenuti.

Nell'ambito dell'attività in oggetto viene posta particolare attenzione allo studio della compatibilità tra la facilità di gestione (legata anche all'economicità del sistema) e la possibilità di garantire il maggiore risparmio energetico. Viene seguita una linea guida volta allo sfruttamento dei sistemi di automazione affinché si renda possibile utilizzare energia esclusivamente quando è necessario, nella quantità necessaria e nel modo più efficiente possibile.

Nella progettazione tradizionale i vari servizi sono assicurati da impianti diversi ed indipendenti tra loro, che non colloquiano e non interagiscono fra loro. Ciò porta a costose duplicazioni, a difficoltà nel coordinare il funzionamento dei singoli impianti, a costi d'esercizio nascosti, ma soprattutto ad una minor efficacia nel garantire ciò che si richiede agli impianti: sicurezza, comfort e risparmio.

In base all'indagine di mercato tecnico-economica che è stata effettuata, in funzione di quelle che sono le problematiche di progettazione, installazione e manutenzione, si possono preliminarmente definire i vantaggi e gli svantaggi delle diverse tipologie di impianto.

Per quanto riguarda i vantaggi, si può dire che il sistema domotico è caratterizzato da grande flessibilità, per cui è possibile modificare facilmente la configurazione del sistema sia in corso d'opera sia a installazione finita, e dalla multifunzionalità: ogni dispositivo può svolgere più funzioni contemporaneamente, con un risparmio sul numero di apparecchi necessari, nella implementazione del sistema, nella facilità del cabling del sistema e relativa riduzione dei costi e nella riduzione dei costi di esercizio.

Gli svantaggi de sistema di automazione si possono identificare nel maggior costo dei dispositivi e della scarsa conoscenza della tecnologia da parte dei progettisti e degli installatori.

Fra i maggiori consumatori di energia, dopo il settore dei trasporti e dell'industria, il settore residenziale ed il terziario, tra riscaldamento, condizionamento ed illuminazione sono responsabili di circa il 40% di tutta l'energia consumata nei paesi industrializzati, una percentuale che consente un ampio margine di ottimizzazione dell'efficienza. Pertanto il controllo intelligente degli edifici può contribuire in misura significativa all'efficienza energetica. I potenziali di ottimizzazione, per quanto riguarda la riduzione del consumo energetico grazie all'impiego di moderni sistemi di installazione elettrica, sono riportati, nel rapporto, come valore e come dedotti dalla letteratura tecnica. In generale, grazie all'applicazione di diverse soluzioni e all'ottimizzazione della tecnologia di controllo si può ottenere un risparmio energetico medio tra l'11 ed il 31%.

Interventi di efficienza energetica e domotica

Strategie di intervento

Vengono analizzati i possibili interventi di efficientamento energetico che posso avvalersi di un sistema di home-automation per la massimizzazione del rendimento.

Gli interventi di efficienza energetica si possono considerare come una vera e propria fonte energetica. Se accoppiati con una buona gestione dell'impianto ed un efficace sistema di controllo possono essere gestiti correttamente. Tuttavia essi presentano un limite massimo di sfruttamento e oneri economici tanto più elevati quanto più tale limite è prossimo.

Per il diminuire il rapporto costi/benefici è opportuno considerare diversi possibili livelli di intervento. Nel presente lavoro si è cercato di valutare quali fossero le azioni minime per ottenere, con costi e complicazioni impiantistiche ridotte, i massimi risultati in termini di energia. I diversi livelli di intervento presi in considerazione si basano sulla seguente distinzione di massima:

- risparmio energetico ottenibile con intervento ad investimento prossimo a zero;
- risparmio energetico ottenibile con intervento ad investimento ammortizzabile entro tre anni;
- risparmio energetico ottenibile con intervento ad investimento ammortizzabile in più di tre anni.

Principalmente, gli interventi di risparmio energetico valutati si dividono in due categorie principali, termica ed elettrica. Tali categorie vengono analizzate in paragrafi dedicati e forniscono un quadro esaustivo delle problematiche e dei vantaggi. Una particolare attenzione è stata rivolta, tra tutti gli interventi di risparmio energetico possibili, a quelli a costo zero che, ovviamente, sono spesso possibili se gestiti da un sistema automatico di controllo. Gli interventi a costo zero termici sono principalmente:

- ottimizzazione della gestione d'impianto termico: gestione degli orari di lavoro del sistema di riscaldamento;
- aerazione dei locali con controllo dei ricambi orari.

Gli Interventi a costo zero elettrici sono in linea di massima:

- ottimizzazione della gestione delle utenze elettriche anche in funzione delle tariffe biorarie:
- illuminazione,
- forza motrice (PC, impianti vari);
- educazione degli utenti mediante forzatura automatica nella gestione di sistemi;
- gestione controllata nel tempo, nelle temperature e nell'utilizzo di sistemi di condizionamento elettrici.

Iinterventi di efficienza energetica negli impianti elettrici

Per classificare gli interventi di efficienza energetica negli impianti elettrici si segue la consueta suddivisione tra utenze relative all'illuminazione e altri apparecchi utilizzatori (forza motrice).

La gestione dell'illuminazione

L'attività di utilizzo razionale dell'energia nell'illuminazione consiste nel cercare di ottenere la qualità e quantità voluta di luce spendendo la minima quantità possibile di energia. L'aumento di efficienza può essere ottenuto:

- utilizzando "hardware" più efficiente (lampade, corpi illuminanti, dimmer) per produrre la luce, ma anche per controllare e comandare l'erogazione del flusso luminoso;
- migliorando l'uso di questo "hardware", per esempio distribuendo il flusso luminoso solo dove è necessario per la visione, integrando l'illuminazione elettrica con quella naturale ed ottimizzando gli orari di accensione;
- con i controlli della luce solare, la visione e l'abbattimento del carico termico estivo.

Il controllo della luce solare viene effettuato attraverso sensori fotoelettrici, opportunamente posizionati, che misurano la quantità di luce solare presente (o la quantità totale solare più artificiale) e regolano di conseguenza la quantità di luce artificiale necessaria per poter raggiungere il livello di illuminamento medio desiderato nell'ambiente. Il controllo della luce solare può essere effettuato anche per attenuarla, utilizzando degli "schermi solari" (quali tapparelle, veneziane, frangisole) mobili che permettano di ridurre, o aumentare la radiazione solare incidente, a seconda delle necessità, e delle condizioni interne all'ambiente considerato. I sistemi mobili di controllo della luce solare possono essere azionati manualmente oppure con dispositivi automatici che ne modulano il movimento in funzione della radiazione incidente. I sistemi di controllo della luce solare contribuiscono anche a ridurre i picchi di carico termico estivo e a migliorare il microclima interno.

Interventi di efficienza energetica negli impianti termici e sull'involucro

I principali interventi di ottimizzazione termica ed edile legati al sistema di controllo sono:

- miglioramento della trasmittanza delle superfici vetrate e regolazione automatica dell'apertura;
- vetri speciali (trattati) ed ombreggiamento automatico delle superfici;
- controllo in genere di tutti gli interventi di architettura bioclimatica;
- sostituzione macchine da climatizzazione con macchine ad alto rendimento o con parte elettrica controllata da inverter elettronico;
- sostituzione delle caldaie a gas con condizionatori a pompa di calore, controllati da inverter e regolati a zone;
- sostituzione di scaldacqua elettrici con quelli istantanei a gas;
- termoregolazione e contabilizzazione del calore;
- utilizzo di calore di recupero;
- produzione/integrazione controllata di energia da fonti rinnovabili locali;
- telecontrollo e tele gestione;
- misura, memorizzazione ed analisi continua dei consumi per la valutazione del contratto ottimale di fornitura dell'energia.

Superfici vetrate

Un'attenta scelta dei componenti vetrati, una accurata progettazione e strategia nel sistema di motorizzazione e controllo, oltre a consentire un'integrazione ambientale più corretta, può comportare una diminuzione dei consumi di combustibile convenzionale, contribuendo alla riduzione dell'emissione di sostanze inquinanti in atmosfera.

Schermi solari

Una funzione essenziale per il controllo della radiazione solare diretta e diffusa (per ridurre il carico termico estivo) è svolta dagli schermi di copertura, in altre parole da elementi, orizzontali o inclinati e di forma variabile, che ostruiscono gran parte della porzione di cielo vista dallo spazio interno da rinfrescare.

Mediamente gli apporti termici possono essere ridotti del 40-70% mediante il controllo della radiazione diffusa tramite schermi orizzontali e verticali; detti carichi possono altresì essere ridotti del 25-50% mediante il controllo della radiazione riflessa tramite schermi verticali e trattamenti delle superfici circostanti. Ovviamente i sistemi motorizzati posso seguire meglio le stagioni ed il movimento del sole permettendo la massima resa del sistema di gestione della radiazione solare.

Ventilazione forzata degli edifici

L'aerazione negli edifici rappresenta un aspetto importante sia per il risparmio energetico sia per il comfort interno degli ambienti abitati. Infatti il risparmio energetico può essere conseguito limitando le dispersioni attraverso le superfici perimetrali dell'edificio per trasmissione e ventilazione. Tenuto presente che le nuove normative per il contenimento energetico hanno imposto limiti sempre più restrittivi, ne consegue che gli edifici vengono ben isolati termicamente e la ventilazione ora incide maggiormente in termini percentuali nella

dispersione globale dell'involucro. Una corretta e controllata ventilazione è importante, oltre che per l'aspetto energetico, ancor di più per la qualità dell'aria**.**

Incidenza della ventilazione sul riscaldamento

La tipologia costruttiva che caratterizzava gli edifici realizzati fino a 10 anni fa circa, cioè poco isolati termicamente rispetto agli standard attuali, evidenziava consumi di energia primaria dovuti in modo rilevante al riscaldamento per sopperire alle dispersioni termiche, mentre la ventilazione incideva marginalmente. Oggi invece le dispersioni per trasmissione vengono abbassate sempre più e la ventilazione comincia ad assumere un peso rilevante se confrontata con le altre fonti di consumo.

Nell'istogramma seguente vengono riportate le medie dei consumi energetici annui riferiti ad un alloggio tipo espressi in kWh in funzione della tipologia di ventilazione adottata (fonte: ricerche Aldes France**).**

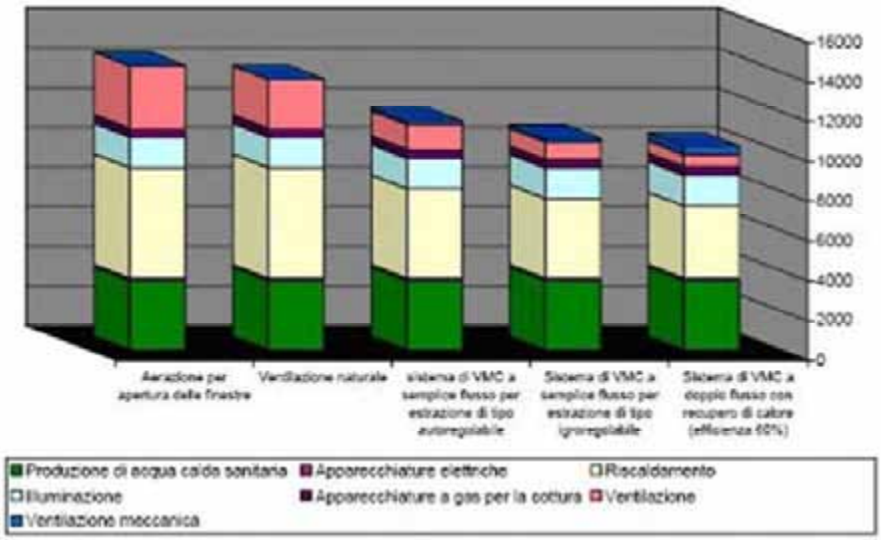


Figura 175. Consumi energetici in kWh in funzione della tipologia di ventilazione utilizzata

Per il massimo rendimento sarebbe opportuno provvedere all'installazione di sistemi di VMC autoregolabili dotati di un scambiatore di calore che permetta di recuperare il calore dell'aria in uscita con quella dell'aria in entrata. La manutenzione degli impianti di VMC è minima e non richiede interventi particolari; in genere si effettua ogni 3/5 anni con la semplice sostituzione dei filtri. Nei casi dei filtri per polline e/o ai carboni attivi la manutenzione è annuale.

Climatizzazione invernale ed estiva

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento degli edifici sono molteplici, generalmente con regolazione generale e non a zone come vorrebbe una logica ottimizzazione. E' necessario però fare della valutazioni per scegliere gli impianti più razionali e sani, che prevedano il minor consumo energetico e quindi il minor impatto ambientale.

Ad oggi il sistema di riscaldamento più diffuso sono i radiatori tradizionali: questi richiedono acqua ad alta temperatura per il loro funzionamento, con un conseguente spreco di energia Questo tipo di impianti consentono uno scambio di calore tra una superficie e l'altra senza che l'aria si surriscaldi e senza far circolare polveri, né creare sgradevoli moti d'aria. Un'altra valida alternativa è rappresentata dai sistemi di riscaldamento a pannelli radianti, a pavimento o a parete. Il vantaggio insito in questa soluzione è che viene garantito un buon comfort termico interno a bassi consumi d'energia. Inoltre i pannelli radianti scambiano calore con l'ambiente per irraggiamento, caratteristica che evita la produzione di movimenti d'aria e quindi la circolazione di polveri e garantisce un riscaldamento uniforme dell'ambiente.

Questa soluzione di riscaldamento consente di eliminare i tradizionali termosifoni e i relativi svantaggi: gli sprechi d'energia (l'acqua degli impianti tradizionali si trova, a 70-80 °C, mentre nei pannelli radianti scorre a 35-40 °C), i movimenti d'aria e di polveri, l'aria eccessivamente secca, le asimmetrie di temperatura. Possono, data la bassa temperatura di esercizio, essere integrati con sistemi solari termici. Per coordinare il sistema solare termico con una caldaia a condensazione o elettrica, necessaria a sopperire alle carenze naturali, è necessario un sistema di gestione automatica; tale tecnologia sposa bene un impianto domotico.

Caldaia a condensazione

La caldaia a condensazione, a differenza della caldaia tradizionale, può recuperare una gran parte del calore contenuto nei fumi espulsi attraverso il camino. La particolare tecnologia della condensazione consente infatti di

raffreddare i fumi al di sotto del punto di rugiada, con un recupero di calore utilizzato per preriscaldare l'acqua di ritorno dall'impianto. In questo modo la temperatura dei fumi di uscita (fino a 40 °C) mantiene sempre lo stesso valore della temperatura di mandata dell'acqua, ben inferiore quindi ai 140-160 °C dei generatori ad alto rendimento ed ai 200-250 °C dei generatori di tipo tradizionale. Con le caldaie a condensazione si raggiungono risparmi nell'ordine del 30-50%, o anche maggiori se riferiti a caldaie delle generazioni precedenti.

Sistemi solari termici

I sistemi solari termici si basano sulla capacità di convertire l'energia solare in energia termica mediante lo sfruttamento dell'effetto serra, per produrre acqua calda solitamente ad uso sanitario. La funzione di accumulo e trasporto è costituita da un fluido termovettore che circola tra i pannelli e il serbatoio d'accumulo dell'acqua calda. Questi sistemi sono corredati di centralina di controllo e dispositivi di integrazione termica interfacciata con la centralina di domotica o direttamente controllata da essa.

Le stufe a pellet o a mais

Apparentemente simile alle stufe tradizionali, tra i sistemi di riscaldamento troviamo le stufe a pellet/mais. Si tratta di stufe ecologiche ad alto rendimento, poco inquinanti, che sono diventate molto affidabili con l'utilizzo dell'elettronica. Hanno il grande vantaggio, rispetto alle tradizionali stufe a legna, di poter dosare il combustibile a piacimento e quindi consentono un preciso controllo della temperatura. L'accensione può essere automatica e possono essere regolate in temperatura tramite normali termostati o cronotermostati; infine necessitano di poca manutenzione e sono molto pratiche. Sistemi che, grazie alla gestione domotica, possono essere sfruttati, ottimizzati e programmati in qualsiasi condizione di utilizzo.

Le pompe di calore

La pompa di calore è costituita da un circuito chiuso, percorso da un fluido che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato liquido o di vapore.

La sua efficienza è rappresentata dal coefficiente di prestazione COP. l vantaggio più evidente è che si tratta di un sistema intrinsecamente efficiente, grazie al rapporto elevato tra energia fornita ed energia elettrica assorbita, o COP, che si situa generalmente tra 3 e 4 a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento. Ciò ha dirette ripercussioni anche sull'ammortamento del costo di installazione e sulla bolletta del consumatore; i dati mostrano infatti un costo specifico medio per unità di calore prodotto pari alla metà di quello di un impianto tradizionale con caldaia a gasolio e 2/3 di quello di un impianto tradizionale con caldaia a metano. Il sistema a pompa di calore è già dotato di sistemi ci controllo e parzializzazione/regolazione locale della climatizzazione. Inoltre tali sistemi sono generalmente progettati per interfacciarsi con le più comuni centraline di domotica.

Termoregolazione

Consiste nella regolazione della temperatura all'interno dei singoli ambienti, la strategia di controllo dovrebbe essere programmata sulla base di misure effettuate da sensori e in riferimento ad una precisa organizzazione programmata nella centralina. La regolazione dovrebbe anche variare in funzione del numero di persone presenti, come di altri dati.

Soluzioni di automazione per l'efficientamento energetico degli impianti e dell'involucro

I sistemi di automazione permettono il controllo di tutti gli impianti tecnici presenti in casa. I sistemi di automazione, permettono anche il controllo di sistemi relativi a servizi che esulano dal settore energia. Servizi altrettanto importanti ed utili, ma che non pesano nella valutazione di investimento di risparmio energetico quali quelli sulla sicurezza. In questa sede non vengono approfonditi tali sistemi se non direttamente coinvolti negli interventi di efficientamento energetico proposti.

Termoregolazione a zone

L'impianto "Termoregolazione" effettua il controllo differenziato per zone del riscaldamento e del condizionamento. Il sistema è costituito da una centrale di supervisione disponibile per il controllo di più zone e più sonde per il rilievo della temperatura negli ambienti dell'abitazione. Tale soluzione permette di scegliere la temperatura di ogni singola stanza a seconda della sua funzione e del momento della giornata in cui la si utilizza. È possibile inoltre selezionare gli ambienti che non essendo utilizzati non si vuole riscaldare. L'attivazione dell'impianto può tener inoltre in considerazione il calore prodotto dal sole e dell'eventuale apertura di finestre. Grazie alla funzione di termoregolazione a zone l'edificio guadagna una classe energetica, e gli utenti risparmiano sulla bolletta. Si può raggiungere un risparmio del 30%.

Gestione e automazione luci

Il controllo dell'impianto di illuminazione può essere utilizzato per attivare o disattivare le luci quando è necessario, evitando sprechi di energia. Ovviamente tutte le scelte progettuali, tecniche e di regolazione devono fare i conti con i minimi di qualità, comfort ed illuminamento imposti anzitutto dalla norma UNI12464. Per questo scopo sono molto diffusi i sistemi che permettono la regolazione dell'accensione, dello spegnimento e dell'intensità delle luci (dimmer). Le possibili applicazioni di un impianto di controllo e regolazione dell'illuminazione sono:

- accensione/spegnimento;
- dimmerizzazione;
- controllo costante della luminosità;
- gestione automatica;
- scenari luminosi.

Il carico è gestito in modo automatico o manuale in accensione, spegnimento e regolazione al livello di illuminamento desiderato. La dimmerazione è uno degli obiettivi principali del controllo intelligente, perché dimmerare influisce sul risparmio energetico, e prolunga la vita media di una lampada quasi pari al raddoppio,sfruttando livelli di accensione inferiori al 100% e utilizzando in modo più omogeneo tutte le sorgenti luminose. E'inoltre possibile in alcuni sistemi monitorare le ore di vita delle lampade, programmando gli interventi di manutenzione ordinaria.

Controllo serrande, avvolgibili, finestre e veneziane

Serrande avvolgibili controllate da sensori, finestre e veneziane con controllo lamelle dipendente dalla posizione del sole garantiscono condizioni di illuminazione ottimali e contribuiscono a migliorare la climatizzazione degli ambienti. La componentistica minima indispensabile per la realizzazione della motorizzazione è una attuatore per serrande, considerata già installata la motorizzazione del sistema. Come appena accennato, il sistema permette di movimentare le serrande o i brisoleil in funzione di:

- orari;
- stagioni;
- livello di insolazione interno ed esterno, tramite informazioni da fotosensori;
- temperatura interna ed esterna (tenendo conto anche di eventuali riverberi e radiazioni diffuse).

Misura e memorizzazione dei consumi

E' possibile visualizzare non solo i consumi della propria abitazione (elettricità, acqua e gas), ma anche la produzione di energia e di acqua calda ottenute con eventuali impianti a pannelli fotovoltaici o con il solare termico. Si può scegliere il tipo di consumo da verificare, il tipo di visualizzazione (istantanea o tramite grafici) e il periodo (giorno, mese, anno). Informazioni estremamente utili per utilizzare al meglio i propri impianti e ridurre sprechi e malfunzionamenti. Il sistema di supervisione è necessario per l'analisi dei contratti di fornitura e per effettuare il controllo continuo della congruità dell'ottimizzazione fatta. Essa può portare fino ad un risparmio del 15%.

Gestione e controllo dei carichi

Tale soluzione permette di gestire la massima potenza impiegata e di scollegare automaticamente, in caso di sovraccarico, gli elettrodomestici meno importanti; è più un sistema di qualità che di riduzione del consumo. L'utente può verificare il consumo totale delle singole linee controllate e decidere di modificare la priorità tra le stesse. L'utente può però risparmiare temporizzando l'attivazione dei carichi energivori in funzione delle migliori fasce orarie di acquisto dell'energia.

Il sistema di Gestione controllo carichi gestisce la massima potenza impiegata scollegando automaticamente, in caso di sovraccarico, gli elettrodomestici meno importanti. Per tale motivo permette di avere contratti con potenza massima impegnata minore e quindi costi ridotti. Esso consente di fissare un tetto massimo ai consumi energetici della casa. E' possibile fissare il limite in kWh/giorno e decidere, per esempio, di non consumare oltre una certa quantità di energia. Ovviamente, ogni qual volta i consumi elettrici si avvicinano al limite fissato (si ipotizzi che forno, lavatrice, riscaldamento elettrico siano accesi contemporaneamente), la gestione carichi inizierà a disalimentare ciò che è classificato meno importante, ad esempio alcune luci esterne. Configurando gli attuatori/presa del sistema controllo carichi è possibile impostare attraverso i touch screen delle temporizzazioni per attivare i carichi ad orari prestabiliti.

Attuatore base e con sensore per carichi

Mediante gli attuatori base che alimentano i carichi, è possibile effettuare la gestione dei carichi stessi. Infatti, comandando l'apertura o chiusura del contatto di fase (appositamente programmato a seconda delle esigenze), si riesce ad alimentare o disalimentare il carico in esame.

Nel caso si voglia avere un controllo superiore, è necessario misurare e ripetere a remoto le grandezze elettrotecniche, è quindi necessario installare il più costoso attuatore con sensore. In questa maniera diventa possibile avere il servizio di diagnostica dei sistemi collegati ed avere una maggiore sicurezza elettrica; tali attuatori possono effettuare anche verifiche differenziali evitando pericolosi guasti a terra.

Consumi e diagnostica

Visualizzazione dei consumi

La visualizzazione dei consumi permette di visualizzare sulla centralina generale e sui pannelli di stanza touch-screen non solo i consumi elettrici, ma anche di acqua e gas nonché i dati derivanti dal sistema di contabilizzazione centralizzato del calore.

Le interfacce di centralina domotica o di pannello di stanza già permettono la lettura di tali grandezze. È inoltre possibile visualizzare i dati di produzione di energia (impianti fotovoltaici e solari termici). La visualizzazione dei consumi fornisce all'utente i dati istantanei e cumulati sui touch screen (pannellino di controllo). È inoltre possibile, impostando un valore di tariffa indicativo, avere una valutazione quantitativa della spesa economica.

Un impianto di domotica volto al risparmio energetico deve essere continuamente supervisionato, questo per garantire l'adeguatezza della programmazione e delle scelte (anche contrattuali) effettuate. Nel tempo cambiano le condizioni al contorno, rendendo spesso la strategia di ottimizzazione non conveniente. Tale sistema è infatti sconsigliato a chi non ha capacità tecniche di gestione o a chi non sceglie un adeguato contratto di manutenzione.

Per completare il sistema di misura è necessario aggiungere altri componenti quali il misuratore di energia elettrica, l'interfaccia conta impulsi ed il contabilizzatore di calore. Il contabilizzatore generale e/o i singoli contabilizzatori, ovunque essi siano installati, possono comunicare i dati misurati mediante il BUS dati alle altre centrali del sistema.

In conclusione, a conti fatti, l'impianto di domotica è da preferirsi in fase di ristrutturazione integrale o di prima installazione. Se un impianto di automazione viene realizzato solamente come interfaccia per i punti di comando e per gli utilizzatori, i costi sono dell'ordine del 30% maggiori rispetto ad un impianto tradizionale. Man mano che si sfruttano le funzionalità di un impianto di automazione, i costi di investimento diminuiscono fino a raggiungere una valorizzazione ipotizzabile intorno al 25%. In definitiva i vantaggi sono molteplici nella realizzazione di un impianto Home Automation, dal maggior confort ottenibile ai risparmi energetici raggiungibili. Per quest'ultimo punto, il sistema di automazione non realizza nessuna innovazione particolare, ma può semplicemente correggere gli errati usi dell'energia, sia termica sia elettrica, da parte dell'utente.

Si ritiene opportuno proporre l'incentivazione dell'installazione di tali sistemi in fase di costruzione; questo anche per far sì che, per le future generazioni, la corretta gestione dei sistemi e dell'energia a disposizione divenga un fattore culturale.

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

L'efficienza energetica in edifici di pregio architettonico è un tema che risulta essere ancora poco indagato. Anche se il quadro normativo sull'efficienza energetica non prevede per questi edifici particolari prescrizioni, il tema è molto sentito dagli operatori del settore. Questo specifico settore, dal punto di vista prestazionale energetico, necessita di indagini e studi che possano caratterizzare il parco degli edifici e definirne il potenziale di risparmio.

Sono state analizzate le principali criticità che un edificio di pregio pone in questo contesto. Per rendere trasmissibili e immediatamente fruibili le ricerche condotte ed i risultati ottenuti si è messo a punto un tracciato schedografico che contenesse e rendesse raffrontabili i dati. Le schede costruiscono il corpus principale del lavoro e sono concepite sia per raccogliere dati scientificamente accertati sia per rendere le informazioni fruibili al più vasto numero possibile di utenti finali.

Riuso, conservazione e valorizzazione del patrimonio storico devono progressivamente essere integrati con l'esigenza di una sempre più efficiente gestione energetica, che deve essere sviluppata secondo approcci e metodi ovviamente compatibili con le stesse esigenze di conservazione e tutela. In relazione a questo si è tenuto in conto il Codice dei Beni Culturali, in particolare all'articolo 114 definisce il concetto di qualità della valorizzazione.

In tal senso sono state definite delle linee guida che si prefiggono l'obiettivo di fornire suggerimenti e indicazioni per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici e per una efficiente gestione del sistema edificio-impianti propedeutiche alla redazione di un piano di intervento finalizzato alla riduzione dei consumi.

La ricerca ha prodotto delle schede tecniche per l'individuazione e la valutazione di interventi che garantiscano, al contempo, il miglioramento energetico e la salvaguardia dei caratteri morfologici, materici e architettonici degli edifici storici.

La ricerca assume quale scenario di verifica sperimentale il complesso della Villa Reale e del Parco di Monza, in ragione della sua eccezionale rilevanza e della grande complessità, che ne fanno un territorio ideale di sperimentazione, ma in una logica di ulteriore esportabilità operativa. Il rapporto si sviluppa su 3 linee che riguardano il supporto:

- alla caratterizzazione microclimatica interna degli spazi confinati, in relazione alle dinamiche di degrado delle apparecchiature costruttive e degli eventuali beni mobili contenuti.
- alla individuazione di soluzioni tecnologiche e costruttive per l'integrazione in edifici di pregio storico – architettonico di sistemi e soluzioni orientate all'efficienza energetica e allo sfruttamento di fonti rinnovabili.
- alla definizione di un sistema di indicatori in grado di valutare lo stato dell'edificio secondo entrambe le dimensioni del problema: efficienza energetica e qualità dell'ambiente interno.

In questo modo sarà possibile condurre un'analisi dello stato dell'edificio per la definizione dei requisiti da inserire all'interno dei capitolati di gara d'appalto riguardanti lavori di ristrutturazione e/o miglioramento di un edificio di pregio.
È chiaro inoltre che la presente schematizzazione risulta funzionale a rispondere in maniera adeguata e complessiva agli obiettivi proposti dalla ricerca. Dal punto di vista metodologico dunque le presenti linee di ricerca sono risultate funzionali alla definizione di azioni consequenziali e specifiche delle diverse competenze coinvolte, nella convinzione che solo un approccio ed una lettura realmente integrata di tutte le competenze multidisciplinari coinvolte possa rispondere in maniera esaustiva agli obiettivi previsti.

Il caso di studio

Il Parco di Villa Reale di Monza è apparso idoneo per l'analisi e l'applicazione di interventi dimostrativi che potessero rappresentare dei casi-studio interessanti dal punto di vista dell'efficienza energetica, e che fossero replicabili in contesti analoghi.

L'obiettivo di questo studio è individuare alcuni edifici del parco e proporre degli impianti dimostrativi alimentati da fonti rinnovabili per costituire un percorso didattico-divulgativo sull'uso efficiente dell'energia.

Vista la finalità prevalentemente dimostrativa, gli impianti proposti non sono stati finalizzati alla totale copertura del fabbisogno energetico per la climatizzazione degli edifici in esame, ma piuttosto ad evidenziare la possibilità di integrazione e di utilizzo di fonti energetiche rinnovabili in edifici a carattere storico, mediante applicativi tecnologici accessibili al pubblico e di rilevante valenza divulgativa.

L'analisi di prefattibilità che è stata condotta, ha avuto, in primis, l'obiettivo, di verificare che esistessero condizioni idonee per l'applicazione dei possibili interventi proposti, nel rispetto dei vincoli normativi vigenti (Legge 42/2004 norme a tutela di edifici a carattere storico e di pregio).

Successivamente, sulla base dei dati disponibili, sono state delineate per i diversi interventi, le tipologie e le caratteristiche essenziali degli impianti. Ciò ha condotto, in via preliminare, a valutare la producibilità energetica e i costi di realizzazione di alcuni impianti dimostrativi, applicati ad altrettanti edifici presenti nel parco.

L'eventuale fase di progettazione di tali impianti, dovrà tuttavia necessariamente essere supportata dalla verifica dei principali parametri di progetto, che andranno controllati e aggiornati mediante prove sperimentali da effettuare in loco.

Lo studio del contesto di sperimentazione risulta di primaria importanza ai fini di una comprensione della specificità del caso ma soprattutto, in relazione all'obiettivo della presente ricerca, risulta essenziale per una valutazione prestazionale del sistema edificio e per la definizione dei requisiti di efficienza energetica.
I temi sviluppati nell'ambito dello studio riguardano la definizione degli interventi più idonei per il miglioramento energetico, anche attraverso l'impiego di fonti rinnovabili, degli edifici di pregio. Lo studio ha riguardato:

A. individuazione di un sistema GIS che, tra l'altro, qualifichi le caratteristiche prestazionali delle tecnologie avanzate per l'efficienza energetica utilizzate nel Parco di Villa Reale a Monza;
B. la creazione di uno sito per il progetto, al cui interno è disponibile un'area privata per contenere i documenti;

C. l'individuazione/la creazione di uno strumento che consenta la creazione di ambienti virtuali il più possibile fedele alla realtà, da foto panoramiche degli ambienti. Un processo di "stitching" consentirà la creazione di un'unica immagine finale.

Il Complesso del Parco della Villa Reale

Il Parco si estende su una superficie di circa 700 ettari di terreno e comprende edifici di diversa tipologia e destinazione d'uso:

- 3 ville storiche (Villa Reale, Villa Mirabello e Villa Mirabellino);
- 13 cascine;
- 3 mulini.

Oltre le Ville storiche, costruite nella seconda metà del settecento e di evidente valore monumentale, anche le Cascine e i Mulini, di epoca ottocentesca, presentano caratteri di pregio e costituiscono un rilevante patrimonio storico e architettonico. Per tali motivi la quasi totalità degli edifici presenti nell'area del Parco è soggetta vincoli di tutela in linea con quanto previsto dal Codice dei beni Culturali e Paesaggistici. Oltre questi edifici, sono presenti nel Parco anche diversi impianti sportivi, tra i quali notevole rilevanza assumono l'Autodromo e il Golf Club di Milano. Molto estese risultano inoltre, le aree verdi tra cui si rilevano:

- Superficie dei giardini della Villa Reale 35 ha;
- Superficie a prato 137 ha;
- Superficie a bosco 295 ha (110000 alberi ad alto fusto).

Il Parco è inoltre attraversato dal fiume Lambro, ed esiste un antico sistema di rogge per la derivazione delle acque a scopo irriguo o produttivo. L'area dispone quindi, oltre ai numerosi beni di valore storico e monumentale, di rilevanti quantità di risorse ambientali potenzialmente sfruttabili per usi energetici.

Scopo dell'analisi effettuata è stato di arrivare a formulare delle proposte di impianti dimostrativi, tecnicamente coniugabili con i vincoli normativi di tutela paesaggistica del territorio. Gli impianti individuati dovranno costituire un percorso didattico sull'efficienza energetica, accessibile ai visitatori.

L'analisi e la scelta degli interventi dimostrativi

Considerando le diverse fonti rinnovabili potenzialmente disponibili nel parco, nella prima fase di studio, sono stati presi in esame tutti i diversi edifici presenti, per individuare gli impianti da fonti rinnovabili più adatti alle specifiche caratteristiche dell'immobile e del contesto circostante. Inoltre, come detto in precedenza, si è tenuto conto dei vincoli normativi di tutela degli edifici a carattere storico, che limitano le possibilità di intervento diretto sugli involucri edilizi, sulla maggior parte delle strutture presenti.

Non essendoci la possibilità, per motivi di tempo, di effettuare monitoraggi o campagne di misura sperimentali, la quasi totalità dei dati, riguardanti le caratteristiche degli edifici e delle diverse aree del parco, sono stati ricavati da due recenti pubblicazioni messe a disposizione dalla Direzione del Consorzio Parco di Monza:

- Piano di intervento energetico per il complesso di Villa Reale di Monza: Studio di prefattibilità. Fondazione Energy Lab e Regione Lombardia-
- Valutazione del Potenziale Energetico da Fonti d'energia Rinnovabile. Fondazione Lombardia per l'Ambente.

Nei suddetti documenti viene fornito un quadro generale delle risorse e delle potenzialità energetiche del Complesso del Parco della Villa Reale di Monza. Le informazioni riportate nei due Report sono state un utile la base di partenza per selezionare alcuni interventi dimostrativi e valutarne l'applicabilità in funzione delle tipologie di edifici esistenti.

In quest'ottica, lo studio effettuato ha avuto la finalità di prendere in considerazione soltanto quelle tipologie di impianti da fonti rinnovabili che apparissero applicabili al contesto del Parco, e risultassero "ragionevoli" dal punto di vista tecnico ed economico.

Soluzioni impiantistiche innovative prese in esame inizialmente, come ad esempio la realizzazione di impianti di Cogenerazione o di Solar cooling, sono apparse sostanzialmente applicabili solo agli edifici caratterizzati da notevole richiesta energetica sia per la climatizzazione invernale che per quella estiva, quali ad esempio le Ville storiche. Questi edifici tuttavia, e in particolare la Villa Reale, sono caratterizzati da strutture di notevole volumetria e complessità; inoltre, la presenza di zone con diversa destinazione d'uso e i numerosi beni di pregio presenti all'interno dei vari ambienti, richiedono condizioni termoigrometriche particolari.

La definizione di eventuali soluzioni impiantistiche per questo tipo di edifici, avrebbe certamente richiesto una estesa analisi energetica per la valutazione dei fabbisogni richiesti dalla climatizzazione, supportata da monitoraggi e misure in sito non compatibili con i tempi a disposizione. Alcuni recenti interventi di ristrutturazione, rendevano

inoltre poco probabile l'adozione di nuove scelte impiantistiche. Per questi motivi si è scelto di evitare proposte impiantistiche da applicarsi alle ville storiche.

L'utilizzo di biomassa agroforestale, come fonte di alimentazione di una centrale termica cogenerativa al servizio di uno o più edifici, è apparso invece di difficile attuazione, visto l'impiego attuale di tale risorsa. Ad oggi infatti, i residui derivanti dall'attività di taglio e potatura delle vaste aree verdi presenti nel Parco, sono impiegati come foraggio per l'Azienda Agricola S. Giorgio, mentre la legna estratta dalle zone boschive viene venduta all'esterno. Un utilizzo massiccio di biomassa verde per l'alimentazione di una grande centrale provocherebbe quindi dei mancati introiti, che ridurrebbero la convenienza di tale scelta.

Anche lo sfruttamento del biogas ottenuto dalla biodegradazione del letame, prodotto dalla stessa azienda S. Giorgio è risultato poco conveniente: le quantità disponibili, dovute alle deiezioni animali e attualmente utilizzate per concimare i terreni circostanti la fattoria, non sono tali da giustificare l'installazione di un digestore anaerobico, anche se di piccola taglia. Vista inoltre la non contemporaneità di produzione e consumo del biogas, dovrebbe essere valutata anche la convenienza di un eventuale sistema di stoccaggio del gas.

In base a tali considerazioni, si è allora indirizzata la scelta su impianti da fonti rinnovabili di potenza non elevata, applicati a singoli edifici che presentavano vincoli meno restrittivi. La Cascina Fontana e la Cascina Bastia, attualmente sedi di uffici amministrativi del Consorzio, sono apparse idonee per la realizzazione di due impianti geotermici destinati alla climatizzazione. In particolare, per la Cascina Fontana si è ipotizzato un impianto a sonde verticali (ciclo chiuso), mentre per la Cascina Bastia è stato previsto un impianto a ciclo aperto con scambio termico ad acqua di falda.

Per la produzione elettrica da energia solare, non essendo possibili l'installazione di moduli fotovoltaici su edifici a carattere storico, è stata invece delineata la possibile realizzazione di un impianto presso l'Azienda Agricola S. Giorgio. L'impianto proposto sarà composto di 3 parti: una di circa 800 m^2 installata sulla copertura della struttura destinata alle stalle; la seconda di circa 16 kW sulla tettoia delle stalle e non soggetta a vincoli normativi; la terza collocata a terra, su un terreno adiacente la fattoria per una superficie di circa 300 m^2 . Le tre sezioni potrebbero costituire un unico impianto, in grado di produrre annualmente energia elettrica per circa 137 MWh, o essere realizzati singolarmente.

Per la Cascina Mulino Asciutti è stata presa in esame la possibilità di realizzare una microcentrale idroelettrica; dopo aver escluso l'utilizzo di turbine a coclea, in quanto caratterizzate da un eccessivo impatto sul territorio, si è ipotizzata l'installazione di una ruota idraulica ad acqua fluente, che sostanzialmente ripristini, a scopo energetico/divulgativo, l'attività dell'antico mulino. La producibilità energetica dell'impianto, che sfrutterebbe l'acqua derivata attraverso le rogge, sarebbe chiaramente dipendente dalle portate disponibili, che andrebbero opportunamente verificate, così come l'eventuale sistemazione idraulica dei canali di derivazione.

Tuttavia, l'utilizzo di una ruota idraulica a scopo energetico, al di là dell'energia effettivamente prodotta, avrebbe chiaramente una forte valenza dimostrativa, coniugando lo sfruttamento di una risorsa rinnovabile disponibile in sito, con il ripristino dell' antico mulino.

In questa prima fase di attività, sono stati sviluppati in via preliminare, due dei quattro dimostrativi: l'impianto microidroelettrico e quello fotovoltaico; entrambi sono finalizzati alla produzione di energia elettrica a scopo dimostrativo.

Per quanto riguarda gli impianti geotermici, per i quali sono state esaminate le condizioni di fattibilità presso i due edifici individuati (Cascina Fontana e Cascina Bastia), sono tuttora in corso delle verifiche per accertare alcuni aspetti essenziali. In questo caso infatti, i due applicativi, pur avendo un funzione dimostrativa, sono finalizzati alla climatizzazione dei due edifici: ciò implica una più attenta analisi tecnico/economica per stabilire se essi debbano coprire l'intero fabbisogno energetico o piuttosto essere installati ad integrazione degli impianti esistenti. A tal fine, oltre alle caratteristiche idrogeologiche del terreno, diventa essenziale anche il profilo d'utilizzo dei due edifici e la valutazione del fabbisogno energetico in regime invernale ed estivo. Per meglio approfondire tali aspetti, ai quali è legata la potenza degli impianti proposti, è sembrato opportuno integrare le valutazioni, ottenute mediante software di simulazione, con dati di misura dei consumi reali, che fornissero un quadro più puntuale e attendibile delle reale richiesta energetica dei due edifici.

Gli edifici oggetto di intervento saranno accessibili al pubblico, che mediante pannelli illustrativi e display potrà scoprire le caratteristiche dei vari applicativi proposti.

In altri edifici, saranno allestite "aree informative" in cui, mediante l'utilizzo di strumenti multimediali, potranno essere illustrati altri interventi o tecnologie per l'incremento dell'efficienza energetica potenzialmente utilizzabili negli edifici a carattere storico.

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

L'obiettivo affronta il tema dei materiali ad elevata riflessione solare come strumento per migliorare il comfort in ambienti esterni e confinati e, soprattutto, ridurre la domanda di energia elettrica in negli edifici. Quest'ultimo aspetto è stato già indagato nella precedente annualità, soprattutto per quanto attiene all'applicazione di cool roofs negli edifici. In questa annualità si è occupati prevalentemente dello sviluppo di nuovi materiali da utilizzare anche a scala urbana e di edifico, con focus sulla verifica del loro impatto sulla mitigazione dell'isola di calore, con conseguenti effetti postivi sui consumi per il raffrescamento.

L'utilizzo di Cool Material per le coperture e le facciate degli edifici limita l'apporto solare e quindi la richiesta energetica per il raffrescamento. L'utilizzo di questi materiali riduce la temperatura dell'aria in ambiente urbano, migliorando il comfort termico e riducendo il salto termico tra ambiente interno ed esterno, con riduzione della richiesta di fabbisogno per raffrescamento per gli edifici. Inoltre l'utilizzo di materiali generalmente chiari consente di ridurre la potenza degli impianti di illuminazione esterna a parità di prestazione illuminotecnica e riveste quindi una notevole importanza per l'efficienza energetica negli usi finali, in particolar modo quelli elettrici, legati alla riduzione dei regimi termici durante la stagione estiva.

L'attività si è sviluppata sulla dimostrazione delle potenzialità di risparmio energetico conseguibili a scala urbana e di edificio con l'utilizzo di Cool Material. Per il raggiungimento di questi obiettivi sono state indagate una serie di azioni: analisi dei materiali disponibili; tipo di applicazione (coperture e sistemi schermanti, degli edifici, pavimentazioni stradali, pavimentazioni di aree pedonali); sviluppo di nuovi materiali (termo cromici, a selettività spettrale); potenzialità di risparmio energetico di ogni tipologia di applicazione; progetti dimostrativi; analisi dell'impatto della riduzione dell'isola di calore urbana sui consumi energetici a scala urbana e di edificio.

Sviluppo ed assessment di cool material ad elevate prestazioni

Le vernici e le guaine a base organica sono i prodotti attualmente più diffusi e meno costosi per la creazione di cool roofs, ovvero cool material applicati sulle coperture degli edifici, ma possono andare incontro ad un rapido degrado delle prestazioni iniziali dovuto all'azione degli agenti atmosferici, all'inquinamento e all'invecchiamento dei materiali. L'Università di Modena e Reggio Emilia ha condotto uno studio avente come obiettivo la creazione di prodotti per coperture antisolari basati su materiali ceramici. Questi sono in grado di fornire prestazioni uguali o superiori a quelle offerte dai materiali organici in termini di riflettanza solare e molto superiori in termini di durabilità della performance dopo invecchiamento.

Nella prima parte dello studio, dopo analisi preventiva delle caratteristiche e delle prestazioni attese da parte di varie materie prime, si sono realizzati numerosi ingobbi ceramici bianchi e per alcuni di essi si sono ottenuti un elevato potere coprente del supporto ed un'elevata riflettanza solare (in particolare un ingobbio, arriva ad una riflettenza solare del 90%). Parallelamente, si sono realizzati ingobbi contenenti materiale di recupero a basso costo, comunque contraddistinti da riflettanza elevata. I due ingobbi dalle migliori prestazioni sono stati successivamente ricoperti con smalti ceramici (una fritta cristallina, una fritta bianca lucida ed uno smalto bianco matt standard), al fine di conferire loro la massima resistenza agli agenti atmosferici. L'esito finale del lavoro ha portato a realizzare due tipologie di piastrelle ceramiche cool roof perfettamente finite ed industrializzabili, con riflettanza solare di 86% e 83% rispettivamente. In termini di riflettanza solare le prestazioni di questi due prodotti superano quelle della maggior parte delle vernici a base organica attualmente in commercio. In termini di resistenza all'invecchiamento i prodotti ceramici offrono proprietà di molto superiore alle vernici a base organica.

Successivamente si sono valutate le proprietà di resistenza allo sporcamento delle superfici smaltate. Ciò è stato fatto valutando la rugosità delle superfici e l'angolo di contatto caratteristico di una goccia d'acqua deposta sulle superfici stesse. Minore è la rugosità di una superficie ceramica e maggiore è la sua tendenza a rimanere pulita, mentre maggiore è l'angolo di contatto di una goccia d'acqua sulla superficie, maggiore è la possibilità che la superficie stessa sia in grado di resistere all'adesione dello sporco. Ciò si verifica in virtù di proprietà autopulenti derivanti dalla formazione di gocce coese sulla superficie e dalla facilità di rotolamento delle stesse anche a fronte di minime pendenze. I test di rugosità hanno dimostrato che, come prevedibile, la superficie matt è più rugosa e quindi meno indicata per applicazioni di tipo cool roof. Le misure degli angoli di contatto hanno mostrato valori piuttosto bassi per tutte le superfici analizzate, ma comunque non dissimili da quelli caratteristici di alcuni materiali organici per cool roof.

In una seconda fase della ricerca si è concentrata l'attenzione sui materiali cool color, ancora una volta con l'obiettivo di sviluppare soluzioni a base ceramica. Lo studio qui documentato ha visto la sperimentazione, a partire degli ingobbi riflettenti precedentemente sviluppati, di due tipologie di cool colors, la prima ottenuta pigmentando in massa gli ingobbi bianchi, la seconda pigmentando in maniera selettiva lo smalto protettivo applicato sopra gli ingobbi stessi. Si è così verificata la realizzabilità di rivestimenti ceramici colorati con riflettanza

solare dell'ordine del 50% ed oltre, quindi ai vertici delle tipologie di prodotto di riferimento; entrambe le metodologie realizzative sopra illustrate e la seconda in particolare hanno portato a risultati positivi in termini di incrementi della riflettanza solare.

Un ulteriore campo di applicazione dei cool material è la finitura di chiusure oscuranti in alluminio. Persiane e scuretti sono chiusure tipiche dell'edilizia italiana e sono tradizionalmente realizzati in legno. Negli ultimi anni è invece aumentata la produzione di chiusure in alluminio, per motivi di economicità, durabilità e versatilità. Le chiusure in alluminio sono realizzate spesso nei colori tradizionali (verde, marrone, blu) e tendono a diventare estremamente calde in presenza di radiazione solare. I cool materials riducono aumentando la riflettenza solare a parità di resa cromatica possono essere efficacemente usati per mitigare l'apporto termico negli edifici attraverso le chiusure tecniche. La Tabella 66 riporta le misure ottenute in laboratorio ENEA con un spettrofotometro dotato di sfera integratrice. La Figura 176 riporta invece le curve spettrali di un grigio convenzionale ed un grigio cool. SI in particolare noti la risposta praticamente identica nello spettro visibile e quella chiaramente diversa nello spettro infrarosso.

Tabella 66. Risultati aggregati delle misure per i colori nero, grigio e gotico

	9005TR (Nero)	9005 (Nero)	7016TR (Grigio)	7016 (Grigio)	PMTR (Gotico)	PM (Gotico)
ρ_e (ISO 9050)	20,9	4,8	23,3	6,9	23,6	7,9
ρ_v (ISO 9050)	5,0	4,8	8,0	7,9	7,0	8,0
ρ_{ir} (ISO 9050)	42,2	4,7	44,1	6,0	45,7	7,7
ρ_e (UNI EN 410)	20,2	4,8	22,6	7,0	22,9	7,8
ρ_v (UNI EN 410)	5,0	4,8	8,0	7,9	7,0	8,0
Ra (UNI EN 410)	95,1	99,5	94,2	94,9	88,4	88,0

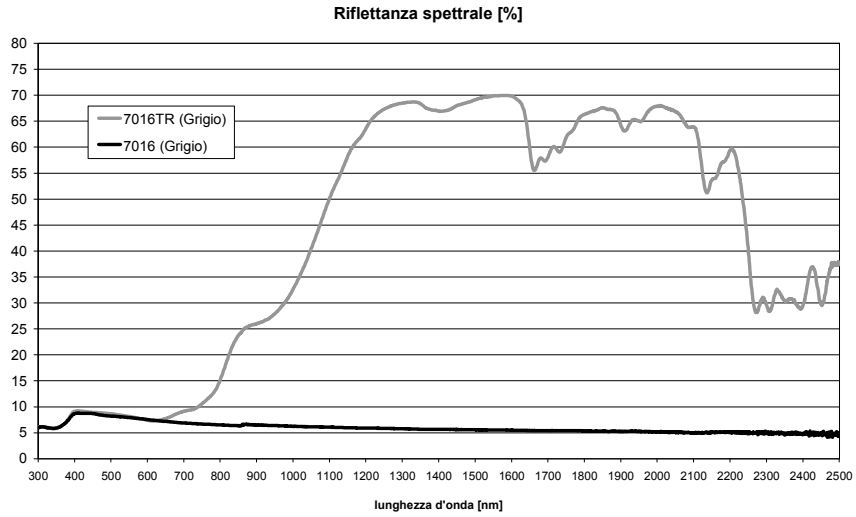


Figura 176. Comparazione di un prodotto grigio con vernice convenzionale e cool

Un'analisi successiva è stata condotta su materiali in alluminio realizzati con un trattamento superficiale in grado e riprodurre alcune tipiche essenze lignee. Sono state testate in particolare due diverse tipologie di marrone, una più chiara ed una più scura, rifinite poi con le tipiche venature del legno. La comparazione tra vernici convenzionali e vernici riflettenti in questo non ha dato risultati molto soddisfacenti. La riflettanza solare ha avuto incrementi modesti, quantificabili intorno al 35%, a questo si deve aggiungere una rispondenza cromatica piuttosto limitata. Va comunque ricordato che, almeno per la parte visibile, la prova è fortemente influenzata dallo spot di misura a causa delle notevoli differenze cromatiche imputabili alla presenza delle venature.

L'utilizzo dei cool material comincia a diffondersi anche per i materiali urbani (marciapiedi, aree pedonali, strade), combinando l'elevata riflettenza al biossido di titanio, utilizzato per la fotocatalisi e, dunque, per la riduzione di inquinanti nell'aria. L'immagine seguente presenta le immagini termica e reale di cinque prodotti per asfalto caratterizzati da una notevole risposta all'infrarosso vicino. I campioni di diverso colore sono posti sull'asfalto ed esposti alla radiazione solare. Dalle immagini si evince come le temperature superficiali dei cool material siano decisamente inferiori all'asfalto, che ha generalmente una riflettenza solare compresa tra il 5% (nuovo) ed il 15% (invecchiato).

Misura delle caratteristiche termo-fisiche di materiali irregolari

Gli strumenti di misura per la caratterizzazione delle proprietà termo-fisiche superficiali di materiali da costruzione soffrono di una serie di limitazioni. Le misure di riflettenza sono eseguite con spettrofotometri equipaggiati con sfere integratrici con diametro generalmente non superiore ai 15 centimetri. Questa configurazione consente di misurare la riflettenza di materiali diffondenti a patto che essi siano sufficientemente omogenei. Tipicamente lo spot di misura non supera il centimetro quadrato ed è dunque preferibile che la rugosità del materiale sia tale da considerare lo spot di misura rappresentativo di tutto il materiale. Sono state condotte una serie di misure su rivestimenti per asfalti da cui si evidenzia la problematica; le misure di riflettenza solare per due colori, bianco e grigio, sono riportate nella Tabella 67. Le misure sono state eseguite su 3 punti per ogni campione e nell'ultima colonna si riporta la media delle misure.

Si evince che per la singola misura possono esserci scostamenti fino a 1,7%. Anche se gli spettrofotometri hanno generalmente un errore stimato in 1%, appare chiaro che in una ipotesi di certificazione e rating di prodotto, differenze anche piccole possono causare uno svantaggio al produttore, a causa si una sovrastima o sottostima della misura. Si ritiene dunque necessario implementare delle procedure di misura per tutti quei casi in cui la complessità del materiale da testare limita le potenzialità dello strumento di misura o, in seconda battuta, considerare altre apparecchiature di misura che, però, non rinuncino all'accuratezza degli spettrofotometri.

Tabella 67. Riflettanza solare di rivestimenti riflettenti per asfalti

Materiale	Riflettanza spot 1	Riflettanza spot 2	Riflettanza spot 3	Riflettanza media
Bianco	65,9	65,7	66,4	65,7
Grigio	39,5	40,8	40,6	40,3

Situazione più complessa si presenta per le misure di remissività. Spettrometri all'infrarosso di grande accuratezza e campo spettrale molto ampio sono disponibili per materiali a comportamento speculare (vetro e metalli). Per materiali diffondenti si usano spettrometri con sfere integratrici, che hanno limiti sullo spettro di misura, arrivando a misurare uno spettro che arriva a coprire circa il 75% dell'energia radiante emessa da un corpo nero alla temperatura ambiente. Esistono poi degli strumenti in grado di misurare l'emissività di un materiale con metodi calorimetrici, senza eseguire indagini di tipo spettrale. Questi strumenti sono ovviamente di accuratezza minore, anche se non necessariamente inadeguati alle misure di remissività del tipo richiesto per i cool material. La Stazione Sperimentale del Vetro ha eseguito una serie di indagini per verificare la possibilità di estrapolare dati spettrali su un intervallo esteso a partire da misure su un intervallo spettrale limitato.

La misura effettuata nell'intervallo IR con lo spettrofotometro IR Perkin Elmer modello 983 G risente molto del comportamento diffondente della superficie. Gli specchi dell'accessorio di riflettanza speculare non sembrano in grado di "catturare" nemmeno parzialmente la componente diffusa dal campione. Solo tre campioni di lamina verniciata che presentavano alcune zone sufficientemente compatte e lucide hanno dato luogo ad un segnale misurabile anche se molto basso (2-4%) rispetto a quanto atteso. Per tutti gli altri campioni la misura coincideva sostanzialmente con il fondo. I campioni sono stati misurati anche con uno spettrofotometro IR a trasformata di Fourier (FTIR) Perkin Elmer modello GX1, dotato di microscopio infrarosso Auto Image. Questo spettrofotometro consente la misura in un intervallo ridotto di lunghezze d'onda al 983G, intervallo che si riduce ulteriormente quando la misura viene eseguita attraverso il microscopio IR. Mediante l'utilizzo del microscopio è però possibile analizzare una superficie molto piccola di campione (1 mm^2) potendo scegliere con cura zone con una finitura superficiale adatta alla misura. I tre campioni di lamina verniciata denominati 1, 2 e 3 hanno dato un segnale apprezzabile (2-5 %) e evidenziando alcuni picchi di assorbimento dovuti ai componenti organici della vernice che non erano visibili nelle misure con lo strumento dispersivo. Le misure eseguite mediante il microscopio IR Auto Image sono invece abbastanza definite (3-15 %) e consentono di distinguere con sufficiente precisione i picchi di assorbimento dovuti ai componenti organici della vernice. E' stato effettuato un tentativo per cercare di migliorare la misura rendendo più uniforme la superficie dei tre campioni che hanno evidenziato una possibilità di lettura, mediante leggera lucidatura con materiale finemente abrasivo.

L'utilizzo di uno spettrofotometro infrarosso a dispersione dotato di accessorio di riflettanza speculare non consente di espandere l'intervallo di lunghezze d'onda misurabili con lo spettrofotometro IR dotato di sfera integrante per consentire l'utilizzo delle procedure descritte nella norma UNI EN 12898. Le caratteristiche molto diffondenti dei materiali per edilizia misurati costituiscono un limite invalicabile per l'esecuzione della misura con un adeguato grado di precisione. L'utilizzo uno spettrofotometro FTIR equipaggiato con microscopio infrarosso pur consentendo misure più accurate non aumenta il range di lunghezze d'onda misurabili dallo spettrofotometro IR con sfera integrante e quindi si non si rivela utile per lo scopo della ricerca.

Impatto di cool material sulle prestazioni energetiche ed ambientali a scala urbana

L'utilizzo di opportuni strumenti consente di valutare le caratteristiche termo fisiche dei materiali naturali e del costruito a scala urbana e, conseguentemente, valutare le opportunità di mitigazione dello stress termico utilizzando materiali ad elevata riflessione solare. Un passo fondamentale è la mappatura geometrica della città, o sua porzione, e successivamente la caratterizzazione termica individuando i materiali più ricorrenti e la loro ripartizione sull'area di interesse. Una serie di studi relativi ad una porzione del centro di Roma sono stati condotti come analisi preliminare alla valutazione dell'impatto dei regimi termici urbani sul carico di raffrescamento degli edifici o di intere aree urbane.

I dati tele rilevati possono essere di grande aiuto nella fase iniziale di mappatura. Lo studio ha consentito di caratterizzare il territorio del quartiere Prati di Roma attraverso il sistema a scansione MIVIS che acquisisce per ciascun elemento dell'immagine (pixel), l'intero spettro di energia solare riflessa nella regione dello spettro elettromagnetico compresa tra 0,433-12,70 micron. Oltre alla sua elevatissima risoluzione spettrale, lo strumento possiede un'altrettanta elevata risoluzione spaziale con un pixel che arriva fino a 3x3 metri. I dati iniziali sono ricavati da: MIVIS, volo sulla città di Roma ad una quota di 1500 metri con una risoluzione del pixel di 3x3 m; Carta Tecnica Regionale del 1996, scala 1:10000 per l'inquadramento territoriale; CTR numerica del 2004, scala 1:5000, per l'integrazione con il dato MIVIS. Il dato MIVIS è stato elaborato con il software ENVI (ITT), versione 4.7, mentre ArcGIS (Esri), versione 10, è stato utilizzato per le analisi spaziali. La Figura 177 riporta la ripartizione percentuale per macroclassi dei diversi materiali presenti nell'area. Attraverso questa ripartizione è possibile assegnare valori di riflettanza ed remissività medi del materiale per successive applicazioni di tecniche di mitigazione.

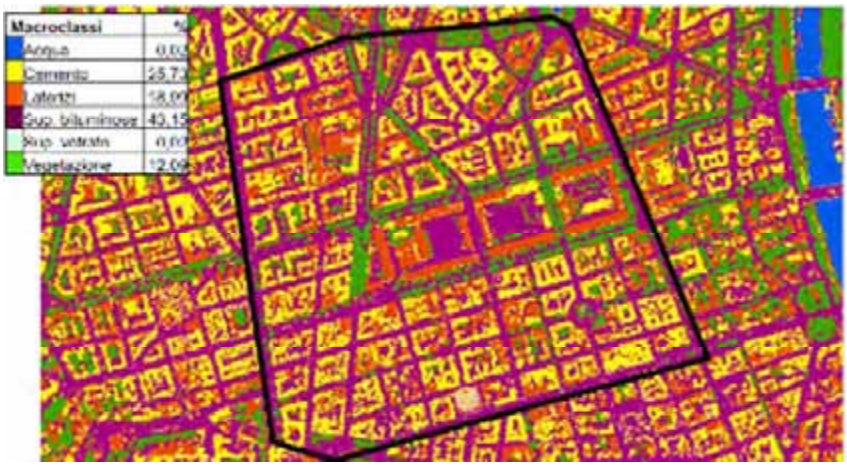


Figura 177. Macroclassi di materiali naturali e urbani individuate dall'analisi termica con sensore MIVIS

Nella stessa zona sono state valutate le potenzialità dei *cool material* per ridurre i profili termici nelle città, migliorando le condizioni di comfort termico esterno e riducendo i fabbisogni di climatizzazione negli edifici. L'area, densamente urbanizzata, è stata oggetto di studio attraverso l'ENVI-met, un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico di tipo S.V.A.T. (Soil, Vegetation, Atmosphere, Transfer). Sono state eseguite tre simulazioni che coprono due giornate estive per limitare l'effetto del transitorio, il 20 e il 21 Luglio 2010, con tre diverse configurazioni di riflettanza per gli edifici, marciapiedi e strade: una configurazione originale (realistica), una a basso impatto di *cool material* e una ad alto impatto di *cool material*. In tutti i casi sono stati utilizzati valori di riflettenza ed emissività assolutamente realistici con le attuali tecnologie produttive.

Dai test si evince, attraverso una scala cromatica delle temperature dell'aria esterna, come quest'ultima diminuisca in media di circa 2 °C passando dalla situazione più realistica in termini di riflettanza delle superfici a una in cui la zona è stata simulata con un'applicazione di *cool material* a basso impatto. Considerando l'applicazione di *cool material* ad alto impatto, la temperatura decresce ulteriormente, con una differenza in media di 3,5 °C. L'effetto dei cool material risulta evidente nella Figura 178, in cui si presenta il profilo orario della differenza di temperatura tra la configurazione standard e le due con applicazione di materiali riflettenti. L'analisi si riferisce ad un particolare punto di osservazione posto a 3 metri dal piano stradale e denominato recettore 2. La massima differenza di temperatura tra la configurazione originale di riflettanza e quella con cool material a basso impatto è 1,9 °C. Se la configurazione originale viene confrontata con la situazione che prevede l'applicazione di cool material ad alto impatto la differenza sale a 3,3 °C.

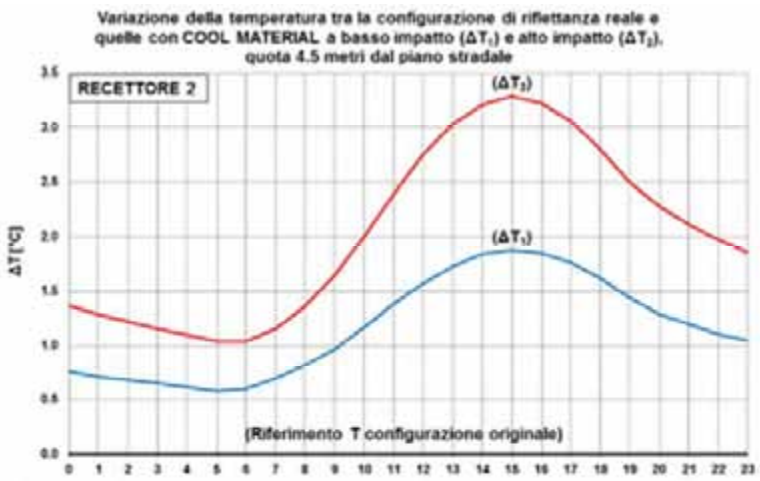


Figura 178. Profili di temperatura – differenza tra materiali standard e cool

L'effetto isola di calore urbana è un fenomeno che affligge in maniera sempre più persistente i centri abitati. Questo lavoro ha dimostrato la presenza del fenomeno a Roma. Gli studi condotti evidenziano le potenzialità dell'uso dei *cool material* al fine di mitigare alcuni pericolosi aspetti legati al surriscaldamento globale e locale. L'applicazione su scala urbana dei suddetti materiali è stata analizzata tramite un software di simulazione, l'ENVI-met. Esso ha permesso di quantificare l'effettiva influenza che questi ultimi hanno sulla temperatura dell'aria esterna di una zona di Roma presa a campione, evidenziando una diminuzione considerevole. La diminuzione della temperatura si ripercuote anche su un generale miglioramento del livello di comfort. L'utilizzo in larga scala di cool material con proprietà sempre migliori unito ad un'estensione delle aree vegetative in ambiente urbano risulta essere un fattore importante che contribuisce a migliorare le condizioni di vita della popolazione.

Principali soggetti esterni coinvolti

Politecnico di Milano

Le attività sono state finalizzate ad uno studio di ricerca ed applicazione dei modelli e programmi di calcolo per la certificazione energetica degli edifici basati sull''applicazione delle UNI/TS 11300 e validazione della UNI/TS 11300 per la certificazione di edifici complessi, utilizzando come principale strumento di indagine il codice di simulazione dinamica EnergyPlus. E' stato sviluppato un foglio di calcolo per l'applicazione trasparente delle UNI/TS 11300 e il confronto con altri metodi semplificati (norme CEN EPBD).

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.

L'attività sullo "Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio", che ha come obiettivo l'individuazione e la valutazione di interventi che garantiscano, al contempo, il miglioramento energetico e la salvaguardia dei caratteri morfologici, materici e architettonici degli edifici storici, è stata svolta mediante un set di simulazioni dinamiche condotte su edifici-tipo ad uso Istituti di credito e Assicurativi collocati nel contesto climatico italiano. Le valutazioni comparative tra i diversi dati ottenuti consentiranno di evidenziare le criticità connesse a futuribili scenari di intervento che contemplino tecnologie di impianto innovative, con particolare riferimento al contenimento dei consumi elettrici in fase d'uso.

Dovrà assicurare la propria partecipazione alla preparation phase dell'Annex 56 "Energy and GHG Optimized Building Renovation".

Politecnico di Torino

Le attività sviluppate sono state finalizzate a determinare i fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento per gli edifici a destinazione d'uso scolastico per le scuole secondarie superiori, focalizzate nella zona climatica E ed F.

Università di Pisa

Le attività sono state finalizzate a sviluppare una metodologia per l'audit energetico negli edifici del civile, residenziale e non residenziale,. La metodologia ha tenuto conto degli ultimi decreti normativi varati e delle norme relative (UNITS 11300 parte 1,2 e 3). La messa a punto di questo strumento ha richiesto un approfondito lavoro di

studio e ricerca per cercare di mettre a punto uno strumento “semplice” da utilizzare pur nella complessità per gli aspetti che investono le raccomandazioni della certificazione energetica degli edifici e per quanto viene richiesto dal DLgs 118/09 e smi. Questa metodologia potrà essere utilizzata ,per la definizione dei contratti di servizio energia e perquelle PA che promuovono interventi di audit energetico con finanziamenti e bandi di gara.

Ha inoltre riguardato le “Linee guida per interventi di miglioramento dell’efficienza energetica negli edifici di pregio e per la gestione efficiente del sistema edifico-impianto” si è sviluppata nello scenario intorno al quale si inserisce questa ricerca, il Parco di Villa Reale a Monza.

Università di Roma “La Sapienza”

Le attività sono state finalizzate ad analizzare i componenti tecnologici utilizzati per la applicazione di sistemi intelligenti di Domotica e valutarne vantaggi e svantaggi di applicazione ed i risparmi conseguibili con l’applicazione di sistemi Domotici. Sono state fatte delle simulazioni per il settore residenziale con tre scenari di riferimento. In un casa “tipo”. Tali simulazioni, che prevedono l’applicazione del la Domotica con tre diversi livelli di configurazione di sistema, hanno consentito di poter valutare i costi ed i tempi di ritorno nelle tre configurazioni.

E’ Stato coinvolta inoltre nello studio e nella definizione di un kit domotico ‘fai da te’ di elevata semplicità ed economicità che sia nel contempo di facile installazione e utilizzo per il piccolo utente pubblico e privato.

Università di Milano Bicocca

Ha sviluppato le attività per lo sviluppo di una metodologia per la messa a punto di un software integrato per la diffusione e la comunicazione di interventi di efficienza energetica negli edifici di pregio e la valorizzazione dei beni vincolati

Università IUAV di Venezia

Ha partecipato ai lavori dei gruppi di esperti coinvolti nell’Implementing Agreement “Energy Conservation in Building Communities Systems” dell’Agenzia Internazionale dell’Energia, in particolare per quanto riguarda il nuovo Annex 56 “Energy and GHG Optimized Building Renovation” approvato nel giugno 2010 dal Comitato esecutivo dell’IA ECBCS

Università degli Studi di Palermo

Ha partecipato attivamente da tempo con i propri esperti al Gruppo di lavoro del progetto “Towards Net Zero Energy Solar Buildings” dell’Agenzia Internazionale dell’Energia; il progetto è uno sforzo di ricerca congiunto tra l’Annex 52 dell’Implementing Agreement “Energy Conservation in Building Communities Systems” e il Task 40 dell’Implementing Agreement “Solar Heating and Cooling”.

Università di Pavia

La ricerca sviluppata ha riguardato le “linee guida per interventi di miglioramento dell’efficienza energetica negli edifici di pregio e per la gestione efficiente del sistema edifico-impianto” si è sviluppata nello scenario intorno al quale si inserisce questa ricerca, il Parco di Villa Reale” a Monza.

Università di Modena e Reggio Emilia

L’attività sviluppata ha riguardato la messa a punto di materiali ceramici riflettenti, bianchi e non, in grado di fornire prestazioni decisamente superiori a tipici prodotti con caratteristiche analoghe disponibili in commercio. In particolare, nell’ambito della presente ricerca si sono analizzati supporti ceramici pigmentati bianchi ottimizzati per ottenere un elevato valore di riflettanza solare. Si sono studiati cool colours ottenuti sovrapponendo ai supporti di cui sopra ricoprimenti trasparenti pigmentati con caratteristiche di trasmissione altamente selettive, atte ad ottenere uno spettro di riflessione nel visibile tale da riprodurre colori tipici dell’edilizia italiana ed europea.

Università degli Studi di Roma Tre

Raccolta dati climatici nella città di Roma ai fini dell’analisi dell’impatto Isola di Calore Urbana. Analisi termica e fluidodinamica con strumenti ad elevate prestazioni dell’impatto di cool material sulla riduzione dei profili termici a scala urbana, per una zona della città di Roma. Il modello di calcolo utilizzato ha consentito di definire le condizioni termiche per porzioni di città in funzione di una serie di input, che includono le caratteristiche termo-fisiche superficiali dei materiali da costruzione, e quindi le potenzialità di riduzione dei regimi termici.

La Federazione Italiana per il Risparmio Energetico (FIRE)

La FIRE ha sviluppato l'attività riguardante la gestione dell'energia negli ospedali. La FIRE, che da anni segue attraverso indagini e gruppi di lavoro l'andamento dei consumi e delle dinamiche del settore ospedaliero – attraverso la rete degli energy manager – e che ha partecipato a livello europeo ai tavoli di lavoro Cen Cenelec , ha proseguito l'attività sviluppata nella precedente annualità inerente l'applicazione di sistemi intelligenti per la gestione dell'energia e dello stato di applicazione della norma UNI EN16001 negli ospedali

La norma EN 16001 sui sistemi di gestione dell'energia, in accordo con l'art. 8 della direttiva 2006/32/CE apre nuove scenari per la diffusione di buone pratiche per l'efficienza energetica, e grazie alla previsione obbligatoria della diagnosi energetica iniziale e del monitoraggio continuo delle prestazioni energetiche, risulta uno strumento utile per la verifica effettiva delle performance degli interventi, per la verifica sul campo di eventuali certificazioni energetiche e per la realizzazione di indicatori energetici.

Il Comitato Termotecnico Italiano (CTI)

Il CTI ha continuato l'attività riguardante la definizione dell'anno caratteristico per le province italiane delle regioni del centro Sud (Abruzzo, Umbria, Basilicata, Lazio, Marche, Campania, Puglia, Calabria, Molise, Sicilia) Resta esclusa la Sardegna, che non ha fornito i dati climatici. Più volte richiesti). Le stazioni selezionate sono 45 ubicate in prossimità dei rispettivi capoluoghi di provincia e sono rappresentative delle caratteristiche climatiche di questi capoluoghi.

Il Centro Ricerche CRESME

Il CRESME ha continuato l'attività di ricerca ed indagine per la definizione del parco immobiliare del settore del non residenziale riferito agli Istituti Bancari ed i Centri Commerciali. Il rapporto ha definito la consistenza degli edifici di queste destinazioni d'uso e ne ha caratterizzato la distribuzione sul territorio e le caratteristiche tipologiche costruttive ed impiantistiche. Lo studio ha fornito dati e caratteristiche degli edifici necessarie per definire l'edificio tipo richiesto dalla Direttiva 31/2010/CE per l'applicazione della metodologia comparativa.

Stazione Sperimentale del Vetro

Sviluppo di una tecnica per estendere le misure di emissività spettrale a tutto lo spettro infrarosso a partire da misure effettuate su una porzione ridotta di spettro. SSV ha eseguito misure di emissività ad incidenza normale con uno spettrofotometro a dispersione (spettro 5-50 micron) su una serie di campioni diffondenti forniti da ENEA, successivamente integrate con misure spettrofotometro FTIR. Il set di misura ha evidenziato che la procedura di estensione delle misure FTIR non è perseguibile con campioni complessi come cool material.

Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del CNR

Attività di ricerca che utilizza dati telerilevati acquisiti nella città di Roma per individuare elementi e materiali da costruzione e analizzarne il comportamento termico. Lo studio in esame è consistito nell'elaborazione dei dati iperspettrali MIVIS, al fine di individuare di dati in input da inserire nelle analisi numeriche per la valutazione dell'efficacia dei cool material. I dati originali sono stati acquisiti con voli sulla città di Roma, eseguiti in diversi periodi, ad una quota di 1500 metri da terra, ne corrisponde un pixel di 3x3 m. L'individuazione dei diversi materiali è eseguita con tecniche di classificazione attraverso l'analisi della risposta spettrale.

Asso Vetro Servizi srl

Ha sviluppato ed effettuato una serie di analisi in grado di stabilire le relazioni tra le caratteristiche dei materiali trasparenti e le prestazioni energetiche degli edifici, in funzione di: tipologia di edifici, zona climatica di appartenenza, livello di isolamento termico, classe di permeabilità all'aria, controllo della radiazione solare.

Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

(Referente N. Calabrese)

La domanda di energia per il condizionamento degli ambienti è aumentata considerevolmente negli ultimi decenni ed il trend è ancora fortemente in crescita. Le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento estivo (sistemi a compressione con motori elettrici) sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici. In particolare il rischio è di dover aumentare significativamente la potenza installata senza un corrispondente aumento del consumo con il risultato di un costo dell'energia più alto.

Negli ultimi anni diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico hanno applicato tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (*solar cooling*) o comunque fonti di energia alternative al condizionamento degli edifici. L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda con la disponibilità di energia solare.

Attualmente esistono diverse componenti tecnologiche per la realizzazione di sistemi di raffrescamento solare, tuttavia non esiste ancora una soluzione tecnologica integrata di facile applicazione, con il risultato che gli impianti di questo tipo sono ancora per lo più di tipo sperimentale e come tali molto costosi e poco competitivi.

Il progetto ha lo scopo di definire e sviluppare un sistema integrato che sia robusto, competitivo e di riferimento per il "sistema Italia", in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. Il progetto consentirà inoltre di comprendere in quali condizioni climatiche, con quali tecnologie e con quale politica di supporto possa essere avviata un'azione che porti ad una diffusione di massa di sistemi di climatizzazione basati sull'energia solare o comunque assistiti da fonti rinnovabili.

Va anche osservato che i sistemi di climatizzazione assistiti da solare possono far ricorso alla integrazione di tecnologie diverse, quali l'impiego in varie forme di sistemi basati su tubi di calore (*heat pipe*). Va infine rilevato che, per migliorare la competitività del sistema, è interessante indagare le potenzialità di impiego invernale di un sistema di solar cooling: il progetto si dedicherà pertanto anche allo studio del comportamento delle pompe di calore elio assistite in periodo invernale.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Lo scopo principale del progetto è quello di favorire una crescita nel ricorso a queste tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede parallelamente lo sviluppo di:

- componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- una varietà di soluzioni tecnologiche che consenta la scelta ottimale per ogni situazione climatica presente nel territorio nazionale.

L'analisi dei dati di reale funzionamento degli impianti installati negli edifici "dimostratori" consentirà, validando i modelli di ottimizzazione multiparametrica appositamente sviluppati, di poter realmente conoscere il tempo di pay-back di questi impianti di climatizzazione innovativa. In parallelo tale analisi sarà fondamentale per permettere di valutare il comportamento reale dei vari componenti innovativi atti a realizzare il sistema integrato.
Per analizzare tale tipo di tecnologia abbiamo sviluppato presso il C.R. di Casaccia alcune facility di prova dei vari componenti ed un impianto di solar cooling opportunamente strumentato a servizio dell'Edificio F51 avente destinazione d'uso "uffici".

I risultati del monitoraggio di questo impianto sono stati molto sorprendenti, soprattutto quelli relativi al periodo di funzionamento invernale dell'impianto. Si è infatti constatato che i pannelli solari, utilizzati per alimentare l'impianto di riscaldamento dell'edificio (*solar heating*), hanno assicurato un risparmio di circa il 40% dell'energia termica necessaria a riscaldare gli ambienti. Gli stessi pannelli che in estate producono l'energia termica necessaria ad alimentare la pompa di calore ad assorbimento dedicata alla climatizzazione estiva assicurano anche una ottima percentuale di energia termica dedicata al riscaldamento degli ambienti durante il periodo invernale. In questo modo il tempo di ritorno degli investimenti risulta sensibilmente ridotto e lo stesso componente (pannello solare ad alta efficienza) gioca un ruolo fondamentale durante tutto l'anno.

L'attività ha inoltre approfondito la possibilità di utilizzare l'energia solare in ausilio a pompe di calore dedicate al riscaldamento degli ambienti durante il periodo invernale: queste pompe di calore sono identificate come

“elioassistite”. Sono delle macchine tradizionali, del tipo acqua-acqua, che se abbinate ad impianti a pannelli solari termici di basso costo, riescono a garantire dei COP (Coefficient Of Perfomance) comparabili con quelli ottenibili abbinando queste macchine a delle sonde geotermiche. In zone dove difficilmente sarebbero proponibili impianti di tipo geotermico, l’adozione di pompe di calore elioassistite garantirebbe degli ottimi risultati ottenibili con dei costi di investimento di gran lunga inferiori.

Per le zone climatiche “rigide”, dove la temperatura esterna scende sotto i T = 2 °C, si è analizzata la possibilità di utilizzare delle pompe di calore che utilizzano come refrigerante la CO_2 (R744) per garantire il riscaldamento degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria. Anche in questo caso i risultati ottenuti sono risultati molto interessanti: sicuramente questa tecnologia è una valida alternativa alle caldaie che utilizzano combustibile fossile in zone dove lo stesso è difficilmente reperibile.

A completamento di una azione già intrapresa nella precedente annualità, è stato reso accessibile via web il geodatabase open source dei Dati geo-litologici nazionali; il geodatabase è stato integrato con stratigrafie rappresentative di quattro aree scelte nelle città di Palermo, Napoli, Roma e Milano. Il WEB GIS rappresenta un importante strumento di informazione condivisa, a supporto della diffusione della tecnologia delle pompe di calore geotermiche.

Allo scopo di diffondere i risultati ottenuti nelle varie annualità e di offrire maggiori informazioni sulla ricerca che ENEA sta portando avanti in questo ambito, è stato sviluppato un portale web dedicato ai “Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili”.

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

- la prima linea è quella dello sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe di calore elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO_2, sistemi desiccant, pompe di calore geotermiche; a questo scopo sono stati realizzati impianti prototipali, laboratori di qualificazione e è stata garantita la partecipazione a network di ricerca internazionali (IEA).
- La seconda linea di attività riguarda l’integrazione del sistema di climatizzazione, cioè la costruzione di sistemi integrati che possano essere robusti e competitivi assolvendo l’intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. In questo contesto sono stati sviluppati impianti pilota e dimostratori integrati in edifici uso ufficio e sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

Obiettivo di questa attività è la progettazione, realizzazione, messa in funzione e l’analisi sperimentale di prototipi di componenti innovativi costituenti il sistema integrato in grado di assolvere l’intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. In particolare, si riportano di seguito le sintesi dei principali risultati ottenuti per ognuna delle linee di ricerca portate avanti.

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

Nell’ambito del presente progetto di ricerca è stato installato un test ring per impianti di solar cooling funzionanti con macchine ad adsorbimento/assorbimento accoppiate a collettori solari a tubi evacuati. L’impianto installato è costituito dai seguenti componenti principali:

- Macchina ad assorbimento modello PINK PCS 12 da 12 kW frigoriferi.
- 41 m^2 di collettori solari a tubi evacuati (superficie di apertura).
- Serbatoio di accumulo da 2000 litri.
- Torre evaporativa a circuito aperto da 45 kW a 32 °C/ 26 °C.
- Caldaia a gas da 32 kW.
- Simulatore di carico frigorifero.

Modalità di funzionamento

Il sistema è stato progettato in modo da permettere di:

- riprodurre le condizioni di funzionamento nominali proprie della macchina frigorifera
- testare condizioni di funzionamento diverse da quelle nominali
- permettere l’ottimizzazione delle prestazioni energetiche dell’intero sistema impianto.

A tal fine il sistema presenta una configurazione impiantistica versatile e sarà provvisto di circolatori e ventilatori a portata variabile (Figura 179).

Figura 179. Foto dell'impianto realizzato e del campo di collettori solari a tubi evacuati

Circuito caldo

Il sistema è configurato in modo tale da permettere tre diverse modalità di funzionamento:

Modalità 1 - Accoppiamento diretto dell'impianto solare con il generatore della macchina frigorifera

In questa modalità di funzionamento il serbatoio di accumulo è bypassato, consentendo il test del sistema assorbitore – collettori solari in accoppiamento diretto. Ciò è permesso dalla presenza dei rami di by-pass e delle valvole deviatrici. Il calore necessario al generatore della macchina frigorifera è esclusivamente fornito dall'impianto solare. Non è previsto un funzionamento in parallelo dell'impianto solare e della caldaia ausiliaria. La valvola deviatrice è chiusa sul lato del ramo di collegamento alla caldaia in modo da evitare la circolazione dell'acqua nei collettori di distribuzione del calore collegati alla caldaia. La caldaia, se è richiesto calore dal lato del simulatore di carico, è resa comunque disponibile.

Modalità 2 - Accoppiamento dell'impianto solare con il generatore della macchina frigorifera con passaggio attraverso il serbatoio di accumulo

In questa modalità di funzionamento il calore fornito dai collettori solari è inviato prima al serbatoio di accumulo. Da qui, se la temperatura dell'acqua in uscita dall'accumulo è sufficiente per l'alimentazione della macchina, viene prelevata la potenza termica necessaria al funzionamento della macchina frigorifera. Il ramo caldo collegato alla caldaia ed utilizzato per l'integrazione termica viene mantenuto chiuso per mezzo di una valvola a tre vie. Anche in questo caso, se è richiesto calore dal lato del simulatore di carico, la caldaia è comunque disponibile. Grazie a questa modalità di funzionamento si potranno svolgere test sulle prestazioni del sistema in presenza di sfasamenti tra la disponibilità di radiazione solare (tramite l'uso dell'accumulo termico) e la richiesta di freddo all'evaporatore (tramite il simulatore di carico).

Modalità 3 - Alimentazione del generatore della macchina frigorifera tramite la caldaia

Se invece la temperatura in uscita dall'accumulo non è sufficiente per l'alimentazione della macchina, allora viene aperta la valvola in modo che l'acqua riscaldata dalla caldaia possa fluire verso il generatore della macchina frigorifera. Contemporaneamente, se vi è disponibilità di radiazione solare per mezzo della pompa può essere caricato l'accumulo termico con il calore dei collettori solari. La presenza di un ramo di by-pass con valvola di taratura tra collettori di distribuzione di mandata e ritorno della caldaia permette il disaccoppiamento idraulico delle pompe P6 e P3 ed un corretto funzionamento della valvola miscelatrice .

Circuito freddo

Il carico termico da accoppiare all'evaporatore della macchina frigorifera può essere simulato grazie ad un apposito simulatore di carico composto dallo scambiatore di calore aria – acqua posto all'esterno e da uno scambiatore acqua – acqua collegato alla caldaia a gas. La presenza dello scambiatore aria – acqua permette il test della macchina frigorifera con carichi termici legati all'andamento della temperatura esterna (ad esempio per la simulazione del funzionamento della macchina in accoppiamento ad una o più batterie di raffreddamento di UTA ad aria primaria). La potenza termica scambiata può essere variata agendo sulla velocità di rotazione del ventilatore. L'esclusione totale dello scambiatore è garantita invece dalla presenza di un by-pass manuale. In alternativa o in successione allo scambio termico con l'aria esterna può essere regolata la temperatura dell'acqua

di ritorno all'evaporatore della macchina, per mezzo di un apposito circuito di regolazione con valvola miscelatrice a tre vie. Grazie a questo secondo scambiatore e al sistema di regolazione della temperatura di ritorno alla macchina, può essere simulato un qualsivoglia profilo di carico termico da accoppiare alla macchina frigorifera.

Quanto detto permetterà la valutazione delle prestazioni del sistema per differenti applicazioni e modalità d'uso dell'impianto (residenziale, ufficio, ecc..).

Circuito della torre evaporativa

Nel circuito della torre evaporativa è presente una valvola miscelatrice utilizzata per la regolazione della temperatura di ritorno alla macchina frigorifera. Inoltre potrà essere regolata la velocità di regolazione della pompa e del ventilatore della torre evaporativa per mezzo di sistemi ad inverter. Ciò permetterà di eseguire test sulle prestazioni del sistema al variare della portata e della temperatura di ritorno.

Descrizione del sistema di monitoraggio e controllo sviluppato in Labview

Per la regolazione, il controllo e l'acquisizione dei dati di monitoraggio, è stato sviluppato un apposito algoritmo in ambiente Labview di cui di seguito si riporta il pannello di controllo.

Per una maggiore versatilità nell'esecuzione delle prove, il sistema è stato programmato in modo da avere due modalità di funzionamento di base:

- funzionamento manuale;
- funzionamento automatico;

La modalità di funzionamento manuale consente di valutare le prestazioni del Chiller e verificarle con quelle nominali fornite dal costruttore. In questo caso ogni elemento dell'impianto (chiller, pompe, caldaia, valvole deviatrici, ecc.) è attivato manualmente agendo sui rispettivi controlli. E' possibile quindi decidere se alimentare la macchina:

- direttamente con il calore dei collettori;
- con il calore dei collettori attraverso l'accumulo;
- con il calore prodotto dalla caldaia.

Nella modalità di funzionamento automatico invece l'impianto viene controllato in maniera automatica dalla logica di regolazione implementata in funzione di valori di set point impostati dall'utente. La logica di regolazione in questo caso riflette le modalità di funzionamento descritte precedentemente sulla base della temperatura richiesta al generatore e del livello di temperatura disponibile ai collettori, all'accumulo e alla caldaia. Viene data precedenza al calore fornito dai collettori solari, successivamente a quello accumulato nel serbatoio ed infine quando necessario a quello fornito dalla caldaia. La scrittura dei dati di monitoraggio è stata effettuata con un periodo di 1 minuto.

Indagini sperimentali

Completata l'installazione dell'impianto e messo a punto il sistema di monitoraggio e controllo, si è iniziata la fase riguardante le indagini sperimentali. Innanzitutto, al fine di analizzare in dettaglio i consumi elettrici dell'impianto, si è proceduto alla misura dell'assorbimento elettrico di ogni singolo componente operante alla potenza massima, ottenendo la distribuzione mostrata in Figura 180. La potenza elettrica totale massima assorbita risulta pari a 2250 W a cui corrisponde un COP elettrico del sistema di 5,35 calcolato in riferimento alla potenza frigorifera nominale della macchina di 12 kW. E' da considerare comunque che tutti i componenti elettrici in campo sono a potenza regolabile, rendendo possibile così un'ottimizzazione del COP elettrico del sistema in ogni condizione di funzionamento.

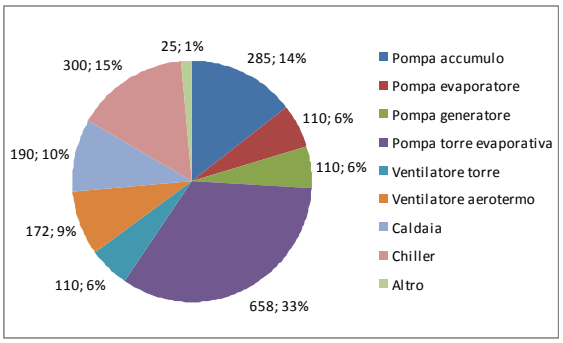


Figura 180. Distribuzione delle potenze elettriche dei componenti di impianto

Il diagramma in Figura 181 mostra un confronto fra le prestazioni misurate in regime stazionario, in termini di potenza erogata con tre diverse temperature di alimentazione al generatore e con due condizioni di funzionamento della torre evaporativa.

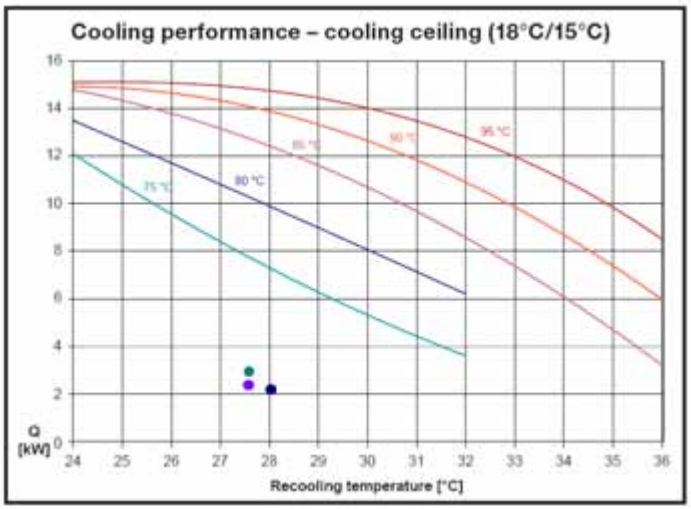


Figura 181. Confronto fra le prestazioni nominali della macchina e quelle relative ad alcune prove condotte a regime stazionario

La Tabella 68 mostra in dettaglio i risultati ottenuti e i relativi COP termico ed elettrico.

Tabella 68. Dati di prestazione media della macchina relativi ad alcune prove condotte a regime stazionario

		1^ prova	2^ prova	3^ prova
T in generatore	°C	77,3	79,1	84,4
T out evaporatore	°C	15,0	13,5	15,6
T out torre evap.	°C	27,6	28,0	27,6
P_generatore	kW	7,7	7,5	6,9
P_evaporatore	kW	2,9	2,2	2,7
P_torre evap.	kW	10,3	9,5	9,3
COP termico	-	0,38	0,30	0,40
COP elettrico	-	1,73	1,31	1,62

Si fa notare che il COP elettrico riportato in Tabella 68 è relativo all'intero impianto ovvero comprende l'assorbimento dovuto a tutti i componenti presenti ed operanti alla massima potenza. Come può notarsi le prestazioni della macchina in termini di capacità frigorifera sono molto lontane da quelle dichiarate dal costruttore a causa probabilmente di alcune anomalie riscontrate nel circuito dell'ammoniaca che ne riducono la potenza utile e ne limitano il funzionamento per l'eccessivo aumento della pressione nel circuito stesso provocando il frequente blocco della pompa della soluzione. Per questo motivo l'indagine sperimentale ha avuto come scopo principale non quello di ricostruire le curve caratteristiche ma di ottimizzare la calibratura del sistema e la logica di regolazione. Passando all'analisi dell'intero sistema, sono state eseguite delle prove in regime di funzionamento automatico, dalle quali sono emersi i seguenti aspetti salienti:

- il sistema di controllo è in grado di commutare efficacemente da una modalità di funzionamento all'altra sulla base della disponibilità di calore ai collettori e all'accumulo
- in condizioni di irraggiamento normale, il campo dei collettori solari è in grado di alimentare la macchina frigorifera con temperature comprese tra gli 80 °C e 95 °C
- la produzione della macchina frigorifera non risulta continua a causa dell'accensione e dello spegnimento della pompa della soluzione.

Sino a quando la temperatura di produzione dei collettori si mantiene al di sotto del valore desiderato (T = 80 °C), il sistema funziona in modalità 3 (caldaia), passando successivamente alla modalità 2 (accumulo) ed infine alla modalità 1 (solare diretto) quando la temperatura di produzione dei collettori raggiunge il valore di soglia. Si noti

inoltre come, in modalità solare diretto, la temperatura raggiunta dai collettori cresca ulteriormente, mostrando un sovrappiù di potenza disponibile rispetto a quella richiesta dal generatore della macchina.

Infine, per l'analisi numerica del sistema di solar cooling si è inoltre messo a punto un apposito modello di simulazione in ambiente Trnsys. Il modello, creato sulla base della specifica configurazione d'impianto e di tutte le caratteristiche dei componenti reali impiegati, ha permesso in una prima fase il dimensionamento del sistema e successivamente l'analisi numerica dello stesso, utile per un'ottimizzazione della logica e dei parametri di controllo.

Analisi sperimentale pannelli solari termici a tubi evacuati ad heat pipe

Il componente oggetto di questa linea di ricerca è il COLLETTORE SOLARE che dovrà essere accoppiato ad una macchina ad assorbimento ad acqua/ammoniaca progettata per le basse temperature di attivazione (95-100 °C). La campagna di prove sperimentali è stata effettuata presso l'*Istituto di Termofluidodinamica Energetica* del *C.R. Casaccia* utilizzando l'impianto sperimentale *T.O.S.C.A.* (T*hermal fluid dynamics Of Solar Cooling Apparatus*), progettato e realizzato ad hoc. Nella Figura 182 viene riportata una foto dell'impianto.

Figura 182. Impianto T.O.S.C.A. (Thermal fluid dynamics Of Solar Cooling Apparatus)

Per la campagna di prove sperimentali sono disponibili otto tubi di calore in rame geometricamente identici, ma aventi diverso grado di riempimento (*Filling Ratio*). Per ogni grado di riempimento si hanno a disposizione due tubi di calore identici per un totale di 16 tubi. Questi sono stati preventivamente pesati con un'apposita bilancia di precisione che ha fornito i risultati riportati in Tabella 69.

Tutti i tubi presentano un diametro interno ed esterno rispettivamente pari a 6 e 8 mm mentre la lunghezza complessiva ammonta a 1424 mm. I tubi sono di tipo *wickless*, cioè non presentano alcuna matrice porosa sulla superficie interna.

Tabella 69. Caratteristiche geometriche degli heat pipe

N° Heat Pipes	M_{acqua} (g)	*Filling Ratio*	*Peso (g)*
2	3	7,5%	212,3
2	4	10%	214,1
2	5	12,5%	215,0
2	6	15%	215,9
2	8	20%	218,0
2	10	25%	220,1
2	15	37,5%	225,0
2	20	50%	230,7

L'accoppiamento tra il tubo di calore ed il circuito refrigerante è stato realizzato attraverso un raccordo a T in ottone (avente un diametro interno pari a 12 mm) ed una tenuta in gomma siliconica sulla quale fa presa un dado.

Risultati sperimentali

Sono state effettuate una serie di prove sperimentali per valutare della variazione del grado di riempimento, della potenza fornita all'heat pipe e della portata di refrigerante nel collettore sul comportamento termico dell'heat pipe.

Studio del grado di riempimento

Tutte le prove sono state realizzate per un angolo d'inclinazione dell'heat pipe di 45°. Le prove sperimentali sono state condotte a due valori di potenza, 70 e 155 W. Per le prove condotte a potenza termica di 70 W, i valori del coefficiente di scambio termico all'evaporatore (h_e) variano da un minimo di 407,3 W/(m^2·K) in corrispondenza del riempimento con 20 g di acqua a un massimo di 3452,3 W/(m^2·K) per il riempimento di 3 g. Per i riempimenti intermedi il valore di h_e oscillerà tra valori di circa 1000 e 2000 W/(m^2·K).

Per una potenza di 155 W questa tendenza subisce delle sensibili modifiche. Il valore minimo del coefficiente di scambio termico all'evaporatore, 3980,5 W/(m^2·K), si rileva per il riempimento di 10 g mentre il valore massimo, 8588 W/(m^2·K), si ha nel caso di tubo riempito con 15 g di acqua.

Analizzando invece i valori del coefficiente di scambio termico al condensatore (h_c) si nota come ad eccezione dei riempimenti di 5 e 10 g, si ha un andamento mediamente decrescente di h_c per entrambe le serie di prove eseguite a diversa potenza. Il valore minimo di tale coefficiente è stato riscontrato per il riempimento massimo pari a 20 g sia a 70 W che a 155 W (rispettivamente 4488 W/(m^2·K) e 7374 W/(m^2·K)).

L'heat pipe con una quantità di liquido al suo interno pari a 5 g risulta avere il valore più elevato del coefficiente di scambio termico al condensatore per entrambi i livelli della potenza di riferimento. Il valore di h_c calcolato a partire dai dati sperimentali per la potenza termica di 70 W è pari a 11705 W/(m^2·K), quasi il doppio dei valori riscontrati per i riempimenti ad esso contigui. Analogamente si ha per la prova condotta fornendo una potenza termica di 155 W in cui il valore del coefficiente di scambio termico al condensatore, pari a 22043 W/(m^2·K), è maggiore dell'ordine di 1,4-1,5 volte i valori calcolati per gli altri riempimenti.

Il contributo alla resistenza termica totale è dato quasi esclusivamente dalla resistenza termica al condensatore.

All'aumentare della potenza termica fornita si rileva una riduzione dei valori della resistenza termica. La curva che collega i valori della R_t mostra lo stesso andamento al variare dei riempimenti, essendo semplicemente traslata verso il basso per il valore maggiore della potenza termica fornita.

Studio dell'effetto della potenza termica fornita

Il valore di h_e è crescente all'aumentare della potenza termica fornita, con andamento prossimo a quello lineare (Figura 183). Similmente il coefficiente di scambio termico al condensatore cresce all'aumentare della potenza termica mostrando un andamento quasi perfettamente lineare. L'andamento assunto dalla resistenza termica totale segue quello di una iperbole (Figura 184).

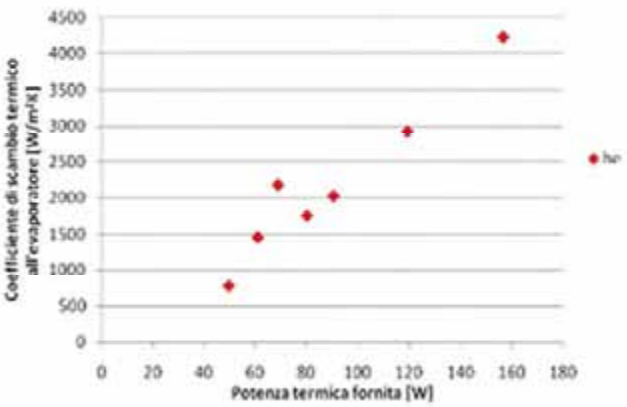


Figura 183. Coefficiente di scambio termico all'evaporatore vs potenza termica fornita

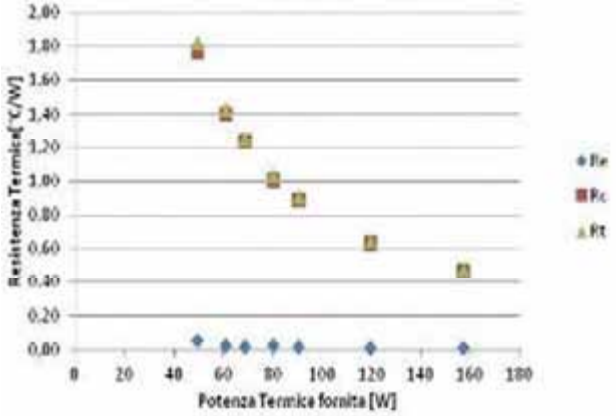


Figura 184. Resistenze termiche all'evaporatore, al condensatore e totale vs potenza termica fornita

Studio dell'effetto della portata di fluido refrigerante

Le prove sono state eseguite sul tubo riempito con 8 g. Mantenendo costante a 70 W il valore della potenza termica si è proceduto a variare la portata dell'acqua nel circuito secondario fra 3,0 e 8,5 kg/h. I valori dei coefficienti di scambio termico calcolati per il tratto di evaporatore e condensatore, non hanno un andamento regolare in funzione della portata di refrigerante (Figura 185 e Figura 186). Il coefficiente h_e sembra avere un comportamento oscillante attorno ad un valore prossimo ai 2000 W/(m^2·K).

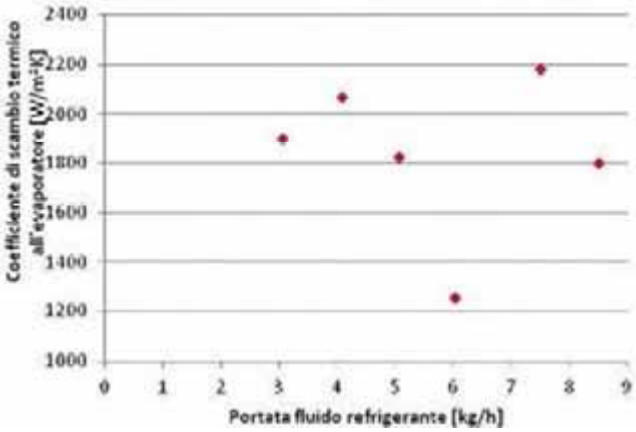


Figura 185. Coefficiente di scambio termico all'evaporatore in funzione della portata di fluido refrigerante

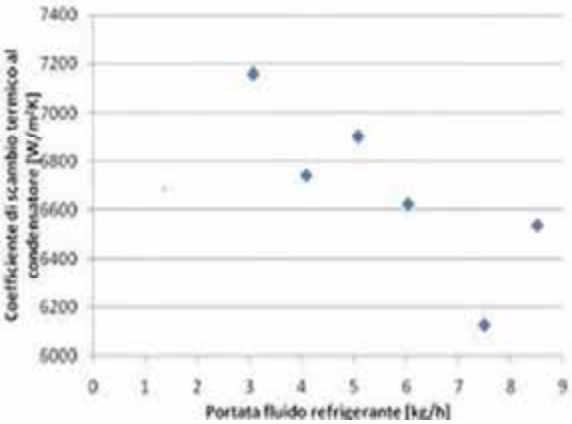


Figura 186. Coefficiente di scambio termico al condensatore in funzione della portata di fluido refrigerante

Il coefficiente di scambio termico al condensatore h_c decresce all'aumentare della portata di refrigerante da un valore massimo di 7160 W/(m^2·K) a un minimo di 6125 W/(m^2·K).

Infine la resistenza termica totale dell'heat pipe non varia di molto al crescere della portata di fluido refrigerante. Grazie alle prove sperimentali condotte è stato possibile valutare i valori dei coefficienti di scambio termico e della resistenza termica totale di tale dispositivo in funzione dei parametri variati. Sono state provate numerose correlazione per predire lo scambio termico sia nella sezione evaporativa che in quella condensante. Per l'evaporatore la migliore è stata quella sviluppata da Rohsenow che permette di ottenere un RMS error pari al 22,8%.

Per il condensatore nessuna correlazione trovata in letteratura è risultata soddisfacente, così che abbiamo proposto una correlazione in forma adimensionale basata sui nostri dati. Diverse correlazioni sono state usate per predire i valori del coefficiente di scambio termico, rendendo tuttavia necessario la ricerca di un modello predittivo empirico che ben stimi i dati sperimentali ottenuti. In riferimento all'evaporatore, le predizioni più accurate del coefficiente di scambio termico si sono ottenute con la correlazione di Rohsenow, che ha permesso di ottenere un RMS pari al 22,8 %. Le stime del coefficiente di scambio termico al condensatore ottenute dalle correlazioni presenti in letteratura non sono state soddisfacenti se non per alcuni livelli di potenza termica e grado di riempimento. Partendo dai dati sperimentali in possesso, è stata sviluppata una correlazione empirica capace di stimare i valori del coefficiente di scambio termico al condensatore per tutte le prove effettuate con un RMS del 36,04 %.

Monitoraggio impianto di solar heating and cooling a servizio dell'edificio F-51

L'attività oggetto del tema di ricerca è un completamento delle attività precedenti, in cui alcuni problemi tecnici e realizzativi non avevano permesso il monitoraggio invernale dell'impianto che quindi è stato portato avanti durante la stagione invernale 2010-2011.

Nel funzionamento invernale, per produrre il riscaldamento necessario all'utenza, non è stata utilizzata la macchina ad assorbimento e l'acqua calda prodotta dai pannelli solari e dalla caldaia è stata trasmessa direttamente al sistema di fan coils che servono l'edificio F-51. Dati dettagliati della configurazione impiantistica adottata sono riportati nei specifici report tecnici.

La filosofia dell'impianto prevede che i pannelli solari forniscano sempre tutta l'energia possibile in maniera da sfruttare al massimo la fonte rinnovabile, l'utilizzo della caldaia è previsto solo in integrazione quando i pannelli solari non riescono a fornire il calore necessario all'acqua da mandare all'utenza.

I due serbatoi lavorano in parallelo, i pannelli prima riscaldano l'acqua del serbatoio primario S1 e poi quella del secondario S2: quando la differenza di temperatura fra il fluido all'uscita dei pannelli e quella nel serbatoio S1 supera il valore deciso (5 °C) la pompa P2 si aziona e si comincia a riscaldare l'acqua (Figura 187).

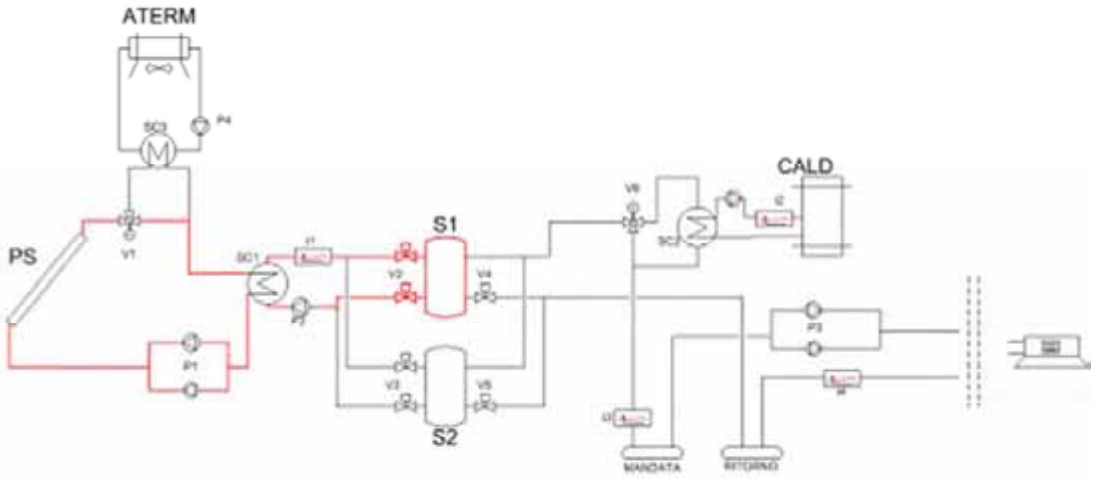


Figura 187. Riscaldamento acqua serbatoio S1

Il circuito dei pannelli deve sempre essere attivo per evitare problemi di surriscaldamento, mentre, come detto, il circuito a valle viene attivato solo nel caso che si possa riscaldare l'acqua in S1. Se l'energia prodotta dai pannelli è molta e porta al limite la temperatura nel serbatoio (è un valore a discrezione dell'impiantista: nel corso del monitoraggio condotto questo parametro è stato cambiato varie volte), viene chiuso il gruppo valvole V2 e si apre il gruppo V3 in maniera da riscaldare il secondo serbatoio. Nel caso in cui l'irraggiamento sia molto elevato e l'utenza non richieda potenze eccessive si possono raggiungere temperature all'uscita dei pannelli troppo elevate e difficili da gestire (questa situazione si era verificata anche nella simulazione): in questo caso è previsto un sistema di dissipazione del calore con un aerotermo che permette di diminuire la temperatura del fluido prima di mandarlo a SC1: quando la temperatura in questione raggiunge i 95°C si attiva la pompa P4 e la valvola V1 devia il flusso verso SC3. In Figura 188 è rappresentata questa situazione operativa.

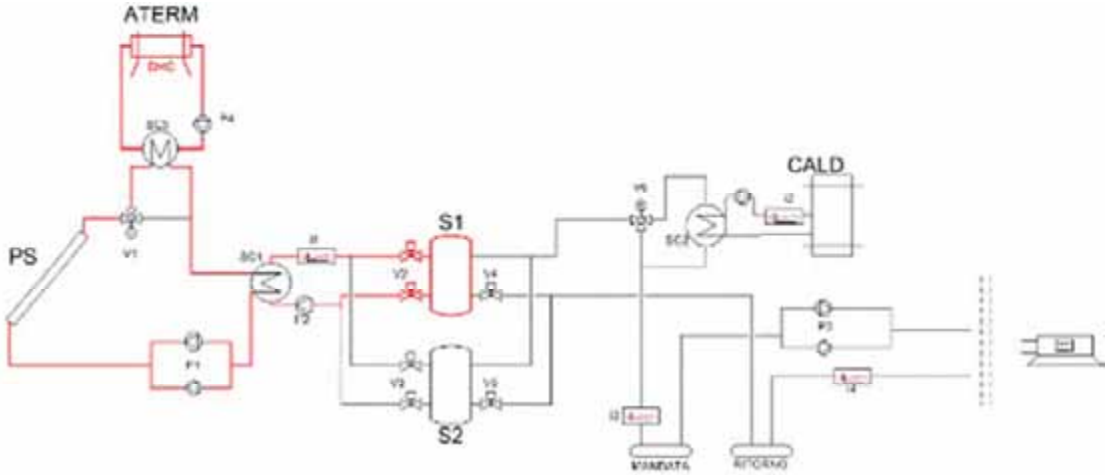


Figura 188. Condizione di funzionamento dell'aerotermo

Quando vi è richiesta da parte dell'utenza come detto, vi sono due possibilità di servizio: o si utilizza direttamente l'acqua accumulata nei serbatoi o si utilizza la caldaia per l'integrazione. Quando la temperatura in uno dei due serbatoi è uguale al valore fissato (è un grado di libertà del sistema, durante il funzionamento è stato variato più volte, partendo da 50°C per abbassarlo fino a 40°C) la valvola V6 esclude la caldaia e invia in mandata l'acqua dei serbatoi per mezzo delle valvole V4 o V5 secondo il serbatoio che si vuole utilizzare. In Figura 189 è rappresentata questa situazione operativa.

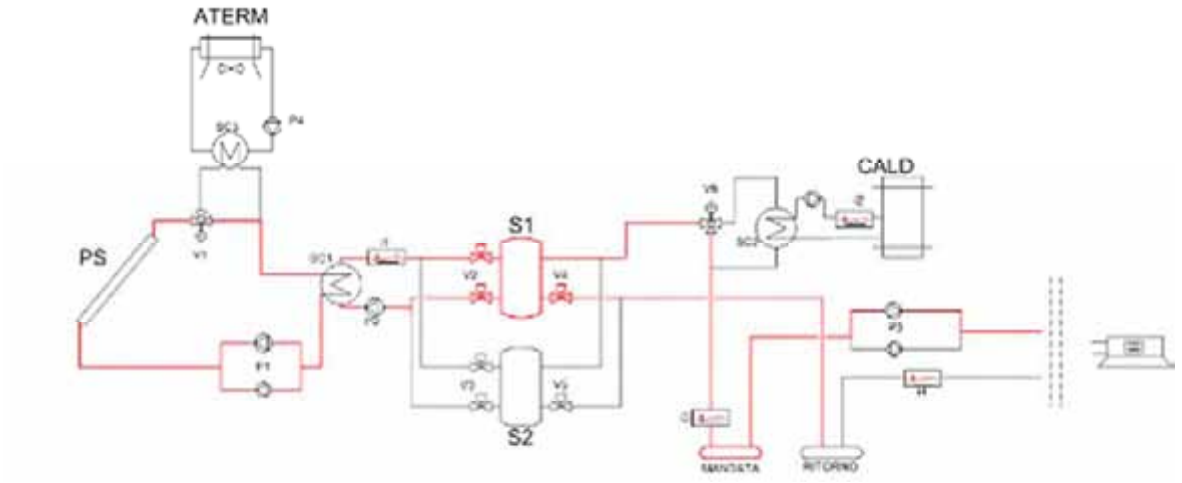


Figura 189. Trasmissione all'utenza dell'acqua accumulata in S1

Il gruppo di pompaggio P3 provvede alla circolazione del fluido e al raggiungimento dei fan coils. Come si può intuire, il funzionamento dei due circuiti solare e dell'utenza è indipendente e determinato solo dalle differenze di temperature che l'impiantista può decidere secondo l'ottica che ritiene più adeguata: questa versatilità di impianto è chiaramente data dall'utilizzo dei due serbatoi.

Nel caso che i collettori non riescano a fornire la potenza necessaria e l'accumulo si raffreddi troppo deve intervenire la caldaia o come integrazione o a completa sostituzione. In questo caso vengono attivati i flussi termici e di massa rappresentati in Figura 190: la valvola V6 inserisce la caldaia, viene accesa quest'ultima e insieme anche la pompa P2 e si provvede a servire l'utenza.

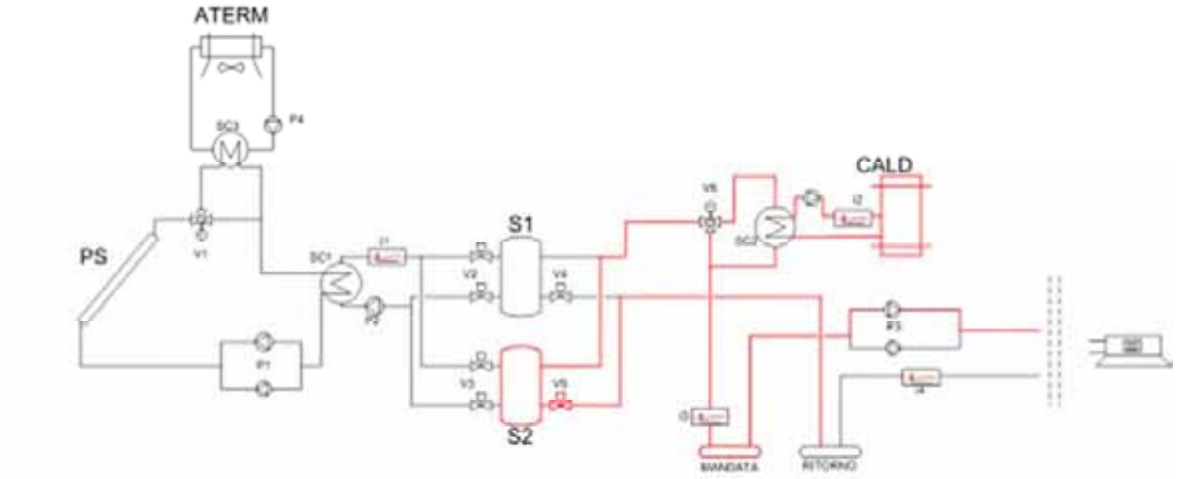


Figura 190. Configurazione d'impianto con caldaia attivata

Come si vede, su consiglio della casa produttrice dei pannelli e dei serbatoi, quando si utilizza la caldaia è comunque previsto un passaggio in un serbatoio. Questa operazione presenta, dal punto dell'efficienza dell'impianto solare, qualche perplessità che merita altri approfondimenti: l'energia prodotta non dovrebbe essere accumulata ma utilizzata direttamente, lasciando così a disposizione dei pannelli il più ampio accumulo possibile.

Considerazioni generali e note sul monitoraggio

Nel corso della campagna l'idea fondamentale è stata prima di tutto quella di verificare il corretto funzionamento dell'impianto, di denotare quali potevano essere le problematiche e anche i pregi: tutto questo è venuto prima dell'acquisizione dei dati e delle considerazioni impiantistiche possibili. Il primo obiettivo, dunque, è stato quello di valutare l'affidabilità, la versatilità e in generale la fattibilità di una soluzione così particolare come questa tipologia di impianto solar cooling. Il secondo obiettivo è stato invece quello di analizzare la bontà dell'impianto e la sua efficienza ma anche quello di identificare quali fossero le possibilità di azione dunque i gradi di libertà nella progettazione e nella fase operativa a disposizione dell'impiantista che permettessero di migliorare l'efficienza.

L'accoppiamento tra energia solare e normale impianto di riscaldamento è spesso fatto senza considerare nella globalità l'impianto finale e ciò va ad inficiare i risultati in termini di efficienza energetica e ritorno economico della

spesa. Si sono utilizzati in particolare i vari contacalorie situati in vari punti dell'impianto e si è utilizzato come server un computer posizionato nella sala caldaia con installato il software DESIGO: questo programma, oltre a gestire tutta l'automazione dell'impianto, ha permesso l'acquisizione dei dati in maniera molto semplice, ottenendo alla fine dei pratici file EXCEL su cui poi si è proceduto all'analisi. Attraverso questi contacalorie sono stati quindi acquisiti dei dati da cui estrapolare considerazioni sull'ottimale conduzione di tutto il sistema e su eventuali migliorie da apportare allo stesso.

Nel perseguire questi obiettivi si è comunque sempre tenuto presente che l'impianto serviva un'utenza reale che richiedeva un certo comfort: la prova migliore dell'impianto è sempre stata la verifica del benessere delle persone che vivono all'interno dell'edificio ogni giorno. Durante il periodo di cinque mesi di controllo dell'impianto (novembre 2010-marzo 2011) si sono verificati alcuni inevitabili inconvenienti, soprattutto nella campagna di misura, e sono stati variati leggermente alcuni parametri per valutarne l'influenza sul processo. Sono stati oggetto d'interesse soprattutto i valori di set della temperatura massima d'accumulo ai serbatoi e la temperatura minima di mandata ai fan coils: per la seconda, in particolare, si è verificato che l'impianto di distribuzione era leggermente sovradimensionato e si è deciso dunque di abbassare gradualmente la temperatura di mandata.

I risultati sperimentali

Per prima cosa sono riportati i risultati ottenuti calcolando il rendimento dell'impianto solare installato (Tabella 70): si considera il rapporto tra l'energia termica che i pannelli hanno ceduto all'acqua dei serbatoi e l'irraggiamento totale che ha raggiunto i pannelli (Figura 191). Come già detto nelle note, i dati fanno riferimento solamente al periodo in cui ha funzionato la cella per la misurazione dell'irraggiamento.

Tabella 70. Rendimento dell'impianto solare

	irraggiamento [kWh]	energia prodotta [kWh]	rendimento imp. solare [%]
dal 18/10 al 31/10	5031	2040	40,55
dal 1/11 al 31/11	7231	2180	30,15
dal 1/12 al 6/12	1065	250	23,47
TOTALE	13327	4470	33,54

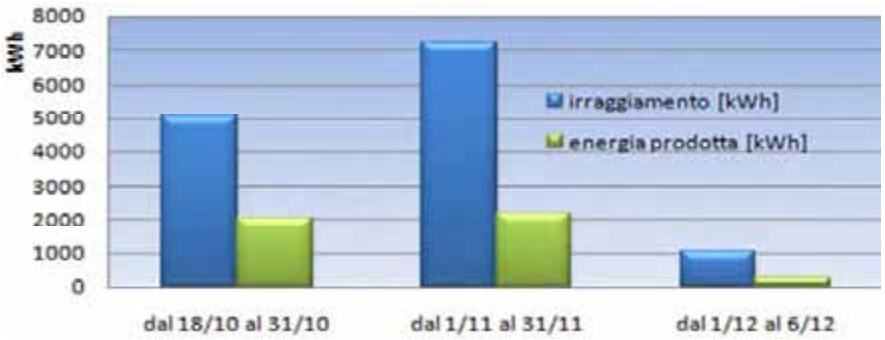


Figura 191. Confronto tra energia prodotta e irraggiamento

Nonostante i pannelli abbiano un rendimento nominale intorno al 60%, lo scarso irraggiamento e la presenza dello scambiatore (incluso nel rendimento calcolato) e dei problemi di accumulo (ovvero può accadere che i pannelli lavorino ma che non venga accumulato calore perché non si raggiunge la temperatura giusta) abbassano di molto l'efficienza dell'intero sistema solare.

Anche con queste problematiche l'efficienza del sistema si mantiene su valori molto buoni in assoluto e sicuramente molto più alti di molte altre rinnovabili. Questo buon funzionamento dell'impianto solare si riscontra anche considerando i risultati di tutto il sistema di riscaldamento installato. In tutta la stagione invernale l'energia solare captata dai pannelli ha provveduto al riscaldamento per il 40%, ottenendo punte sorprendenti nei mesi di febbraio e marzo del 50%. Il dato peggiore si verifica a dicembre (22%), quando i pannelli riescono a produrre lo stesso che a novembre, ma la richiesta mensile da parte dell'utenza è la più alta di tutto il periodo. A febbraio e marzo invece l'ottima frazione solare si ottiene soprattutto grazie all'aumento importante di produzione da parte dei pannelli mentre l'utenza mantiene piuttosto stabile la sua richiesta nel periodo.

Il programma di monitoraggio invernale ha consentito di acquisire una notevole mole di dati che ha evidenziato il positivo impatto del sistema di solar cooling sul fabbisogno energetico richiesto per la climatizzazione invernale dell'edificio F-51. In particolare, l'impianto di solar cooling è riuscito a coprire fino al 50% del fabbisogno energetico richiesto nei mesi di febbraio e marzo.

I dati acquisiti hanno consentito anche di valutare l'influenza di alcuni parametri sull'efficienza del sistema, come ad esempio la temperatura di mandata ai fan-coils. A questo proposito, si deve notare che, abbassando la temperatura di mandata, si riesce ad utilizzare di più l'energia solare perché aumenta il range di temperature a cui può essere prelevata acqua dai serbatoi e quindi si risparmia sull'uso della caldaia; d'altro canto per poter mantenere le condizioni di benessere all'interno dell'edificio si deve progettare un impianto di distribuzione leggermente sovradimensionato nelle superfici di scambio. È questa una classica situazione in cui è possibile incontrare un ottimo economico, che possa diminuire il tempo di ritorno economico dell'impianto, che nella pratica realizzativa e nella ricerca sull'argomento viene spesso trascurato.

Messa in funzione e analisi sperimentale del prototipo di macchina elioassistita

L'attività oggetto del tema di ricerca ha come obiettivo quello di verificare le prestazioni stagionali ed il range di funzionamento di questo tipo di applicazioni, oltre a validare il metodo di simulazione utilizzato per la progettazione preliminare.

Schema di impianto e funzionamento della facility

Nella Figura 192 è riportato lo schema di impianto realizzato e messo in funzione presso il centro ricerche della Casaccia. Sono indicati i componenti principali, ovvero:

- PS, i pannelli solari posti all'esterno dell'edificio che contiene la facility;
- ATERM, aerotermo per la dissipazione del calore;
- S-1, serbatoio per l'accumulo ;
- P-CAL, pompa di calore;
- le due principali pompe di circolazione, P1 e P2;
- le due valvole a tre vie necessarie per la regolazione di impianto, V-14 e V-15.

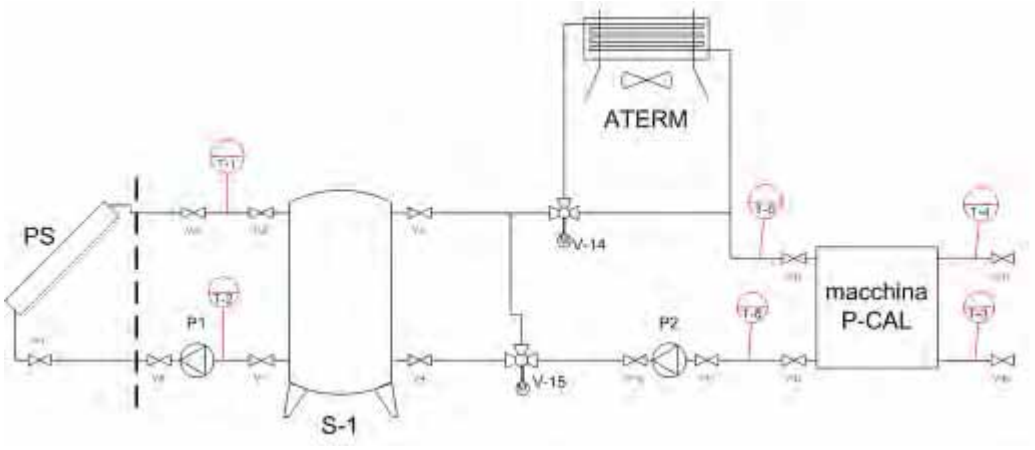


Figura 192. Schema impianto

In rosso sono infine evidenziate le posizioni e la nomenclatura dei termostati utilizzati per la campagna di monitoraggio. A valle della pompa di calore è presente un rubinetto (non rappresentato nello schema) che simula l'utenza e che permette di regolare la temperatura di lavoro della macchina e il suo ritorno. A seconda che all'impianto sia richiesto riscaldamento o raffreddamento, la modalità di funzionamento cambia e con essa varia la maniera di utilizzare i diversi componenti.

Funzionamento invernale

In questa fase sono utilizzati i pannelli per riscaldare l'acqua da mandare al secondario della pompa di calore, in maniera che quest'ultima mantenga rendimenti elevati per maggior tempo: in questa modalità di funzionamento sono dunque utilizzati i pannelli accoppiati con il serbatoio mentre è escluso dal percorso dei flussi termici e di massa l'aerotermo. Durante il periodo di accensione dell'impianto l'utenza simulata riceve acqua calda a 45 °C e la restituisce a 40 °C e queste due temperature sono monitorate attraverso i due termostati T-3 e T-4.

I pannelli ricevono acqua dal serbatoio e la riscaldano il più possibile prima di rinviarla all'accumulo, nel frattempo l'acqua del serbatoio vene prelevata per essere inviata al secondario della macchina ed essere utilizzata nell'evaporatore: la pompa dei pannelli viene azionata da un regolatore solo quando la differenza di temperatura fra il fondo del serbatoio e l'uscita dei pannelli è superiore a 5 °C.

La macchina utilizzata prevede come temperatura massima di mandata al secondario 20 °C, quando l'acqua prelevata dal serbatoio supera questo limite entra in funzione in maniera automatica il sistema di gestione che

aziona la valvola di regolazione V-15 che opera il miscelamento fra il flusso di mandata e ritorno con lo scopo di abbassare la temperatura al livello voluto: più è necessario abbassare la temperatura più si apre la valvola quasi bypassando il serbatoio. Nel caso poi che questa miscelazione non basti, si aziona la valvola V-14 che invia l'acqua all'aerotermo che provvede al raffreddamento. Le due temperature di ingresso e uscita dall'evaporatore sono monitorate attraverso T-5 e T-6.

È da notare che la filosofia di questa regolazione è sì quella di mantenere la temperatura sotto il limite di 20°C ma anche quello di cercare di tenerla il più vicino possibile a quest'ultimo valore in maniera da ottenere le migliori prestazioni. La macchina, per quanto riguarda il secondario, prevede anche un limite sulla temperatura minima: non può essere servita da acqua ad una temperatura inferiore a -2 °C altrimenti entra in blocco.

Funzionamento estivo

In questa modalità, l'utenza fittizia in questo caso riceve acqua fredda a 7 °C e, attraverso il rubinetto di regolazione che riscalda questo flusso, la restituisce in mandata alla macchina a circa 10 °C. La pompa di calore deve cedere calore al condensatore: a più bassa temperatura lo cede migliori saranno le sue prestazioni: il ri-raffreddamento del fluido che è utilizzato per questo scopo è operato dall'aerotermo. I pannelli e il serbatoio nella fase del raffreddamento estivo non sono utilizzati, la pompa è disattivata e si aziona la valvola a tre vie posta a valle del serbatoio che impedisce il passaggio dell'acqua.

Quando si passa a questa fase estiva, la macchina automaticamente cambia il circuito interno con un sistema di valvole e rende disponibile sul secondario lo scambiatore del condensatore e utilizza invece l'evaporatore per servire l'utenza. Come si può immaginare anche in questo caso la prestazione della macchina è influenzata dalla temperatura esterna ambiente in quanto è proprio utilizzando quest'ultima che l'aerotermo provvede al raffreddamento dell'acqua da inviare al condensatore: più alta sarà al temperatura dell'aria esterna peggiore sarà lo scambio termico e quindi di conseguenza saranno più alte le temperatura di mandata al secondario della macchina.

In realtà, per questa operazione, si è pensato anche di utilizzare i collettori solari: coprendoli con un telo ombreggiante si è pensato di sfruttare le loro capacità di scambio di calore per convezione con l'ambiente. Se si esclude questa particolare possibilità di utilizzo dei pannelli, il campo solare e il serbatoio rimangono inutilizzati durante questa fase di funzionamento e sono esclusi con la valvola tre vie posta a valle del serbatoio.

Note e considerazioni sulla campagna di monitoraggio

L'obiettivo principale della campagna è stato quello di verificare sia il corretto funzionamento dell'impianto che la stima del miglioramento delle prestazioni dell'intero sistema con l'utilizzo del gruppo di collettori solari per il riscaldamento dell'acqua in mandata all'evaporatore della pompa di calore.

Per il controllo e l'analisi del funzionamento dell'impianto è stato installato un sistema di acquisizione dati che permette la registrazione dell'andamento di molte grandezze, alcune in maniera sperimentale diretta, altre in maniera derivata. Ognuna di queste grandezze è stata acquisita (o calcolata automaticamente) attraverso una piattaforma LABVIEW e quindi registrata su un computer server. Attraverso l'analisi di queste grandezze si è cercato di valutare l'effetto benefico dei pannelli solari utilizzati sul comportamento della macchina: dalle curve caratteristiche della pompa di calore erano attesi sensibili miglioramenti sul COP.

In linea generale si può dire che durante le varie fasi l'impianto si è comportato piuttosto bene permettendo l'acquisizione di molti dati ma comunque si sono riscontrati alcuni problemi soprattutto nella gestione dell'impianto. Fondamentalmente in fase invernale si sono riscontrati alcuni problemi nell'utilizzo della macchina:

- la macchina è andata diverse volte in blocco per le temperature eccessivamente basse dell'acqua fornita al secondario e questi blocchi proseguivano per periodi molto lunghi, senza consentire all'operatore lo sblocco della macchina nonostante il ripristino di condizioni di funzionamento normali;
- in questa fase la macchina ha mostrato un rendimento inferiore rispetto alle aspettative, dato poi confermato nell'analisi dei dati.

Per sopperire a questi problemi si è proceduto al cambio della pompa di calore passando ad un modello migliore e più affidabile: è stata provata in assetto invernale e ha mostrato i risultati sperati.

Risultati generali

Si è cercato principalmente di mettere in risalto l'aspetto sicuramente più interessante, ovvero la correlazione fra la temperatura di mandata all'evaporatore della pompa di calore e il COP che quest'ultima riesce ad ottenere.

Ottenere una temperatura di mandata dell'acqua al secondario della macchina elevata per molto tempo permette di ottenere grossi vantaggi sull'efficienza del sistema e un certo risparmio energetico: anche con i pannelli di scarsa qualità utilizzati si riescono a raggiungere queste temperature più alte con una certa continuità.

Con i test condotti nel periodo estivo, data la maggiore affidabilità della pompa di calore installata, è stato possibile investigare anche la possibilità di utilizzare i pannelli solari (che d'estate resterebbero inutilizzati) come dissipatori del calore che la pompa di calore produce al condensatore: coprendoli con del telo ombreggiante, si è verificato se fosse possibile sfruttare il loro scarso isolamento e la ampia superficie di scambio per far cedere loro calore all'ambiente. È stato quindi ordinato del telo ombreggiante e si è proceduto alla fase d'istallazione e di esecuzione della fase di sperimentazione. L'analisi dei dati acquisiti consentirà la valutazione dell'opportunità o meno di sfruttare i collettori solari come dissipatori di calore nel periodo di funzionamento estivo del sistema.

Di concerto con lo sviluppo di questa fase sperimentale, si procederà anche al completamento dei modelli matematici su TRNSYS, già ben avviati, e quindi al confronto con la realtà della sperimentazione. Si cercherà in particolare di verificare la fattibilità della soluzione prima detta dei pannelli usati come dissipatori anche sul programma e quindi, cosi facendo, di comprovare la bontà del modello che si è sviluppato riguardo ai pannelli.

La fase di analisi dei dati consentirà di valutare la fattibilità dell'impianto nella maniera più ampia possibile e di individuare i parametri che maggiormente influenzano la progettazione e l'integrazione della pompa di calore ai collettori solari e l'ottimale sfruttamento della risorsa solare nell'esercizio estivo ed invernale. L'analisi dei dati consentirà infine di raggiungere l'obiettivo originario del progetto ossia il confronto tra questa soluzione progettuale e quelle che utilizzano sonde geotermiche per la fornitura di calore al secondario della pompa di calore.

Solar heating and cooling innovativo su Edificio F-92

Negli ultimi anni diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico sono state incentrate sullo studio di processi per il condizionamento degli edifici basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (solar cooling). L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza del picco di domanda con il periodo di maggiore disponibilità dell' energia solare. Attualmente esistono diverse componenti tecnologiche per la realizzazione di sistemi di raffrescamento solare, tuttavia non esiste ancora una soluzione tecnologica integrata di facile applicazione, con il risultato che gli impianti di questo tipo sono ancora per lo più di tipo sperimentale e come tali molto costosi e poco competitivi.

L'attività oggetto del tema di ricerca ha come obiettivo lo sviluppo di una facility per la caratterizzazione di sistemi innovativi di solar heating and cooling integrati in un edificio altamente strumentato. Tale sistema è stato realizzato con una pompa di calore ad assorbimento reversibile (estate-inverno) installata sull'edificio F-92 del C.R. ENEA di Casaccia.

La pompa di calore adottata sarà in grado di utilizzare l'acqua calda prodotta dai pannelli solari durante il periodo invernale (acqua a bassa temperatura) quale sorgente per l'evaporatore che quindi verrà riscaldato da una corrente a bassa temperatura (~20 °C). L'innovazione consiste quindi nel realizzare un impianto di solar heating and cooling che utilizzi una pompa di calore ad assorbimento di tipo reversibile con evaporatore elio assistito.

Progettazione dell'impianto

La centrale termo frigorifera sperimentale realizzata è in grado di assicurare il riscaldamento ed il raffrescamento degli ambienti dell'Edificio F-92 che si sviluppa su tre piani ed ha una superficie complessiva di circa 230 m^2. Nel piano seminterrato è stata realizzata una sottocentrale di edificio che ha lo scopo di ricevere il fluido termovettore dal termodotto esterno e di smistarlo ai vari circuiti che servono l'intero edificio.

Per consentire una maggiore facilità di "modifica" della facility sperimentale, è stato deciso di realizzare la centrale termo frigorifera all'esterno dell'edificio, su una piazzola dedicata. Questa scelta ha reso necessario la realizzazione di un termodotto, di un gasdotto e di un cavidotto di collegamento tra la centrale di produzione e l'edificio da servire. Il campo solare è stato realizzato in prossimità della centrale utilizzando dei pannelli solari termici a tubi evacuati

Componenti principali della centrale termofrigorifera

I principali componenti impiegati nel progetto della facility di prova sono:

- Pompa di calore ad assorbimento di tipo reversibile;
- Torre evaporativa abbinata alla pompa di calore;
- Gruppi di pompaggio;
- Valvole deviatrici e miscelatrici a tre vie;

- Dry-cooler abbinato al campo solare per lo smaltimento del calore in eccesso;
- Serbatoi inerziali;
- Scambiatori di calore a piastre;
- Caldaia integrativa ad alta temperatura;
- Quadro elettrico di potenza e controllo;
- Sensoristica e strumentazione dedicata al monitoraggio ed alla regolazione delle principali grandezze controllate (temperature, umidità, ecc.).

Il componente più innovativo dell'impianto sperimentale è costituito dalla pompa di calore ad assorbimento ad acqua-ammoniaca (Figura 193). La macchina è un prototipo ENEA sviluppato nella precedente annualità.
Particolare cura è stata posta nella progettazione del sistema automatico di monitoraggio, gestione e controllo dell'impianto di climatizzazione. Il sistema, avvalendosi della strumentazione installata in corrispondenza dei punti più importanti dell'impianto, dovrà infatti garantire il raggiungimento delle condizioni climatiche desiderate nell'edificio di prova minimizzando i costi di gestione e di esercizio.

L'obiettivo di questo tema di ricerca è stato quello di realizzare la progettazione, la scelta dei componenti (meccanici, elettrici e del software di gestione) e l'istallazione di un impianto sperimentale di solar heating and cooling innovativo. Ultimato il montaggio di tutti i componenti si procederà ad avviare la fase di sperimentazione vera e propria, che dovrà fornire indicazioni sulle potenzialità del sistema nel condizionamento estivo ed invernale.

E' stata inoltre prevista la possibilità di sostituire la pompa di calore ad acqua – ammoniaca "prototipo ENEA" con una pompa di calore di tipo commerciale in modo da poterne comparare le prestazioni energetiche ed i vantaggi/svantaggi delle due configurazioni.

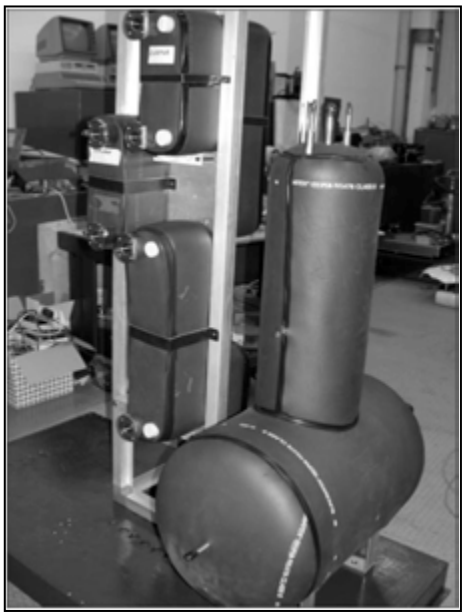


Figura 193. Pompa di calore H_2O-NH_3

Pompa di calore a CO_2 (R744)

L'attività oggetto del tema di ricerca ha come obiettivo l'analisi sperimentale di una pompa di calore che impiega come fluido refrigerante la CO_2 (R744) integrata in un impianto realizzato per la produzione di acqua calda e fredda da utilizzare per assolvere alle esigenze della climatizzazione estiva ed invernale. L'attività ha riguardato dapprima il dimensionamento dei vari componenti costituenti la pompa di calore, e, successivamente, la realizzazione di un prototipo ottimizzato installato a servizio di una facility che fornisce il riscaldamento ed il raffrescamento di un edificio sperimentale, altamente strumentato e con utenza simulata.

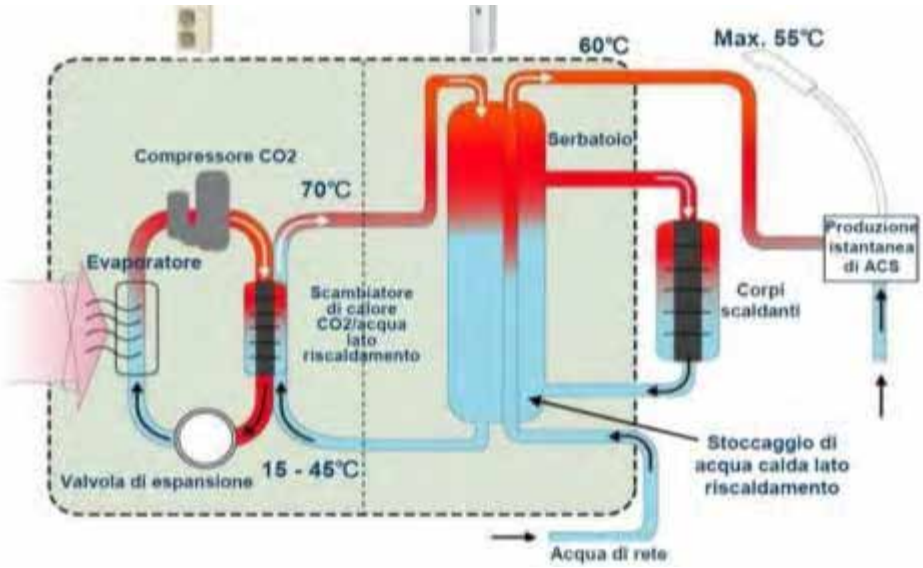


Figura 194. Schema di funzionamento pompa di calore a CO_2 della Sanyo

L'utilizzo della CO_2 come fluido refrigerante consente il funzionamento della macchina anche a temperature esterne prossime a -25°C e per questo sono specifiche per essere utilizzate in zone climatiche "rigide", dove le tradizionali pompe di calore hanno il problema dello sbrinamento delle batterie esterne. Il principio di funzionamento è indicato in Figura 194. L'acqua calda, prodotta al condensatore della pompa e stoccata in un serbatoio di accumulo, può essere utilizzata sia a fini del riscaldamento degli ambienti (per mezzo di corpi scaldanti ad elevata efficienza) che per produzione di acqua calda sanitaria (ACS). La produzione di acqua refrigerata avviene invece sul lato evaporatore della macchina: anche questo flusso termico, opportunamente gestito, può essere utilizzato per le esigenze di condizionamento estivo degli edifici residenziali.

L'ENEA ha sviluppato un programma di ricerca avente come obiettivo la realizzazione e la caratterizzazione di un sistema di climatizzazione invernale e condizionamento estivo innovativo, abbinato ad un prototipo di pompa di calore a CO_2. La sperimentazione avrà l'obiettivo di ottimizzare le condizioni operative di funzionamento (soprattutto in termini di rendimento) della pompa di calore e la gestione dei flussi termici, la definizione di componentistica efficiente ed affidabile ed infine il perfezionamento dei sistemi di controllo e supervisione.Inoltre, grazie alla versatilità dell'impianto sperimentale sarà possibile verificare l'attitudine della pompa di calore a CO_2 a funzionare in associazione ad un sistema di collettori solari, che, in linea teorica, dovrebbero consentire una riduzione dei consumi elettrici e un innalzamento del COP della macchina.

Impianto sperimentale ENEA

L'impianto è stato progettato e realizzato con l'obiettivo di produrre acqua calda e acqua fredda da utilizzarsi per coprire i fabbisogni termici legati alla climatizzazione annuale di un locale di prova appositamente strumentato. Nel funzionamento invernale, il sistema ha come obiettivo il raggiungimento di una temperatura di set di circa 55°C nel serbatoio di accumulo dell'acqua calda. Mentre il gas-cooler fornisce calore, all'evaporatore della pompa di calore è prodotta acqua "fredda" che è stoccata nel serbatoio di accumulo freddo. L'evaporatore è collegato a questo serbatoio attraverso un circuito ausiliario contenente una miscela di acqua e glicole.

L'acqua calda stoccata nel serbatoio e quella fredda sono avviate ad un sistema di collettori. In inverno, il fluido freddo, è reinviato al serbatoio di accumulo per mezzo di una valvola a tre vie deviatrice, mentre quello caldo contribuisce a mantenere l'aria trattata dalla UTA (Unità di trattamento aria, posta a servizio dell'ambiente da climatizzare) ad una temperatura di 20 °C. Nel funzionamento estivo, la condizione di stacco della macchina si ha quando è raggiunta una temperatura dell'acqua nel serbatoio di accumulo freddo di 7 °C.

I flussi "caldo" e "freddo" avviati ai collettori sono gestiti in questo caso in maniera diversa: parte del fluido freddo è avviato ai fan coils installati nel locale di prova; il rimanente fluido freddo e quello caldo sono avviati verso la UTA dove contribuiscono a mantenere la temperatura dell'aria di ricambio a circa 26°C. Nel periodo estivo, l'aria della UTA viene investita anche da parte del fluido caldo (la maggior parte viene rinviata all' accumulo caldo attraverso la valvola a tre vie), per garantire il giusto grado di umificazione dell'aria in mandata della macchina.

Componenti principali dell'impianto

I principali componenti impiegati nel progetto della facility di prova sono:

- Pompa di calore acqua-acqua a CO_2;
- Unità di trattamento aria (UTA);
- Locale container asservito all'impianto di climatizzazione.

La pompa di calore prodotta dall'ENEX costituisce il cuore dell'impianto sperimentale. È costituita da tre compressori disposti in parallelo, da tre scambiatori di calore ad alta temperatura (gas coolers, condensatori), di cui solo il primo scambia con l'acqua del circuito primario, da un organo di laminazione e da un evaporatore, che nel nostro caso scambia calore con la miscela di acqua e glicole. L'unità di trattamento aria (UTA) gestisce il ricambio d'aria dell'ambiente da climatizzare, garantendo anche il corretto valore di temperatura e di umidità dell'aria immessa nel locale da climatizzare.

Il riscaldamento dell'aria esterna, durante il periodo invernale, avviene in gran parte nel recuperatore rotativo (che lavora in ogni condizione con rendimento molto elevato, dell'ordine del 76%), a scapito dell'aria di ripresa dall'ambiente, e viene successivamente completato nella batteria calda (quella fredda in questo caso non lavora in quanto il flusso freddo è riinviato all'accumulo prima di arrivare alla batteria).

Anche durante il periodo invernale il recuperatore rotativo lavora con un rendimento molto elevato e raffredda l'aria da reintrodurre nell'ambiente: il flusso d'aria incontra poi la batteria fredda e quella calda (che assume in questo caso principalmente la funzione di regolazione dell'umidità e di stabilizzazione della temperatura), che portano l'aria alla temperatura di mandata di progetto. Il locale allestito per la sperimentazione è stato dotato di 4 ventilconvettori da 72 W ciascuno e di bocchette per il trattamento dell'aria da parte della UTA.

Particolare cura è stata posta nella progettazione del sistema automatico di monitoraggio, gestione e controllo dell'impianto di climatizzazione. Il sistema, avvalendosi della strumentazione installata in corrispondenza dei punti più importanti dell'impianto, dovrà infatti garantire il raggiungimento delle condizioni climatiche desiderate nel locale di prova minimizzando i costi di gestione e di esercizio.

La fase di sperimentazione sull'impianto dovrà fornire indicazioni sulle potenzialità del sistema nel condizionamento estivo ed invernale. A seguito di questa fase, si potranno testare ulteriori schemi impiantistici utilizzanti ad esempio un abbinamento con collettori solari per la produzione diretta di acqua calda oppure per l'ottimizzazione del rendimento della pompa di calore a CO_2 per mezzo di un collegamento dei collettori stessi con il fluido in ingresso all'evaporatore della pompa di calore.

Geodatabase open source dei Dati geo-litologici nazionali

A completamento di una azione già intrapresa nella precedente annualità, è stato reso accessibile via web il geodatabase Open Source dei Dati geo-litologici nazionali; il geodatabase è stato integrato con stratigrafie rappresentative di quattro aree scelte nelle città di Palermo, Napoli, Roma e Milano. Il WEB GIS rappresenta un importante strumento di informazione condivisa, a supporto della diffusione della tecnologia delle pompe di calore geotermiche. Le attività di studio e realizzazione del WEB G.I.S. si sono articolate secondo il seguente schema:

- Raccolta bibliografica relativa a tutti i progetti regionali realizzati nell'ambito della gestione delle risorse geotermiche a bassa entalpia
- Validazione della struttura G.I.S. prodotta nell'ambito del primo accordo di collaborazione per l'estendibilità del sistema coerentemente alla realtà geologica nazionale
- Definizione del modello generale di analisi finalizzato alla zonizzazione a scala regionale
- Progettazione e realizzazione di un sistema Web G.I.S. strutturato in modo tale da permettere l'interrogazione dei dati e la diffusione e condivisione dell'informazione
- Allestimento e messa in funzione di un server nel laboratorio di G.I.S. G.P.S. del Dip. di Scienze Geologiche dell'Università Roma 3 per un tempo limitato quantificabile in mesi sei dalla data di conclusione della presente attività, al fine di permettere all'E.N.E.A. la presentazione del prodotto.

A partire dalla data di consegna del presente rapporto tecnico e della configurazione del Viewer si procederà con il collaudo del sistema. Di seguito si descrivono le attività di progettazione e realizzazione del sistema Web G.I.S.

Progettazione e realizzazione del sistema web G.I.S. per la geotermia a bassa entalpia

Prima di arrivare allo sviluppo del WEB-GIS il seguente lavoro ha richiesto un trattamento del dato GIS prima in ambiente Desktop (ArcGis Desktop) e successivamente in ambiente Server (ArcGis Server).

Inizialmente tutti i dati GIS sono stati trattati con ArcGis Desktop 10. Sì è provveduto alla trasformazione delle Coordinate Geografiche da ED 50 zona 33N a WGS84, in quanto quest'ultimo è lo standard internazionale (OGC) per i servizi GIS pubblicati sul Web. I dati, una volta riproiettati, sono stati inseriti in un Personal Geodatabase, all'interno del quale sono state sviluppate 4 Relation Ship Class, in più è stata creata una Toolbox all'interno della quale sono stati inseriti tutti i modelli geotermici. I modelli sono stati sviluppati tramite Model Builder e ognuno esercita una funzione precisa sui dati del GeoDatabase. I modelli sono stati pubblicati come Geoprocessing Service in modalità Sincrona. Tutti i Servizi Gis creati rispettano le specifiche internazionali OGC, e di conseguenza sono utilizzabili su diversi Client Desktop e WEB in base alle loro Capabilities.

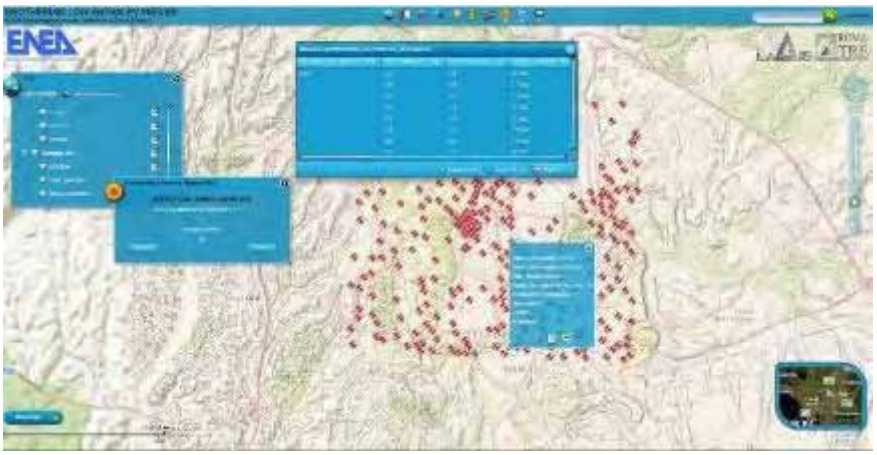


Figura 195. Esempio schermata sito WEB

Dopo questa fase di gestione e analisi del dato geografico si è passati alla realizzazione del WEB – GIS. All'interno del Viewer è caricata una lista di Map Service. Alcuni sviluppati dal Lab. GIS & GPS, altri caricati da Server esterni e appartenenti al CNR e all'ISPRA; ovviamente rispettando le proprietà intellettuali del dato (Figura 195). Sono presenti tutti gli strumenti di interrogazione di un GIS, ai quali sono associati strumenti di ricerca. In più sono state sviluppate tre categorie di strumenti che richiamano i Geoprocessing Service, permettendo così il lavoro di anali sulle caratteristiche geotermiche dei sondaggi.

Il portale allestito è visitabile all'indirizzo **http://www.litologia-geotermia.enea.it/**.

Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling

L'attività è stata focalizzerà sullo sviluppo di una facility per la caratterizzazione di componenti e sistemi destinati ad applicazioni di climatizzazione estiva ed invernale elio-assistite ed in particolare:

Sperimentazione e qualificazione di collettori solari a media temperatura

L'attività oggetto del tema di ricerca ha come obiettivo la sperimentazione e qualificazione di collettori solari a media temperatura utilizzanti diversi sistemi ottici per la concentrazione della radiazione solare (CPC, parabolici lineari, parabolici puntuali, a specchi di Fresnel). Una classificazione delle tecnologie che sfruttano l'energia solare può essere compiuta in base all'utilizzo della risorsa termica e quindi in base alle temperature di esercizio, come segue:

- Tecnologie a *bassa temperatura*, per la produzione di Acqua Calda Sanitaria o per il riscaldamento delle piscine (fino a 80 °C).
- Tecnologie a *media temperatura*,. utilizzate per la climatizzazione residenziale o per la produzione di calore per processi industriali (fino a 250 °C)
- Tecnologie ad alta temperatura, utilizzate per la produzione di energia elettrica (oltre 250 °C).

Finora la maggior parte delle applicazioni del solare termico sono incentrate principalmente sulla produzione di acqua calda e per il riscaldamento in utenze domestiche o per le piscine. L'uso termico dell'energia solare nei settori industriali è in questo momento non significativo rispetto alle applicazioni appena citate. L'utilizzo delle tecnologie solari in processi industriali a media o alta temperatura avviene solo su modesta scala ed ha una natura per lo più sperimentale. Questo nonostante il fabbisogno energetico del settore industriale, che nei paesi industrializzati rappresenta il 30% dell'intero fabbisogno nazionale, sia per un terzo di natura elettrica, e per il restante quantitativo di tipo termico, con richiesta di calore di processo a temperature al disotto di 250°C. Attualmente, il maggior impiego delle tecnologie solari a concentrazione è rivolto al settore della produzione dell'energia elettrica. In questo campo le temperature e le taglie sono sensibilmente maggiori rispetto a quelle richieste per le applicazioni a media temperatura. Da ciò si evince che la tecnologia sia "matura" per una sua più larga diffusione.

Il mercato dei sistemi solari a media temperatura

Il mercato di riferimento dei sistemi solari termici a media temperatura si identifica principalmente con le applicazioni relative al solar cooling ed alla produzione di calore di processo.

Stando ai dati dell'International Energy Agency (IEA), all'inizio del 2010 le installazioni commerciali (vale a dire non di natura sperimentale) di impianti di Solar Cooling censite nel mondo erano 288, per un totale di potenza frigorifera installata di 17,61 MW. Da tale censimento risulta che l'Italia detiene il 10% delle installazioni (28) per un totale di potenza frigorifera pari a 3,2 MW: si tratta principalmente di installazioni di medio-piccola dimensione con potenza media installata di 120 kW frigoriferi. Inoltre va sottolineato come tali installazioni riguardino soprattutto edifici adibiti ad ufficio, scuole, ospedali o edifici della pubblica amministrazione.

Il mercato dei piccoli impianti ad uso residenziale è pressoché inesistente: il limite della permeazione di tale mercato va ricercato nella tecnologia che ad oggi è economicamente competitiva solo con potenzialità medio alte, dell'ordine dei 70÷100 kW. Guardando il rovescio della medaglia, ci si rende facilmente conto invece del potenziale commerciale di tale tecnologia se il costo specifico degli impianti diventasse competitivo per potenzialità dell'ordine dei 10 kW in caso di un necessario sviluppo e progresso della tecnologia. Per sfruttare appieno il potenziale del solare termico in Italia, un ruolo fondamentale lo devono svolgere le applicazioni a medio-alta temperatura a integrazione di processi industriali. Il solare termico può infatti essere integrato a diversi processi industriali: tipicamente le applicazioni principali riguardano il riscaldamento dei fluidi di lavoro e la produzione di vapore ad alta temperatura.

Il settore che manifesta il più alto potenziale risulta essere quello alimentare, il cui calore è utilizzato soprattutto per i processi di sterilizzazione dei contenitori, la fermentazione dell'alcool, i processi di pastorizzazione e la

cottura dei cibi. Nel settore tessile si fa ampio uso di acqua a medio-basse temperature per i processi di tinteggiatura e lavaggio dei tessuti. Il solar cooling rappresenta la migliore soluzione per il problema energetico derivante dal cambiamento di costume della società moderna, che considera ormai la climatizzazione estiva una necessità. Utilizzare l'energia termica del sole per creare delle condizioni di benessere negli ambienti che proprio il calore rende inospitali, è intrinsecamente una soluzione virtuosa al problema del fabbisogno elettrico dovuto ai sistemi di condizionamento.

Classificazione dei sistemi a concentrazione

I sistemi solari a concentrazione sono utilizzati per la produzione di calore e/o elettricità: grazie all'utilizzo di molteplici specchi che appunto "concentrano" i raggi solari, si possono raggiungere temperature di alcune centinaia di gradi Celsius. Temperature molto superiori a quelle ottenibili dai collettori piani possono essere raggiunte solo se gran parte della radiazione solare viene concentrata in un'area relativamente piccola di concentrazione. A causa del movimento apparente del sole nel cielo, la superficie dei collettori a concentrazione non è in grado di indirizzare i raggi solari verso il sistema di assorbimento se la superficie concentratrice e il sistema di assorbimento sono stazionari. Perciò tali sistemi devono idealmente seguire il movimento giornaliero del sole.I collettori a concentrazione hanno i seguenti vantaggi rispetto ai collettori piani convenzionali:

1. in un sistema a concentrazione, il fluido di lavoro può raggiungere temperature più elevate rispetto ad un sistema piano con la stessa superficie di captazione di energia solare, permettendo così di ottenere una maggiore efficienza termodinamica;
2. l'efficienza termica è più elevata grazie alla ridotta perdita termica relativa alla superficie del ricevitore;
3. la superficie riflettente richiede meno materiale ed ha una struttura più semplice rispetto ad un collettore piano. Per un collettore a concentrazione il costo per unità di superficie irraggiata utile è minore che per un collettore piano;
4. sono economicamente più abbordabili, considerata la ridotta superficie dell'assorbitore, trattamenti superficiali e l'utilizzo di sistemi sottovuoto, atti a migliorare l'efficienza del sistema, ;
5. la possibilità di posizionare il sistema "fuori fuoco" permette di spegnere il sistema, evitando pericolose temperature di stagnazione.

Per contro, presentano i seguenti svantaggi:

1. i sistemi a concentrazione sfruttano sostanzialmente solo la radiazione solare diretta, raccogliendo una minima percentuale di radiazione diffusa (in funzione del rapporto di concentrazione);
2. è necessario fornire ai collettori un sistema di inseguimento del sole, elemento assente nei collettori piani;
3. le superfici riflettenti presentano un graduale peggioramento delle prestazioni ottiche con il tempo, dovuto principalmente a sporcizia depositata ed è quindi richiesta una maggiore manutenzione rispetto ai collettori piani;
4. il raggiungimento di elevate temperature, nonostante i notevoli vantaggi termodinamici, richiede necessari accorgimenti riguardo la resistenza della struttura a pressione e l'accumulo di calore a temperature più elevate, con conseguenti implicazioni tecnologiche.

Attività sperimentale

La fase di attività sperimentale è stata condotta nella stazione sperimentale di test allestita presso il Laboratorio solare del Centro Ricerche ENEA di Trisaia, la cui progettazione, realizzazione e verifica funzionale è stata oggetto delle attività svolte nella precedente annualità dell'Accordo di Programma. In particolare, si è provveduto a sperimentare e qualificare differenti tipologie di collettori solari a media temperatura utilizzanti diversi sistemi ottici per la concentrazione della radiazione solare (sistemi a CPC, concentratori parabolici lineari, concentratori parabolici puntuali, concentratori a specchi di Fresnel). In particolare le attività sperimentali hanno riguardato:

- la messa a punto dell'impianto di prova, attraverso il tuning fine dei parametri di controllo e la verifica degli stessi in condizioni operative reali
- la modellizzazione teorica delle diverse tipologie di concentratori abbinata ad analisi termo-fluidodinamiche (mediante software agli elementi finiti) ed ottiche (mediante software di ray-tracing)
- la verifica sperimentale su componenti commerciali e/o prototipi in fase di sviluppo anche in collaborazione con aziende operanti nel settore delle applicazioni solari a media temperatura.

Messa a punto della stazione di prova per la caratterizzazione energetica di collettori solari a media temperatura

L'attività descritta in questo paragrafo riguarda la messa a punto dell'impianto di prova, del quale si riporta lo schema di funzionamento, attraverso il tuning fine dei parametri di controllo e la verifica degli stessi in condizioni operative reali. Lo scopo dell'impianto è quello di alimentare il collettore esposto alla radiazione solare con una

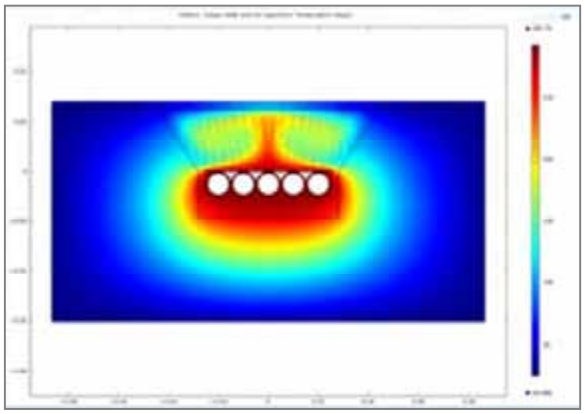
portata fissa di olio diatermico mantenuto a temperatura costante. L'impianto è composto dei seguenti principali sottosistemi di cui si dà una breve descrizione funzionale:

- Serbatoio inerziale dell'olio diatermico caldo alimentato da caldaia a GPL tramite una valvola deviatrice a tre vie. La caldaia serve a portare alla temperatura desiderata l'impianto e a mantenerla costante durante la prova.
- Pompa di circolazione la cui portata è regolata da due valvole di regolazione a due vie. Essa ha lo scopo di fornire la portata richiesta per la prova e di mantenerla costante.
- Resistenza elettrica scaldante all'ingresso del collettore il cui scopo è quello di effettuare il controllo fine di temperatura all'ingresso del collettore
- Serbatoio inerziale del fluido freddo raffreddato ad aria mediante ventilatore mosso da un inverter a frequenza variabile, il quale ha lo scopo di estrarre dal fluido proveniente dal collettore la potenza termica conferitagli dal collettore per portarlo a una temperatura inferiore a quella del fluido nel serbatoio inerziale dell'olio diatermico caldo, permettendo in questo modo di mantenere quest'ultimo a una temperatura costante mediante l'intervento della caldaia.

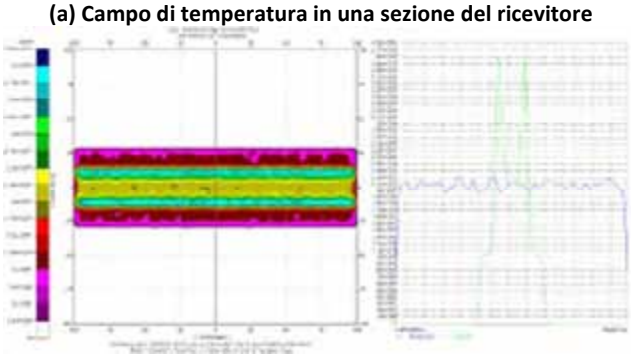
L'impianto è dotato di un sistema SCADA per la supervisione e il controllo, che effettua la regolazione della portata e delle temperature mediante controllori PID indipendenti che possono funzionare nelle due classiche modalità: automatica e manuale. Per entrambe le modalità l'operatività dell'impianto ha richiesto che fossero determinati i parametri di funzionamento. In particolare per la modalità di funzionamento in automatico si è dovuto determinare la banda proporzionale, e i tempi integrale e derivativo dei PID in modo da soddisfare i requisiti di stabilità delle grandezze controllate richiesti dalla normativa tecnica di riferimento (EN 12975-2).
Poiché i suddetti requisiti di stabilità sono molto stringenti (in particolare: portata stabile entro 1% del valore di setpoint e temperatura in ingresso al collettore stabile entro 0,1°C), si è reso necessario approfondire in dettaglio le diverse problematiche relative al controllo dell'impianto. A tal fine si è proceduto alla stesura di opportuni script in ambiente MatLab con lo scopo di simulare l'intero impianto in diverse condizioni operative che riproducono le diverse fasi di test del collettore. Dai risultati delle simulazioni si sono ottenuti i parametri dei PID da implementare nel sistema di controllo. Stante l'ovvia diversità tra i fenomeni reali e quelli simulati tali parametri sono stati assunti come parametri di partenza che sono stati affinati mediante prove sperimentali condotte sull'impianto.

Parallelamente alle attività di sperimentazione su collettori solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura, sono state condotte attività di modellazione teorica su prototipi in fase di sviluppo presso aziende con cui il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia collabora attraverso attività di supporto tecnico-scientifico. In particolare le attività hanno riguardato la definizione di modelli numerici (sviluppati in ambiente Matlab) per l'analisi e successiva previsione del comportamento ottico e termico di tali tipologie di concentratori solari, a cui sono state abbinate sia analisi di dettaglio dei fenomeni ottici (mediante software di ray-tracing) sia analisi termo-fluidodinamiche agli elementi finiti (mediante l'uso del software COMSOL) al fine di ottimizzare gli scambi termici tra ricevitore e fluido termo-vettore. La Figura 160 mostra una vista 3D del prototipo di concentratore solare sviluppato ed ottimizzato in collaborazione con l'azienda Costruzioni Solari Srl, con annessi alcuni esempi di simulazioni ottiche e termo-fluidodinamiche condotte al fine di ottimizzare gli scambi energetici tra sistema di captazione della radiazione solare, ricevitore termico e fluido termo-vettore. In particolare una delle immagini mostra il campo di temperatura relativo ad una sezione del ricevitore termico a cui si sovrappone l'andamento del campo di velocità dell'aria racchiusa nell'intercapedine tra piastra captante e vetro di copertura. La seconda immagine mostra invece la distribuzione della radiazione concentrata sull'assorbitore, evidenziando le peculiarità introdotte del sistema ottico a CPC utilizzato per la concentrazione della radiazione solare.

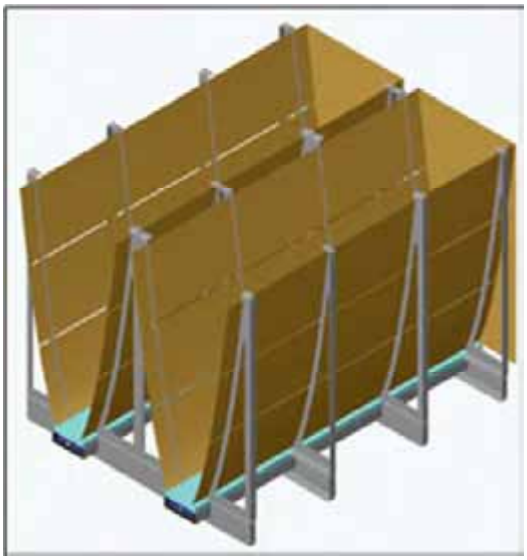
Sulla base delle analisi teoriche condotte con l'ausilio dei modelli matematici sviluppati è stato possibile introdurre una serie di miglioramenti finalizzati all'ottimizzazione ottica e termo-fluidodinamica del prototipo della Costruzioni Solari Srl. Tali elementi di miglioramento hanno riguardato sia il sistema ottico di concentrazione sia la configurazione del ricevitore termico. Sempre mediante il ricorso ai diversi software di simulazione a disposizione, sono state effettuate analisi di dettaglio, dal punto di vista ottico e termo-fluidodinamico, della soluzione adottata al fine di determinare per via teorica le prestazioni energetiche. Contemporaneamente sono state effettuate campagne sperimentali su differenti prototipi del concentratore che si differenziavano per alcuni dettagli costruttivi del ricevitore termico. Il confronto tra i risultati delle analisi teoriche e le relative prove sperimentali hanno evidenziato un sostanziale accordo, dimostrando la bontà delle scelte progettuali implementate nonché l'affidabilità degli strumenti di calcolo sviluppati in vista di un loro utilizzo futuro per effettuare ulteriori miglioramenti ed ottimizzazioni.



(a) Campo di temperatura in una sezione del ricevitore



(b) Distribuzione della radiazione concentrata sul ricevitore



(c) Vista 3D del prototipo

Figura 196. Vista 3D del prototipo della ditta Costruzioni Solari e esempi di analisi ottiche e termo-fluidodinamiche

Le foto in Figura 197 mostrano il set-up sperimentale con il relativo dettaglio del ricevitore termico. Il tutto è stato installato su un sistema ad inseguimento azimutale programmato per spostamenti a intervalli del minuto in modo da garantire l'uniformità e la costanza nel tempo del flusso radiativo sul ricevitore.

Figura 197. Foto del set-up sperimentale e dettaglio del prototipo testato

Sperimentazione su collettori commerciali di diversa tipologia

Coerentemente con gli obiettivi della presente linea di attività, sono state condotte una serie di sperimentazioni su differenti tipologie di collettori a concentrazione per applicazioni a media temperatura con lo scopo ultimo di qualificare i suddetti componenti in conformità alla normativa tecnica di settore (EN 12975-1:2006 e successive modificazioni in fase di approvazione dal comitato tecnico europeo CEN/TC 312).

La Figura 198 mostra il set-up sperimentale allestito per l'esecuzione dei test di efficienza termica su un collettore parabolico lineare della ditta SOLTIGUA. Il collettore è stato connesso alla stazione di prova ad olio diatermico e sono state condotte diverse campagne sperimentali con l'obiettivo di determinare l'efficienza termica in diverse condizioni operative sia dal punto di vista termo-fluido dinamico (temperatura e portata dell'olio diatermico) sia dal punto di vista meteo-climatico (diversi livelli della DNI – *Direct Normal Irradiance*). Il collettore è stato testato con inseguimento continuo in direzione E-W alimentando l'ingresso del collettore con olio diatermico a temperature via via crescenti e comprese in un range tra 100 e 250 °C.

Figura 198. Foto del concentratore parabolico lineare della ditta SOLTIGUA in fase di test

Le Figura 199 e Figura 200 mostrano gli andamenti della potenza estratta dal collettore e della radiazione solare raccolta dalla superficie di apertura, durante 2 ore di acquisizione continuativa e per due diverse temperature di lavoro del collettore (100 °C e 200 °C).

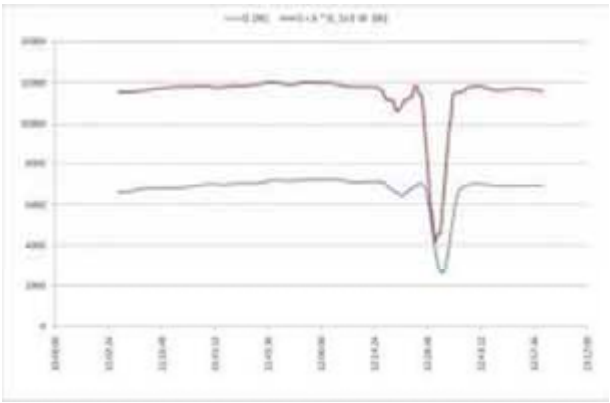


Figura 199. Potenza utile estratta (Q) a 100 °C

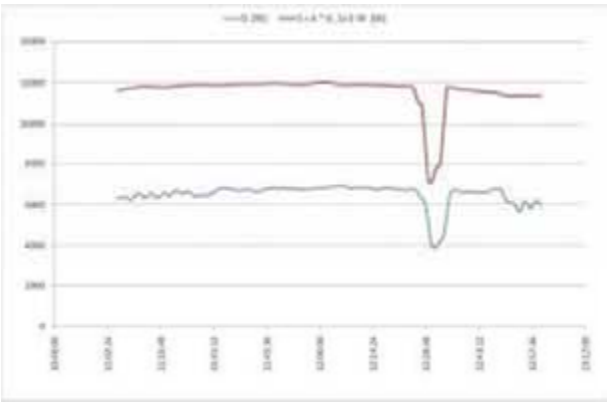


Figura 200. Potenza utile estratta (Q) a 200 °C

Analogamente a quanto fatto con il sistema parabolico lineare, nel corso della presente annualità si è proceduto alla sperimentazione di una diversa tecnologia solare per applicazioni a media temperatura, basata su un sistema di concentrazione a specchi di Fresnel.

Le foto in Figura 201 illustrano il set-up sperimentale allestito per l'esecuzione dei test di efficienza sul collettore a specchi di Fresnel della ditta DWA. In particolare, la seconda riporta il dettaglio operativo del collettore con la foto del tubo ricevitore (identico a quello utilizzato per il progetto Archimede e fornito dalla ditta Angelantoni) quasi totalmente illuminato dalla radiazione riflessa e concentrata dagli specchi sottostanti. Anche in questo caso per esigenze di sperimentazione si è preferito l'orientamento E-W a quello N-S più comunemente utilizzato.

Figura 201. Foto del concentratore a specchi di Fresnel della ditta DWA in fase di test

A titolo di esempio dell'attività di prova condotta su tale tipologia di concentratore, nei grafici di Figura 202 sono evidenziati gli andamenti delle temperature in ingresso ed uscita dal collettore e della potenza utile estratta durante due ore di acquisizione continuativa.

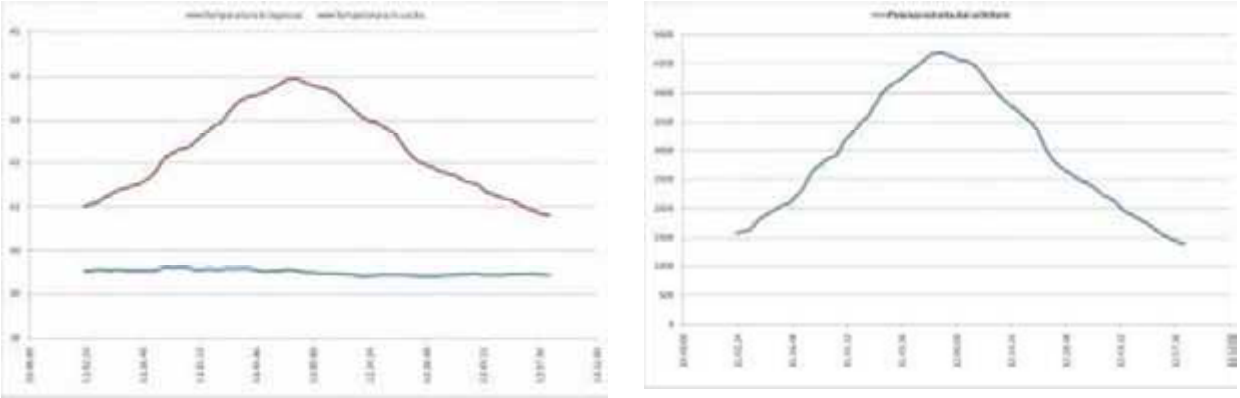


Figura 202. Andamento delle temperature e della potenza estratta

Analisi e caratterizzazione energetica degli accumuli termici

Relativamente a tale task, è stato previsto un'ulteriore ampliamento delle attività svolte dal Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia nel settore delle applicazioni a bassa e media temperatura, con la realizzazione delle facility necessarie alla caratterizzazione degli accumuli solari in accordo alla normativa tecnica europea EN 12977-3. In particolare, sono state implementate le infrastrutture necessarie allo svolgimento delle attività sperimentali (circuiti termoidraulico, apparato di acquisizione e controllo, ecc.) e si è proceduto alla relativa verifica funzionale.

Metodiche di prova per la caratterizzazione degli accumuli termici per applicazioni solari

La norma europea EN 12977-3 definisce le procedure di prova degli accumuli degli impianti Custom – Built nel range 50-3000 litri. Scopo principale delle prove è la determinazione dei principali parametri termo-fluidodinamici degli accumuli da utilizzare in modelli matematici dettagliati degli impianti che ne simulino il comportamento in maniera quanto più possibile vicina al caso reale. I principali parametri da determinare sono la capacità termica effettiva degli accumuli, il coefficiente che quantifica le perdite termiche complessive (in W K^{-1}), un parametro che descrive la degradazione del grado di stratificazione durante lo stand-by, la determinazione del grado di stratificazione durante il processo di scarica a portata elevata, il coefficiente di scambio termico globale dello scambiatore (esterno, a mantello o a serpentino immerso) in funzione della temperatura (in W K^{-1}), la determinazione dello stesso parametro per l'eventuale scambiatore ausiliario.

I test da eseguire sono del tipo a scatola nera con misure dei principali parametri termo- fluidodinamici di ingresso e di uscita senza la necessità di effettuare misure dirette all'interno dell'accumulo. In particolare le principali grandezze monitorate sono le portate e le temperature di ingresso e di uscita nonché la temperatura ambiente. Gli accumuli sono testati indoor in condizioni di temperatura ambiente controllata. In generale i test prevedono una fase di condizionamento durante la quale vengono fissati alcuni parametri come ad esempio la temperatura iniziale dell'accumulo, un processo di carica che in generale può essere effettuato a temperatura o potenza

termica costante, un eventuale periodo di stand-by e un processo di scarica durante il quale viene sottratta potenza termica all'accumulo inviando al suo interno fluido freddo a una temperatura prefissata (in generale 20 °C). I dati ottenuti relativi alle grandezze soggette a misura vengono poi opportunamente processati per ottenere i dati relativi alla caratterizzazione termo-fluidodinamica dell'accumulo.

Progettazione e realizzazione dell'impianto di prova

Definite le specifiche di progetto si è proceduto alla realizzazione della piattaforma sperimentale da ubicarsi in un'apposita area localizzata nei pressi del Laboratorio di qualificazione dei collettori e sistemi solari del C.R. ENEA – Trisaia. Le figure Figura 203 e Figura 204 mostrano gli schemi funzionali dei due circuiti di prova da utilizzarsi per l'effettuazione dei test di carica e scarica del serbatoio solare.

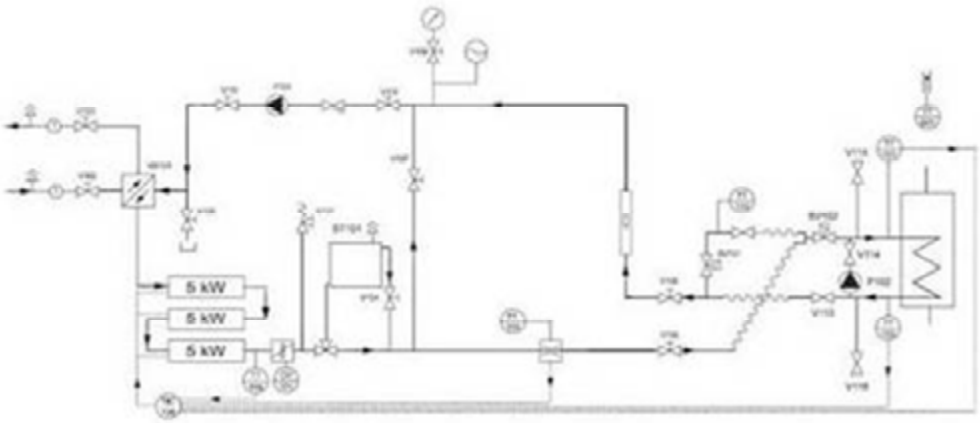


Figura 203. Schema funzionale del circuito termo-idraulico di carica del boiler solare (lato campo solare)

Scopo del circuito termo-idraulico di carica è quello di condizionare la temperatura e la portata d'acqua in ingresso allo scambiatore del boiler solare e di mantenere tali grandezze stabili per tutto il periodo di test (condizioni di stabilità richieste: < 1% per quanto riguarda la portata; < 0,1 °C per quanto riguarda la temperatura).
Il circuito è provvisto di resistenze scaldanti della potenza complessiva di 15 kW in grado di portare la temperatura dell'acqua alle condizioni operative richieste. Per garantire la stabilità di temperatura richiesta, il circuito è inoltre provvisto di un serbatoio inerziale che smorza le fluttuazioni di temperatura in uscita dal riscaldatore elettrico e di uno scambiatore che consente sia di ridurre di 5-10 °C la temperatura dell'acqua in ingresso alle resistenze scaldanti (al fine di garantire una maggiore stabilità della temperatura nell'anello di ricircolo) sia di raffreddare il boiler solare quando necessario.
Scopo del circuito termo-idraulico di scarica è quello di condizionare la temperatura e la portata d'acqua in ingresso al boiler solare e di mantenere tali grandezze stabili per tutto il periodo di monitoraggio (condizioni di stabilità richieste: < 1% per quanto riguarda la portata; < 0,1°C per quanto riguarda la temperatura). Anche in questo caso il circuito è provvisto di resistenze scaldanti della potenza complessiva di 5 kW in grado di portare la temperatura dell'acqua alle condizioni operative richieste.

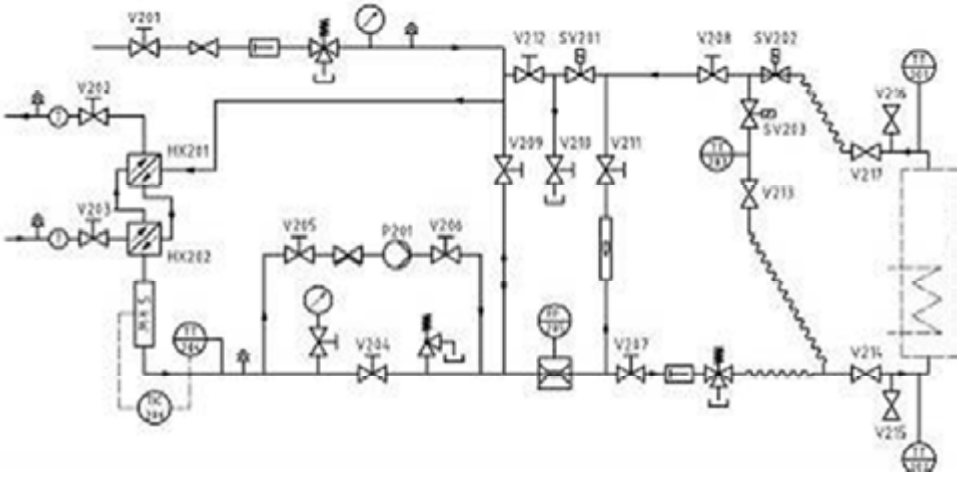


Figura 204. Schema funzionale del circuito termo-idraulico di scarica del boiler solare (lato utenza)

Il circuito è provvisto anche di un sistema di raffreddamento costituito da 2 scambiatori connessi in serie della potenza minima di 5 kW ad una temperatura dell'acqua di processo di 20 °C. L'impianto è progettato per funzionare sia a circuito aperto, con alimentazione diretta ad acqua di rete, sia a circuito chiuso. In entrambi i casi un opportuno anello di ricircolo consente di generare un flusso d'acqua a temperatura e portata controllata secondo le richieste del metodo di prova. La commutazione tra le due configurazioni a circuito aperto e a circuito chiuso, è garantita da un opportuno sistema di elettrovalvole che permette di gestire le operazioni di prova in maniera totalmente automatica.

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

Gli obiettivi di tale task si collocano nell'ottica di dotare il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia di una stazione sperimentale per l'esecuzione di test indoor in condizioni controllate. Tale esigenza è stata motivata dalle problematiche emerse durante le attività sperimentali condotte su prototipi di collettori solari oggetto di sviluppo ed ottimizzazione delle prestazioni termiche. Infatti, l'influenza di fattori quali la non perfetta stabilità di parametri meteo-climatici quali l'irraggiamento solare, ha portato a notevoli complicazioni nella misura degli effetti prodotti dall'introduzione di modifiche nei materiali e nella struttura dei componenti sotto test. Per superare tali difficoltà si è deciso di implementare un opportuno apparato sperimentale che ricorrerà all'utilizzo di un simulatore solare che si prevede di realizzare nella prossima annualità. Pertanto l'attività oggetto della presente task si è principalmente articolata nelle fasi di dimensionamento e successiva realizzazione del circuito termoidraulico di prova che consente di testare collettori di piccola sia commerciali che allo stato di prototipo.

Analogamente a quanto già fatto per l'impianto ad olio diatermico, dovendo anche in questo caso rispettare dei criteri stringenti di stabilità per ciò che riguarda la temperatura in ingresso al collettore si è optato per un circuito in cui fossero presenti serbatoi inerziali per lo smorzamento delle fluttuazioni di tale grandezza. In particolare nel circuito è presente un serbatoio per l'accumulo del fluido caldo riscaldato da resistenze elettriche e da un serbatoio per l'accumulo del fluido freddo raffreddato con acqua di rete; per entrambi i serbatoi è previsto un rimescolamento mediante pompe onde evitare fenomeni di stratificazione. Il controllo delle temperature e della portata è effettuato mediante controllori PID. La supervisione dell'intero impianto è affidata invece ad un quadro di controllo a PLC che controlla e automatizza le diverse fasi operative dell'impianto.

Per la progettazione e il dimensionamento dei vari componenti il circuito di test si è fatto ricorso alla simulazione dell'impianto in ambiente Matlab, dai cui risultati è stato possibile ricavare i valori dei diversi parametri di processo nonché verificare che gli stessi rientrassero nelle specifiche di progetto. Contestualmente alla progettazione e realizzazione del circuito termo-idraulico, si è proceduto ad implementare un sistema di acquisizione dati (basato su un sistema Compact DAQ della National Instruments) munito di moduli per l'input e l'output sia analogico che digitale. Tale sistema consente di rilevare da remoto tutti i parametri termo-fluidodinamici e quelli dell'ambiente controllato (temperatura, flusso radiativo al collettore in prova, ecc.).

Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici

Le attività svolte riguardano lo sviluppo delle metodologie di modellazione predittiva, ottimizzazione e regolazione dell'intero sistema edificio-sistema di climatizzazione innovativa, attraverso cui si intende cogliere l'ulteriore margine di efficienza ma anche garantire la robustezza del sistema nel suo insieme. In particolare, sono state condotte le azioni di seguito descritte.

Sviluppo di modelli predittivi di richiesta energetica per la climatizzazione

La domanda di energia per il condizionamento degli ambienti è aumentata considerevolmente negli ultimi decenni ed il trend è ancora fortemente in crescita. Le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento estivo sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici. In particolare il rischio è di dover aumentare significativamente la potenza installata senza un corrispondente aumento del consumo con il risultato di un costo dell'energia più alto.

In questo contesto, la previsione del carico, in un orizzonte temporale vario, svolge un ruolo critico per la gestione delle operazioni in ambito elettrico. Nelle reti elettriche del futuro una previsione accurata e robusta permetterebbe di ottenere un maggiore controllo e flessibilità rispetto alle reti odierne e si potrebbero ridurre i problemi derivanti da picchi inattesi oltre ad avere informazioni molto utili nell'acquisto e nello scheduling della produzione energetica. Inoltre una predizione accurata avrebbe un impatto notevole su tutte le operazioni di gestione, evitando ad esempio i sovraccarichi e permettendo un immagazzinamento più efficiente. Infine, l'abilità di predire i comportamenti futuri degli utenti e le loro richieste è una parte necessaria dell'intelligenza richiesta dalle Smart Grids, dove le tecnologie dell'informazione sono molto utilizzate. Un uso intenso della Generazione Distribuita presenta delle nuove sfide, come il bisogno di una "Intelligenza Distribuita" che permetta di gestire

tutte le informazioni prodotte in luoghi diversi da sistemi differenti. Ovviamente uno studio in quest'ambito deve cominciare in scala più piccola, sulla scala degli edifici, studiando le prestazioni delle tecniche predittive consolidate, e solo successivamente conviene spostarsi in un ambito più ampio e complesso.

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo delle metodologie di modellazione predittiva dell'intero sistema edificio-climatizzazione, attraverso cui si intende cogliere l'ulteriore margine di efficienza ma anche garantire la robustezza del sistema nel suo insieme. In particolare:

- è stata sviluppata una metodologia innovativa per la previsione a breve termine della richiesta energetica di un edificio complesso;
- è stata effettuata la sperimentazione su un edificio ENEA.

La previsione a breve termine

Generalmente si parla di previsione a breve termine quando l'orizzonte temporale varia dall'ordine delle ore a quello di una settimana. Il tipo di variabili da considerare per la previsione può variare in base al tipo di utenza, se residenziale, industriale o terziaria. I dati di carico energetico normalmente mostrano una periodicità, spesso più di una: ad esempio, il carico in un preciso istante è generalmente dipendente dal valore del carico nell'ora precedente ma anche nello stesso orario della settimana precedente e così via.

Una buona previsione deve essere accurata e, assai importante, presentare un errore massimo il più piccolo possibile. Infatti, l'efficacia della gestione energetica di una rete, o complesso di edifici, è fortemente influenzata dai picchi di errore ed un predittore con una bassa varianza può essere preferito ad uno che presenta un errore medio inferiore ma picchi di errore più accentuati. Sottostimare la richiesta energetica può avere un impatto negativo sul Demand Response e può rendere il controllo dei sovraccarichi più difficile. Al contrario una sovrastima può creare un surplus inatteso di produzione. In ambedue i casi è chiaro che più alto è l'errore e maggiori sono i costi di gestione, arrivando a situazioni in cui un distretto energetico è costretto a comprare elettricità dalla rete a costi più alti di quanto sarebbero stati grazie ad un'accurata predizione. I dati sono stati raccolti presso il centro ricerche ENEA di Casaccia e sono così descritti:

- Carico Elettrico Orario: misurato in un edificio del centro (C-59) considerando illuminazione, condizionamento e dispositivi vari (comunemente PC).
- Dati Climatici: temperatura esterna e radiazione solare misurati con una centralina all'interno del centro ricerche.
- Dati Affluenza: il numero di persone all'interno del C59 è stato stimato usando i dati forniti dai lettori di badge presenti all'ingresso del centro.

Tutti questi dati sono stati raccolti per un anno intero. Per la prima fase di preparazione e sviluppo del modello predittivo sono stati usati i dati relativi a 13 settimane, per un totale di 2184 dati orari. Nel periodo considerato il carico ha un valore medio di 17,49 kW, un minimo di 8,49 kW ed un massimo di 54,9 kW. Il numero di persone presenti all'interno dell'edificio durante le ore lavorative varia comunemente tra 45 e 70.

I modelli predittivi

Qui di seguito descriviamo brevemente i modelli implementati in questa sperimentazione. Tali modelli non si basano su predizioni teoriche (non hanno lo scopo di progettare il sistema di climatizzazione, bensì quello di gestirlo), ma ricostruiscono progressivamente nel tempo il profilo di utenza dell'edificio al fine di ottimizzarne la prestazione e sono stati qualificati sulla base dei dati acquisiti nel corso della sperimentazione sull'edificio ENEA.

Modello Naive

Per fornire un confronto significativo tra i vari metodi è stato considerato inizialmente un modello Naive, in modo da poter successivamente quantificare i miglioramenti introdotti da metodi sicuramente più sofisticati ed "intelligenti". Questo modello non fa altro che predire il segnale al tempo t fornendo lo stesso valore osservato esattamente S istanti prima. Nei dati dell'edificio C-59 il valore di S è pari a 168, una settimana, visto che i dati utilizzati hanno frequenza oraria.

Modelli Box-Jenkins

Un modello a serie temporali è certamente la prima scelta quando si affronta un problema di predizione, normalmente una scelta consona è un modello ARIMA che considera la non-stazionarietà dei dati, presentato da Box & Jenkins nel 1970. In questo modello si assume che il segnale futuro sia una funzione lineare delle osservazioni passate con l'aggiunta di un termine di errore (supposto a media nulla). Data la periodicità dei dati si è optato per la variante "stagionale" dei modelli ARIMA, chiamata SARIMA. Il modello ARIMA può essere esteso aggiungendo un termine esterno *I,* tale modello è generalmente denominato ARIMAX, similmente il modello SARIMA diviene SARIMAX.

Reti Neurali

Diversamente dai modelli precedenti, la cui linearità può rappresentare un grosso limite nell'affrontare i problemi più complessi, le reti neurali sono strumenti di modellazione non-lineare pensati per trovare la relazione ottimale tra ingressi e uscite osservati in un sistema durante una fase chiamati di 'addestramento'. Le reti più usate sono le reti feed-forward come i percettroni multistrato (MLP) i cui pesi sono generalmente definiti usando il noto algoritmo di backpropagation. In questo lavoro sono state scelte due tipologie di rete neurale: percettroni multistrato (MLP) e reti neurali a base radiale (RBF).

Nella progettazione delle reti MLP dopo una serie di test è stato scelto il valore di 64 neuroni nello strato nascosto. Le funzioni di attivazione sono tangenti iperboliche per lo strato nascosto e lineari per l'ultimo strato. La scelta dell'algoritmo di addestramento è ricaduta sulla backpropagation Levenberg-Marquardt con il valore di damping impostato a 0,1. Il criterio di stop è infine il raggiungimento di 1000 epoche di addestramento.

Per le reti RBF abbiamo proceduto nello stesso modo e 128 funzioni Gaussiane sono presenti nello strato di hidden. La procedura di addestramento in questo caso consiste nel posizionamento delle funzioni a base radiale in base ad una selezione casuale dei campioni di ingresso e con un algoritmo di ottimizzazione SCG per l'ottimizzazione successiva dei pesi e delle coordinate.

Sperimentazione

In questa fase abbiamo applicato i modelli selezionati, calibrati sui dati raccolti, per prevedere il carico orario sulla parte restante dei dati non usati in fase di calibrazione.

L'insieme dei dati orari di carico elettrico è stato suddiviso in due parti: la prima consiste in 12 settimane (2016 campioni orari) mentre la restante è una singola settimana (168 campioni orari). Questa suddivisione è stata selezionata per creare una situazione realistica che supponesse la possibilità di aggiornare il modello in tempo reale usando un sottoinsieme degli ultimi dati campionati.

La calibrazione/addestramento dei modelli è stata eseguita usando la prima parte del dataset e successivamente una predizione di 1-24 ore in avanti è stata eseguita sulla parte restante dei dati ottenendo al termine della fase di test una "finestra di predizione" di 145 campioni (il numero di intervalli lunghi 24 ore all'interno dei dati di test).

La parte di test è stata a sua volta suddivisa in due parti (T1 e T2) così da fornire un'informazione più granulare sul comportamento dei vari modelli. Il metodo di predizione considerato utilizza il dato predetto al tempo *t* come ingresso per le successive predizioni (*t+1, t+2,* ecc): questo è un approccio comune per i modelli Box-Jenkins e per questo è stato applicato anche alle reti neurali.

Due criteri di errore sono stati usati per valutare i singoli modelli, il MSE (Errore Quadratico Medio) e il MAE (Errore Assoluto Medio). In aggiunta abbiamo considerato anche l'errore assoluto massimo, vista la sua importanza, come spiegato in precedenza. Nella Tabella 71 sono presenti i risultati dei vari modelli, sia sull'insieme di training sia su quelli di testing.

Tabella 71. Comparazione dei risultati

	Training		Testing T1			Testing T2		
Model	MAE	MSE	MAE	MSE	Max	MAE	MSE	Max
Naive	2.45	14.97	2.11	7.61	7.35	2.28	6.4	6.36
SARIMA	1.14	4.34	1.89	5.52	**7.16**	1.24	2.17	4.79
ANN MLP best training	0.67	1.41	2.06	9.1	23.95	2.22	13.55	24.11
Average ANN MLP	1.03 (0.38)	3.65 (2.19)	2.34 (0.79)	10.9 (17.88)	12.53 (9.22)	2.49 (1.47)	21.67 (59.29)	15.69 (15.2)
MLP Ensemble	1.02	2.92	**1.38**	**2.95**	8.32	1.09	2.4	5.88
ANN RBF best training	1.17	3.36	1.72	4.36	8.15	1.21	**2.14**	**4.61**
Average ANN RBF	3.11 (2.55)	29.51(62.62)	2.96 (1.68)	19.44 (29.20)	12.49 (9.36)	3.20 (1.17)	19.91 (14.63)	15.39 (7.27)
RNCL	1.51	5.98	1.47	3.34	7.28	**1.07**	2.82	8.53

Come prevedibile i modelli proposti hanno fornito risultati migliori del modello Naive. Le reti MLP mostrano una varianza molto alta e se usassimo l'errore mediano (piuttosto che quello medio), che è meno sensibile agli outlier, otteniamo un MAE medio di 2,13 e 2,21 rispettivamente su T1 e T2 e un MSE di 7,27 e 8,25. Si noti che il MAE più piccolo di testing è per le reti MLP è 1,36 e 0,91 (T1 e T2) e l'MSE minore è di 2,99 e 1,78, errori molto vicini a quelli ottenuti con un ensemble. Possiamo osservare come le reti RBF portano ad un errore medio e deviazione standard più alte delle reti MLP e questa differenza si nota anche nei rispettivi ensemble. Il modello SARIMA, nonostante i suoi risultati medi siano leggermente peggiori degli ensemble, nostra un errore massimo di testing ottimo per T1 e molto vicino all'ottimo (ottenuto dalla rete RBF best-training) nel caso T2.

Approccio multivariato

L'inserimento dei dati aggiuntivi (come l'affluenza dell'edificio) influenza i vari modelli, mentre l'utilizzo dei dati meteo non ha portato un miglioramento nella predizione. Sono stati considerati tre tipi diversi di dati esterni:

1. Informazioni sull'ora del giorno
2. Flag per un giorno feriale o non lavorativo
3. Numero di occupanti nell'edificio.

Il calcolo delle prime due variabili è semplice, mentre per la terza sarebbe stato necessario predire anch'essa nello stesso intervallo temporale della predizione del carico. Si è assunto di poter conoscere in anticipo il valore di tutte le variabili esterne, in uno scenario più realistico si sarebbero dovuti predire i valori delle variabili esterne (non deterministiche, come il numero di occupanti) e usare tale predizione come ingresso nel modello della predizione del carico. In questo caso sono state utilizzate le stesse condizioni di test del caso precedente (univariato).

Tabella 72. Comparazione risultati con l'occupazione

	Training		Testing T1			Testing T2		
Modello	**MAE**	**MSE**	**MAE**	**MSE**	**Max**	**MAE**	**MSE**	**Max**
Naive (no ext, data)	2,45	14,97	2,11	7,61	7,35	2,28	6,4	6,36
SARIMA	1,13	4,31	1,91	5,61	8,00	1,20	2,07	5,18
ANN MLP best training	0,36	0,70	3,51	20,28	18,00	2,20	11,83	24,53
Average ANN MLP	1,20 (0,31)	3,25 (1,52)	2,46 (0,83)	12,13 (16,80)	13,84 (16,62)	2,34 (1,00)	11,61 (10,61)	13,00 (6,01)
MLP Ensemble	0,74	1,47	1,42	3,30	7,98	0,75	1,27	4,79
ANN RBF best training	1,06	2,48	1,36	3,03	6,43	0,88	1,61	7,05
Average ANN RBF	1,65 (0,86)	7,71 (10,61)	1,97 (1,01)	7,99 (13,19)	8,22 (5,71)	1,77 (1,39)	8,98 (21,24)	10,74 (6,18)
RNCL	1,15	3,35	1,33	2,71	5,37	0,92	1,62	4,52

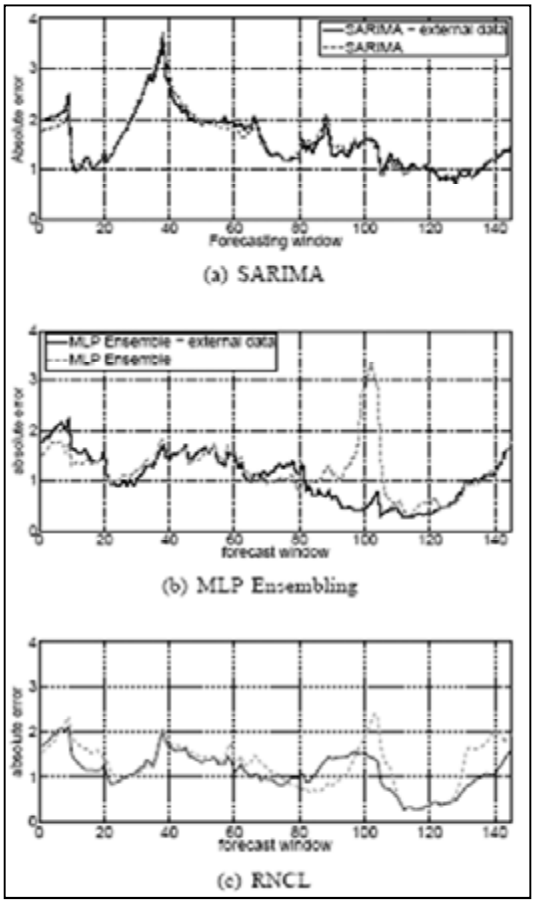


Figura 205. Comparazione modelli

Secondo quanto si osserva nella Tabella 72, tutti i modelli, escluso il SARIMA, migliorano i loro errori in almeno uno dei due insiemi di test. La parte T2 è quella dove la riduzione di errore dovuta all'ingresso dei nuovi dati è più evidente: l'ensemble di MLP riduce il suo MAE da 1,09 a 0,75 e arriva quasi a dimezzare il suo MSE (da 2,4 a 1,27) e risultati simili si ottengono per l'ensemble RNCL. Diversamente da quanto visto precedentemente l'ensemble MLP mostra un errore di testing più basso del migliore ottenuto dalle singole reti che lo compongono. Infatti, la singola rete con il miglior errore ha un MAE di 1,37 / 0,98 ed un MSE di 3,25 / 2,48. In generale l'informazione fornita dagli input aggiuntivi sembra aiutare i modelli non lineari nella predizione. In Figura 205 è evidente come le nuove informazioni aiutino a migliorare il segnale predetto, si noti ad esempio come il picco presente intorno all'istante 100 scompaia nelle predizioni delle reti neurali, a differenza del modello SARIMA che non migliora la sua efficacia con i nuovi ingressi. In conclusione, quindi, in questa attività è stata sviluppata una metodologia innovativa per la predizione dei carichi elettrici ed è stata comparata con metodologie tradizionali del settore. I risultati sperimentali hanno mostrato che l'approccio sviluppato raggiunge un'accuratezza maggiore rispetto agli altri e più in generale ha mostrato di saper sfruttare maggiormente l'aggiunta di dati esterni, un fenomeno che merita certamente una maggiore analisi. I successivi step di ricerca procederanno nello sviluppo di modelli che correlino i dati misurati (es. occupazione e dati climatici) con i differenti tipi di consumi elettrici (illuminazione, climatizzazione, prese) in modo tale da consentire una diagnostica più puntuale.

Metodologia di ottimizzazione multi obiettivo della regolazione

La ricerca ha riguardato specificamente l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianti nelle condizioni reali di gestione e utilizzo: operativamente, la ricerca ha approfondito alcune tematiche connesse a questo tema generale.

Un filone di approfondimento è stato indirizzato allo studio e sviluppo di un sistema intelligente di monitoraggio energetico-ambientale per edifici a destinazione d'uso terziaria. Lo studio si è confrontato con un caso reale, per il quale è stata progettata l'architettura del sistema di monitoraggio, che rappresenta un potente strumento a supporto della ottimizzazione energetica degli edifici in fase operativa. Parallelamente, è stato condotto un approfondimento riguardante lo sviluppo di procedure di analisi a supporto di attività diagnostiche, basate sui dati acquisiti dai monitoraggi e finalizzati al miglioramento delle prestazioni energetiche e alla qualità climatica degli ambienti confinati.

Sempre connesso alle logiche di ottimizzazione, è stato sviluppato un ulteriore approfondimento finalizzato alla riduzione dei consumi energetici per la climatizzazione ambientale attraverso lo studio di una specifica soluzione tecnologica solare (solar cooling): per questa è stata condotto un approfondimento sulle tecniche di modellazione e sulle strategie innovative di controllo e gestione per l'ottimizzazione della prestazione energetica della tecnologia stessa. I filoni di approfondimento sopra introdotti sono stati esplicitati attraverso tre temi di ricerca puntualmente esaminati:

- Progetto di una architettura hw/sw per il monitoraggio energetico e ambientale indoor remoto di una rete di edifici (utenze elettriche e termiche) di utenza terziaria (uffici).
- Sviluppo di una metodologia di diagnostica della gestione energetica degli edifici.
- Sviluppo di una metodologia di ottimizzazione multi-obiettivo della gestione estate-inverno di un edificio con sistema di climatizzazione innovativo basato su fonte solare.

Progetto di un'architettura per il monitoraggio energetico-ambientale

L'obiettivo di questo tema di ricerca era di predisporre un'architettura di monitoraggio per un edificio di riferimento, al fine di dotare la struttura della strumentazione adeguata per svolgere attività di diagnostica ed ottimizzazione delle prestazioni del costruito, prevedendo una generalizzazione delle procedure e delle linee di intervento.

Un monitoraggio energetico-ambientale di lungo periodo ha come scopo valutare le condizioni di consumo energetico e di qualità ambientale interna in cui verte un sistema edificio-impianto; sulla base delle misure possono essere identificate le problematiche di carattere energetico o di bassa qualità ambientale rispetto ai consumi; possono poi, in un secondo tempo, essere proposti degli interventi atti al risparmio energetico ed al miglioramento delle condizioni ambientali interne. Tutte queste operazioni devono essere condotte con una certa affidabilità.

Strumenti e metodi

L'edificio oggetto del piano di monitoraggio è stato studiato nelle sue caratteristiche di configurazione geometrica, di involucro, di destinazione d'uso e di tipologie impiantistiche al fine di definire con sufficiente dettaglio le caratteristiche della strumentazione a supporto del monitoraggio ed il suo posizionamento in campo. In particolare si è proceduto a:

- suddividere l'edificio in zone omogenee per carichi interni (destinazione d'uso), forzanti climatiche esterne (esposizione), tipologia di involucro, tipologia di impianto e regolazione;
- scegliere i locali di riferimento per ogni zona omogenea;
- scegliere la posizione migliore per l'installazione della strumentazione all'interno dei locali di riferimento;
- individuare i flussi energetici da monitorare;
- scegliere il dettaglio della misura del singolo flusso energetico (usi finali, quadro di piano, in centrale, etc.);
- scegliere la posizione migliore per l'installazione della strumentazione atta alla misura flussi energetici.

L'edificio è stato suddiviso in 4 zone omogenee, all'interno delle quali sono stati individuati 8 locali di riferimento, situati al secondo piano dell'edificio, in cui verranno misurate delle grandezze ambientali interne, utili a caratterizzare le condizioni di qualità ambientale dell'edificio e le prestazioni degli impianti: temperatura ed umidità dell'aria, livelli di illuminamento e concentrazione di CO_2. E' stato inoltre previsto il monitoraggio delle principali grandezze elettriche (energia, potenza reale, potenza reattiva, fattore di potenza, armoniche) a livello di quadro generale e di quadro di piano. In particolare la misura è stata condotta disaggregando i dati rispetto agli usi forza elettromotrice, illuminazione, e climatizzazione (ventilatori fan-coils).

Per la misura dell'energia termica si è installato, in centrale termica, un contatore di calore composto da un misuratore di portata volumetrica ad ultrasuoni e una coppia di sensori di temperatura ad immersione, opportunamente selezionati. Rimane aperta la possibilità di installare un altro contatore di calore in corrispondenza di uno dei terminali ambiente, in un locale di riferimento. Oltre ai parametri ambientali interni ed ai consumi energetici, in prossimità dell'edifico possono essere monitorate le grandezze climatiche esterne, che rappresentano alcune delle forzanti del sistema energetico e dei valori di confronto rispetto alle grandezze interne. Al fine di aumentare le possibilità d'interpretazione dei dati monitorati a fini diagnostici e di proposta di soluzioni di intervento, si è ritenuto opportuno prevedere per l'edificio anche il monitoraggio dell'occupazione dei locali con un sensore di presenza per camera. Questo monitoraggio è affiancato da una verifica condotta ai tornelli della sede di ENEA Casaccia, al fine di valutare l'effettiva presenza dei lavoratori all'interno dell'edificio.

Nell'ambito del progetto sono previsti monitoraggi energetici ed ambientali, al fine di alimentare elaborazioni di dati attraverso cui esaminare metodologie diagnostiche, tecniche statistiche e criteri di modellazione, principalmente basati su approccio inverso. Lo studio dei metodi di analisi e interpretazione dei dati monitorati è un elemento essenziale a supporto della valutazione della prestazione energetica ed ambientale degli edifici: l'uso di dati misurati attraverso monitoraggi di lungo periodo consente una caratterizzazione più attendibile, in quanto basata sul comportamento reale, delle dinamiche energetiche edilizie.

L'analisi delle grandezze elettriche e termiche misurate attraverso piani di monitoraggio porta alla definizione e valutazione di specifici indicatori della prestazione energetica dell'edificio, indispensabili per l'effettuazione di analisi diagnostiche del comportamento energetico degli edifici. Analogamente, l'analisi diagnostica può essere indirizzata alla verifica della qualità climatica indoor attraverso opportuni indicatori.

Queste analisi permettono inoltre di esaminare le correlazioni esistenti tra grandezze e indicatori energetici e grandezze e indicatori della qualità dell'ambiente interno: l'esame congiunto può portare alla definizione di soluzioni per l'ottimizzazione energetica dell'edificio nel rispetto della qualità microclimatica dell'ambiente interno.

Strumenti e metodi

E' stata ampliata una già consistente analisi bibliografica rivolta alla letteratura scientifica internazionale e indirizzata all'esame dello stato dell'arte di esperienze relative alle modalità di creazione dei database energetici-ambientali da monitoraggio, alla successiva valutazione di indicatori prestazionali e alla applicazione di modelli statistici e/o predittivi per la caratterizzazione del comportamento energetico degli edifici.

Lo studio delle esperienze condotte si è in particolare focalizzato sulle diverse metodologie di analisi energetica basate sull'approccio inverso, con il fine di individuare formulazioni matematiche e tecniche di modellazione per una possibile applicazione delle metodologie stesse a casi reali.

L'attività di studio ha comportato un'analisi critica delle metodologie generali di modellazione per la valutazione energetica del sistema edifico-impianto (approccio diretto o *forward approach* e approccio inverso o *inverse approach*) con il fine di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi connessi al loro utilizzo, nonché le criticità correlate rispetto alla natura dei dati a disposizione e allo scopo della diagnosi da condurre. Attraverso la modellazione inversa si opera infatti un'analisi empirica sulla prestazione dell'edificio al fine di individuare le variabili che maggiormente influenzano la sua prestazione. E' inoltre possibile valutare e stimare le cause di scostamento tra il consumo monitorato e il fabbisogno calcolato (individuando le cause che dipendono dal comportamento dell'utente) o valutare il potenziale risparmio energetico direttamente legato all'intervento di retrofit effettuato (normalizzando rispetto alle altre possibili cause).

Al fine di esemplificare in modo chiaro l'argomento, si è ritenuto utile implementare e presentare alcuni dei risultati emersi da un caso studio sviluppato su un edificio per il terziario (Palazzo Ciocca, sede del municipio di Livorno Ferraris – Vercelli) sottoposto a monitoraggio energetico ambientale.

L'analisi effettuata ha consentito da una parte di esaminare l'architettura del piano di monitoraggio adottato, le grandezze raccolte, gli indicatori utilizzati nonché di individuare i modelli più adatti da applicare ai dati energetico-ambientali misurati, testandoli e individuando quelli maggiormente "robusti".

Metodologia di ottimizzazione della gestione di un edificio con sistema di climatizzazione innovativo basato su fonte solare

Obiettivo di questo tema è la definizione di una metodologia per l'ottimizzazione delle condizioni di funzionamento di un impianto di climatizzazione del tipo solar cooling. Tale metodologia è applicata al modello dinamico del sistema di solar cooling installato presso il centro di ricerca Enea della Casaccia.

Strumenti e metodi

La ricerca fa utilizzo di due modelli dell'impianto:

1) modello fuori progetto dell'impianto per l'ottimizzazione delle variabili di gestione, realizzato in ambiente EES (Engineering Equation Solver)
2) modello di simulazione dinamica delle condizioni di funzionamento dell'impianto, realizzato in ambiente Matlab- Simulink.

La metodologia proposta consiste nell'ottimizzazione multi-obiettivo di alcune condizioni di funzionamento, corrispondenti a valori differenti della radiazione solare e della temperatura ambiente. Le due funzioni obiettivo considerate nell'ottimizzazione sono costituite dal minimo fabbisogno di energia primaria e dalla massima potenza frigorifera prodotta dal sistema. Tali funzioni obiettivo sono tra loro "in competizione", in quanto, a partire da una condizione di ottimo, una maggiore potenza frigorifera comporta in generale un incremento del fabbisogno di energia primaria. In tal modo, l'ottimizzazione combinata porta alla definizione di una curva di Pareto, corrispondente al luogo dei punti di funzionamento ottimo. Le funzioni obiettivo considerate possono essere facilmente sostituite con altre, per esempio il minimo costo di gestione, utilizzando la stesso approccio di seguito descritto.

Il modello adottato per l'ottimizzazione è stato realizzato in ambiente EES ed è costituito dalle equazioni di bilancio ed equazioni caratteristiche dei componenti, in grado di descriverne il comportamento fuori progetto in condizioni stazionarie. Il modello è stato calibrato con alcuni valori di temperature e potenze termiche relativi all'impianto installato presso l'edificio F-51.

L'ipotesi di sistema in condizioni stazionarie permette di semplificare significativamente il problema di ottimizzazione senza comportare una notevole approssimazione. Infatti, i componenti che più incidono sulla dinamica del sistema, i serbatoi di accumulo, hanno un tempo di carica/scarica dell'ordine di pochi minuti e quindi decisamente minore rispetto al passo temporale adottato nella simulazione dinamica.

L'ottimizzazione multi-obiettivo è condotta scrivendo una unica funzione obiettivo, in particolare il fabbisogno di energia primaria del sistema. Tale funzione è poi corretta con un termine di penalità, il cui valore dipende dal valore dalla seconda funzione obiettivo. Quando la potenza frigorifera prodotta è superiore a un certo valore limite, il termine di penalità è nullo. Quanto invece la potenza è inferiore, la funzione di penalità diventa molto grande, aumentando così in modo fittizio il fabbisogno di energia primaria. In questo modo, il risultato dell'ottimizzazione sarà tale da minimizzare il fabbisogno di energia primaria, garantendo però il minimo valore specificato della potenza frigorifera prodotta. La curva di Pareto è determinata ripetendo l'ottimizzazione per differenti valori della minima potenza frigorifera accettabile.

Le variabili di gestione adottate nell'ottimizzazione sono costituite dalla temperatura massima in uscita dai pannelli solari (o, in alternativa, la portata circolante all'interno dei pannelli stessi), la portata di acqua in uscita dagli accumulatori termici, la portata di acqua attraverso la caldaia di integrazione. Tali variabili possono essere agevolmente sostituite con altre variabili libere. Questa sostituzione è ottenuta grazie all'approccio modellistico utilizzato dal software EES, che di fatto è costituito da un sistema con un numero di equazioni pari al numero di variabili del sistema meno le variabili libere nel processo di ottimizzazione.

L'ottimizzazione è condotta in primo luogo utilizzando un algoritmo genetico, al fine di evitare problemi legati alla possibile presenza di punti di ottimo locale, ed è poi raffinata nell'intorno della soluzione trovata con un metodo diretto. Poiché il funzionamento dell'impianto è fortemente condizionato dalla bassa temperatura dell'acqua prodotta dalla caldaia di integrazione, sono stati esaminati scenari alternativi, corrispondenti a temperature massime diverse, nell'ipotesi di sostituire la caldaia stessa. I risultati ottenuti dal modello stazionario sono stati successivamente implementati nel sistema di regolazione del modello dinamico.

Il modello dinamico si compone di 4 blocchi principali, il campo solare, lo scambiatore di calore, l'accumulo di acqua calda e il chiller ad assorbimento, e da 2 blocchi secondari, la torre evaporativa e la caldaia di integrazione. Un ultimo blocco rappresenta il sistema di controllo, che riveste un ruolo fondamentale all'interno delle dinamiche del sistema analizzato. Le equazioni utilizzate all'interno di questi blocchi sono le stesse adottate nel modello per l'ottimizzazione, con l'eccezione dei serbatoi di accumulo e del sistema di controllo. Inoltre, il blocco che modella il campo solare è strutturato in modo da ricevere in ingresso le variabili riguardanti la radiazione solare e la temperatura al variare del tempo nel sito analizzato. Questo modello consente di calcolare la potenza frigorifera prodotta dal chiller ad assorbimento, al variare delle condizioni di funzionamento, adottando la strategia di regolazione precedentemente determinata. Inoltre consente di calcolare la necessaria integrazione da fornire con la caldaia e con l'impianto frigorifero a compressione di vapore.

Principali soggetti esterni coinvolti

L'ENEA ha ritenuto opportuno coinvolgere diversi soggetti esterni che hanno dato al lavoro svolto un importante contributo tecnico e scientifico. Di seguito sono riportate le attività che hanno visto la partecipazione di soggetti esterni, la presentazione dei soggetti esterni ed una breve descrizione dei lavori da essi eseguiti.

Università degli Studi Roma TRE

Ha portato avanti il *"Monitoraggio impianto di solar heating and cooling a servizio dell'edificio F-51"* e la *"Simulazione di sistemi di climatizzazione a pompa di calore elio assistiti"* e la *"Realizzazione di un Web G.I.S. finalizzato alla gestione delle risorse geotermiche a bassa entalpia con sonde verticali*".

Università degli Studi di Palermo

Ha effettuato attività su "*Progettazione costruttiva di un sistema Solar DEC per Uffici e per il Test di un refrigeratore ad Acqua-Ammoniaca di tipo commerciale*".

ISES ITALIA

H portato avanti una attività di ricerca su "*Tecnologie solari a concentrazione per la produzione di calore a media temperatura*"**.**

Università di Padova

Ha portato avanti lo **"***Studio di sistemi di accumulo a cambiamento di fase nel solar cooling***".**

Politecnico di Torino

Ha portato avanti lo sviluppo di "*Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici*".

Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

(Referente G. Pede)

Il raggiungimento degli obiettivi nazionali fissati nel Piano d'Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica del 2011 richiede l'adozione di misure finalizzate al miglioramento dell'efficienza energetica nel settore trasporti (che assorbono circa il 25% dei consumi totali del paese (43 Mtep su 185 Mtep totali).

Una delle strade da percorrere è quella dell'elettrificazione dei sistemi di trasporto, sia per la diversificazione delle fonti che per i suoi minori consumi "dal pozzo alla ruota". L'elettrificazione del trasporto su strada è quella che richiede il massimo sforzo di ricerca e sviluppo, in specie per i problemi, ma anche le opportunità, derivanti dalla necessità di accumulo dell'energia. Altrettanto importante è l'alleggerimento dei mezzi, specialmente là dove è prevalente l'influenza su i consumi finale dell'inerzia del veicolo e dell'attrito. Agli effetti della riduzione dei pesi, l'alleggerimento del veicolo può essere perseguito sia tramite l'uso di nuovi materiali, come nuove tipologie di materiali polimerici e materiali metallici a struttura cellulare che con lo sviluppo dei processi tecnologici per la loro realizzazione.

In Europa e negli Stati Uniti, la produzione dei compositi a matrice polimerica sta passando da una fase in cui le applicazioni erano principalmente orientate a nicchie di mercato ad elevato valore aggiunto (aerospaziale e aeronautico ecc.) ad un'altra in cui ai settori tradizionali si affiancano applicazioni meno sofisticate e produzioni di massa in settori come quello automobilistico e dei beni comuni. Oltre all'interesse sempre presente verso i nanocompositi specie da parte dell'industria automobilistica (Toyota, General Motors) esistono altre due aree principali in cui sta crescendo l'interesse sia nel campo della ricerca che in quello industriale:

- sostituzione delle matrici termoindurenti con quelle termoplastiche in settori di mercato attualmente non coperti;
- utilizzo di resine e fibre da fonti naturali.

Nel campo dei materiali metallici cellulari, l'attività in Europa e nel mondo sulle schiume metalliche è invece in continuo fermento con innovazioni continue che vanno dallo sviluppo di procedimenti per la schiumatura delle leghe di acciaio per usi strutturali fino alla ibridizzazione con materiali polimerici per incrementare le proprietà di questi tipi di materiale e la realizzazione di sandwich multilayer da utilizzare in applicazioni speciali e scudi balistici.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E RISULTATI OTTENUTI

Lo sviluppo dell'attività nell'arco della durata del programma su due settori si ricerca principale: 1) lo sviluppo di componenti innovativi, 2) lo sviluppo dei materiali, con la seguente articolazione:

1) <u>Sviluppo di componenti innovativi</u>

- Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS (battery management system).
- Realizzazione e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida (hardware e software) e distribuita, dotati di possibilità di colloquio con i sistemi d'accumulo e con essi compatibili.
- Studio di altri sistemi avanzati di accumulo di energia, quali supercondensatori, e sistemi d'accumulo misti (batterie + supercondensatori).
- Sviluppo di azionamenti e convertitori di piccola potenza ad alto rendimento ed applicazione su prototipi di veicoli elettrici leggeri per uso urbano comprendente sistemi di ricarica rapida e distribuita.
- Life-Cycle Assessment energetico ambientale delle tecnologie suddette.

2) <u>Sviluppo materiali</u>

- Analisi delle caratteristiche degli AFS commerciali e sviluppo delle tecnologie di giunzione fra AFS e estrusi in lega di alluminio: saranno analizzati i materiali metallici cellulari strutturali commerciali ed eventuali precursori per una loro caratterizzazione in particolare per gli ASF che possono essere impiegati come materiale base per la realizzazione delle cellule di sicurezza dei mezzi di trasporto.
- Studio e sviluppo di processi per la fabbricazione di materiali metallici cellulari: saranno valutati i processi più adatti all'implementazione di processi di fabbricazione di materiali metallici cellulari a base di leghe di alluminio basati sulla MP e/o sull'iniezione di gas nel fluido. Lo studio riguarderà la definizione delle miscele lega additivi ottimali per l'omogeneizzazione della distribuzione della dimensione delle celle, e dei parametri operativi di processo gradienti termici di riscaldamento e raffreddamento.
- Sviluppo di processi per materiali cellulari ibridi polimero metallo: sviluppo dei processi di fabbricazione delle

microsfere cave con la tecnica del gocciolamento con doppio ago e definizione dei legami fra parametri di processo e dimensione e spessore delle microsfere; sviluppo del processo di amalgama e formatura fra materiali polimerici e sfere metalliche; definizione dei test di schiacciamento per la correlazione della dimensione del rinforzo in microsfere del tipo di matrice e del rapporto fra volume della matrice e volume delle sfere cave.

- Caratterizzazione del materiale base e delle giunzioni mediante test meccanici: sarà sviluppato un protocollo di qualificazione basato sul test di flessione su quattro punti. Lo stesso test sarà utilizzato per definire l'efficienza di giunzione fra AFS e fra AFS ed estrusi di alluminio.
- Sviluppo di procedure di progettazione e simulazione del comportamento di componenti per l'alleggerimento strutturale di vettori per il trasporto: saranno sviluppati codici di calcolo per la modellazione del comportamento di diverse tipologie di componenti in schiuma di alluminio e del comportamento di componenti complessi realizzati da pannelli AFS ed estrusi in alluminio validati sulla base dei test meccanici sperimentali.
- Realizzazione di componenti prototipali e loro caratterizzazione per la validazione delle metodologie di modeling: saranno individuati alcuni elementi rappresentativi: crashworthiness e/o elementi strutturali che verranno progettati con i codici di calcolo sviluppati per valutarne la resistenza e la capacità ad assorbire energia. Questi saranno realizzati, strumentati e testati in modo da verificare la congruenza fra dati sperimentali e dati numerici.
- Produzione dei materiali compositi a base di fibre naturali per impiego nella realizzazione di interiors: definizione dei legami costitutivi macro e microscopici che correlino il tipo di matrice, il tipo di rinforzo e la sua percentuale di utilizzo alle principali caratteristiche meccaniche. Individuazione dei test meccanici di caratterizzazione e comparazione. Realizzazione di componenti prototipali e loro caratterizzazione per applicazioni nella realizzazione di interiors a basso costo e peso ridotto.

Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS (Battery Management System).

Nel settore delle batterie per avviamento ed alimentazione ausiliari, risultano particolarmente stringenti i vincoli di compatibilità della tensione con quella di lavoro dei carichi dei veicoli (che varia tipicamente dai 13,5 ai 15 V) e la capacità di erogare alte correnti anche a freddo (CCA, Cold Cranking Amperes) ed in ambiente estremo (vibrazioni e temperature), oltre che l'economicità: tutti questi fattori sono necessari per affrontare la concorrenza della batterie al piombo acido che, essendo molto convenienti dal punto di vista del costo e molto affidabili tecnicamente, costituiscono ancora lo standard di fatto per tali applicazioni.

Gli studi effettuati hanno dimostrato che moduli da 12,8 V nominali realizzati con celle litio-ioni ferro fosfato (LFP) potrebbero essere una valida alternativa alle batterie al piombo attualmente impiegate, la cui sostituzione garantirebbe migliori prestazioni (una batteria d'avviamento Li-Ione da 18 Ah è già proposta come optional dalla Porsche, con prestazioni, dichiarate, superiori a quelle da 60 Ah tradizionali) ma anche un certo risparmio a fine vita. La scelta di tre capacità, 30 – 60 – 90÷100 Ah permetterebbe di coprire tutte le applicazioni di autoveicoli convenzionali. La medesima attività di studio ha inoltre dimostrato che nel campo della nautica da diporto, ove si usano moduli con tensioni nominali da 12 V e 24 V per l'avviamento dei motori di propulsione, gruppi elettrogeni ed alimentazione servizi, possono essere riutilizzati i risultati relativi alle applicazioni SLI stradali. I vantaggi sono dovuti alla riduzione di potenza propulsiva conseguente alla riduzione di massa, secondo la formula dell'Ammiragliato $P = c\ D^{2/3}V^3$ (P potenza, c costante, D dislocamento, V velocità). Si conferma l'impiego delle batterie LFP per le suddette ragioni di compatibilità di tensione, robustezza e costo. La particolarità dell'applicazione richiede comunque taglie di capacità superiori (100, 160÷180, 200 Ah) a quelle delle applicazioni stradali.

Nel campo della trazione ibrida, l'analisi dei veicoli presenti sul mercato e le interviste con i costruttori hanno evidenziato una molteplicità di situazioni, in funzione delle diverse tipologie di ibridi, dal micro ibrido al range-extender, e delle diverse tipologie di veicoli, da quelli a due ruote all'autobus, tale da non prestarsi al momento ad azioni di standardizzazione. Quanto ai veicoli elettrici a batteria, seppur ancora vera, per certi aspetti, la problematica riscontrata per i veicoli ibridi, la standardizzazione diventa invece possibile ed auspicabile quando ci si riferisce a particolari settori di nicchia (autobus, veicoli a 2 e 3 ruote, veicoli non stradali), ove operano piccole e medie aziende, già attive nel campo della trazione elettrica o ancora focalizzate per i mezzi di loro produzione su motorizzazioni diesel ed a benzina, le quali conferiscono all'industria nazionale una posizione di leadership in Europa.

In collaborazione con industrie ed associazioni del settore, è stato condotto a questo riguardo uno studio per una particolare nicchia di mercato, quello dei veicoli off-road,. Si è verificato che in questo settore, l'adozione della tensione standard 12 V e di due capacità, 120 e 180 Ah, permette di coprire tutte le applicazioni delle categorie

merceologiche considerate (macchine per cantieri edili, giardinaggio, pulizia strade, movimento terra, orticultura), vedi Figura 206.

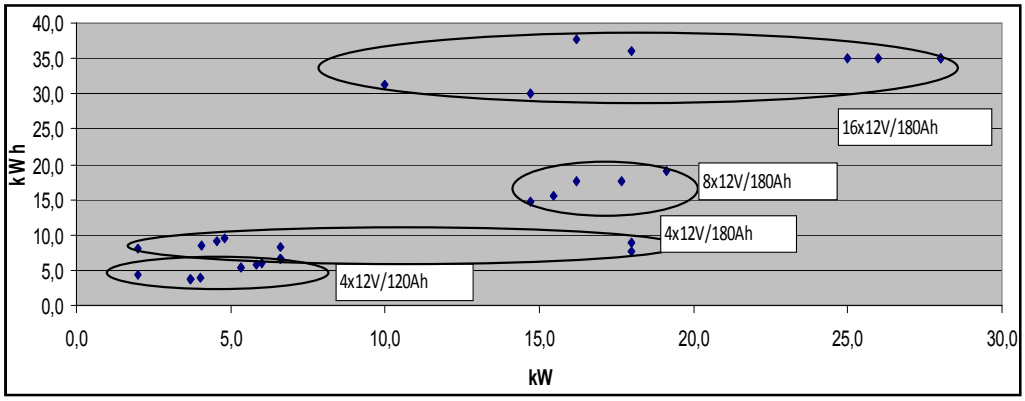


Figura 206. Distribuzione delle necessità, in potenze ed energia, per l'elettrificazioe delle macchine

I vantaggi dell'elettrificazione in tale campo si traducono sempre in riduzione dei consumi, rumore ed emissioni. il volume di vendita da noi stimato al 2020 per le versioni elettrificate corrisponde ad oltre 500.000 kWh, tra il 20 ed il 30% di quello previsto per le autovetture elettriche in pari data (3-4 % del mercato automobilistico).

Per tutte le categorie sopra citate sono state testati prodotti commerciali di quattro diversi fornitori, a livello di singola cella e di sistema. Dopo un confronto tecnico-economico che ha considerato oltre 50 prodotti commerciali ed è stato completato con prove al banco di due tecnologie, la nichel-cobalto-manganese (Figura 207), e quella ferro-fosfato, (Figura 208).

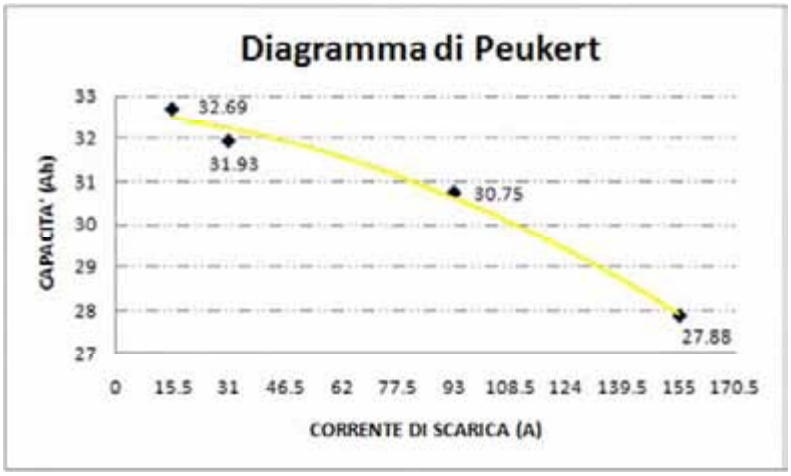


Figura 207. Cella NCM 31 Ah

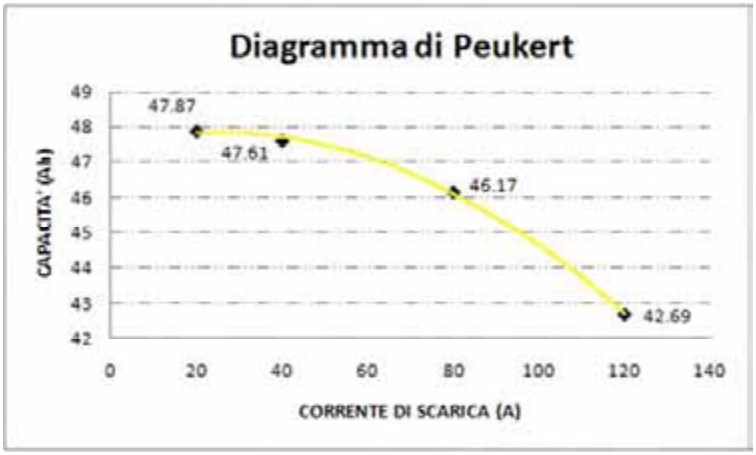


Figura 208. Cella LFP 45 Ah

La tecnologia ferro fosfato, già scelta per le batterie d'avviamento per considerazioni legate al range di funzionamento in tensione (vedi sopra), è stata preferita alle altre tecnologie litio-ioni per tutte le tipologie

suddette, in virtù del miglior compromesso costo/prestazioni e della maggiore sicurezza di gestione, pur mantenendo, rispetto alle corrispondenti batterie al piombo, un'apprezzabile riduzione di peso e volume: 15,8 kg contro 42,2 kg (Figura 209).

Figura 209. Batteria litio-ione LFP 12V- 100Ah (sinistra) ed piombo-acido equivalente (destra)

A conclusione dell'attività è stata affrontata la fase di progettazione dei moduli standard sopra definiti ed è stato emesso l'ordine di acquisto delle celle necessarie per la loro realizzazione.

Il modulo 12 V per applicazioni SLI stradali e, vista la sostanziale uguaglianza, quello per applicazioni navali, sarà costituito da 4 celle LFP in serie. Si rende però necessaria l'esecuzione di alcune prove sulle celle LFP acquistate per verificare la loro rispondenza ai requisiti di impiego. Di conseguenza la progettazione del modulo non ha potuto scendere nei dettagli, pertanto si è limitata all'esposizione delle problematiche generali e fondamentali (CCA, equalizzazione, vita, gestione termica) di cui dovrà tener conto la progettazione definitiva, una volta noti i risultati dei test.

Il modulo di piccola, media e grande taglia per la trazione elettrica pura, sopra definito, sarà anch'esso costituito da 4 celle LFP in serie. In questo caso non è necessario sottoporre le celle all'esecuzione di particolari test per la verifica dell'idoneità d'impiego, per cui la progettazione ha potuto definire con maggiore dettaglio le caratteristiche del modulo (Tabella 73).

Tabella 73. Data sheet modulo Li-Ioni standardizzato 12 V, in varie taglie

Caratteristiche elettriche principali del modulo per la trazione di veicoli off-road		
Tensione nominale [V]		12,80
Capacità nominale [Ah]		30 – 60 -100
Peso minimo [kg]		4,6 – 8,2 – 13,6
Energia specifica max. [Wh/kg]		83 – 94 - 94
Densità di energia max. [Wh/l]		135 – 136 - 138
Scarica @ +23 °C	Max, corrente cont [A]	90 – 180 - 300
	Picco @ 60 sec [A]	150 – 300 - 500
	Cut - off [V]	10
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (14,6 V)
	Max, corrente cont [A]	30 – 60 - 100
	Cut – off	15,4 V

E' stato sviluppato, infine, un sistema d'accumulo da 200 Ah / 48 V, adatto ad un'ampia serie di usi, dal piccolo trattore da giardinaggio alla piattaforma aerea alla motofalciatrice, la sperimentazione del quale fornirà utili elementi per la realizzazione del sistema che utilizzerà i moduli standardizzati da 12 V / 90 Ah.

Lo studio relativo alla motorizzazione elettrica di apparecchiature e veicoli non stradali si presta, infatti, ottimamente allo scopo, offrendo una notevole varietà di esempi.

E' stato scelto il campo di lavoro 48 V – 200 Ah, corrispondente a 9 ÷ 10 kWh, che ben si adatta a molte macchine della categoria "mezzi fuoristrada per giardinaggio". La versione preprototipale del sistema d'accumulo modulare, da sottoporre a test di laboratorio, è stata realizzata mediante batterie e BMS commerciali (Figura 210) ed è costituito da 2 linee di alimentazione, ciascuna realizzata mediante la serie di 4 moduli 12 V – 100 Ah, ognuno dotato del proprio BMS. In Figura 211 si riportano le curve prestazionali del sistema in oggetto.

Figura 210. Sistema d'accumulo modulare 48V-100Ah, completo di BMS

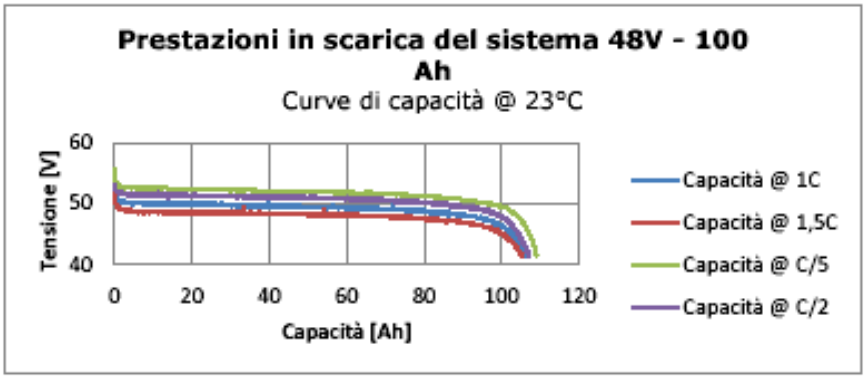


Figura 211. Caratteristiche di scarica del sistema 48 V/100 Ah

Il sistema d'accumulo si completa con una unità di controllo centrale, BMS di sistema., la cui necessità è evidenziata dalle due figure che seguono, che si riferiscono allo stato dei moduli prima (Figura 213) e dopo l'equalizzazione (Figura 212): i risultati delle prove sono stati utilizzati per l'emissione delle specifiche relative all'unità centrale BMS..

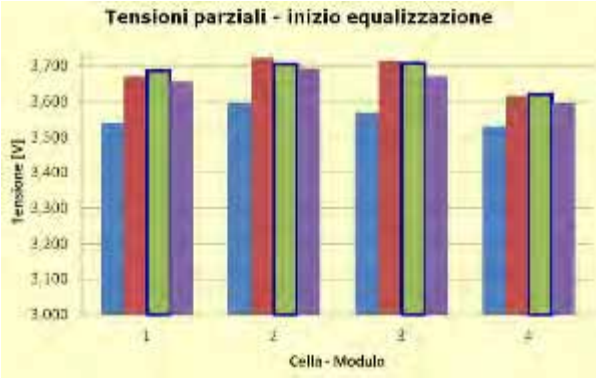


Figura 213

Figura 212

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

Le tecnologie d'accumulo atte a soddisfare i diversi requisiti di un veicolo a trazione prevalentemente elettrica, infatti, sono differenti in funzione della missione richiesta. Il primo criterio per la scelta del sistema è sempre quello di conciliare le caratteristiche di potenza ed energia del sistema di accumulo con le specifiche della missione da realizzare, e tra i sistemi di accumulo batterie e supercondensatori sono opposte, in termini di potenza ed energia specifica. I volani occupano una posizione intermedia. Le tecnologie di accumulo atte a soddisfare i requisiti dei veicoli elettrici sono quindi:

- batterie elettrochimiche: Piombo, Litio-ione, Nichel-Idruri, (veicoli puramente elettrici, plug-in, ibridi), passando progressivamente, per ogni tipologia, dalle versioni "di energia" a quelle "di potenza";
- volani;
- supercondensatori (veicoli ibridi).

Questa prima distinzione non esclude tutte le configurazioni miste di sistemi di accumulo dove, per esempio, in un veicolo puramente elettrico la batteria elettrochimica è supportata da un sistema di accumulo a supercondensatore per la gestione dei picchi di potenza, al fine di migliorare la gestione dei flussi di potenza ed aggiuntivamente la durata della batteria stessa. Lo studio è stato focalizzato sulle potenzialità applicative dei supercondensatori e degli accumuli misti, poiché, fino ad oggi, le applicazioni dei volani sono state veramente assai limitate. La linea di ricerca più promettente al fine di estendere l'impiego dei supercondensatori nelle diverse applicazioni è naturalmente l'incremento della densità di energia, che può essere perseguito in vari modi. Considerando la struttura di tali dispositivi esistono diversi approcci al fine di realizzare un aumento della densità specifica di energia, in particolare:

- aumentare la densità superficiale specifica degli elettrodi;
- innalzare la tensione di lavoro della singola cella;
- sfruttare un accumulo di energia combinato: sia elettrostatico che elettrochimico.

Tra i diversi metodi, la prima linea di ricerca è quella maggiormente esplorata e che sta' dando i migliori risultati. Diversi scienziati hanno proceduto in tal senso mostrando i vantaggi derivanti da una struttura degli elettrodi a nanotubi di carbonio piuttosto che nano porosa come negli attuali dispositivi commerciali. La struttura a nanotubi, essendo maggiormente ordinata, permette un maggior sfruttamento della densità superficiale degli elettrodi stessi. L'analisi l'uso di nanotubi di carbonio (VCNT-Vertical Carbon Nanotube) ha dimostrato la possibilità di realizzare celle di supercondensatori a 2,7 V nominali, caratterizzate da una densità specifica di energia sino a 21 Wh/kg, contro gli attuali 4-5 Wh/kg dei dispositivi attualmente disponibili in commercio.
Nell'ambito della seconda linea di ricerca, al fine di innalzare la tensione di lavoro della singola cella, l'obiettivo è quello di ricercare dei nuovi elettroliti capaci di sopportare tensioni di lavoro superiori a 3 V (limite attuale dei supercondensatori aventi come elettrolita organico l'acetonitrile), mantenendo le stesse performance fisico-chimiche sia in termini di operatività in un ampio range esteso di temperatura (-40 °C +65 °C) sia ad un costo industrialmente accettabile.

La terza linea di ricerca, infine, mira allo sfruttamento delle proprietà descritte come "pseudo-capacitanza". Il termine indica una rapida e reversibile reazione elettrochimica che imita quella dei supercondensatori a doppio strato basati su un processo di accumulo elettrostatico. La classe di materiali più promettenti per tali applicazioni include gli ossidi dei metalli di transizione, nitruri conduttivi e polimeri conduttori. Questi materiali possono essere combinati facilmente con quelli utilizzati per la costruzione delle tradizionali batterie elettrochimiche (ad esempio con la tecnologia piombo acido) realizzando così dispositivi asimmetrici, con prestazioni di potenza ed energia tali da coprire l'attuale range applicativo ottenibile dall'accoppiamento dei due dispositivi distinti (accumulo misto, vedi di seguito).

Passando quindi all'accumulo misto, le attività svolte nell'ambito del progetto hanno preso in considerazione solo quelli ottenuti implementando la tecnologia dei supercondensatori (SC) nei sistemi piombo-acido, soprattutto perché solo per questi si disponeva di risultati sperimentali pregressi, soprattutto di origine ENEA, ma nulla esclude la possibilità di considerare accumuli misti che sfruttino, per la sezione "energia", batterie a Li-Io, ad alta energia specifica, più economiche di quelle ad alta potenza specifica.

Le batterie piombo acido rappresentano comunque la tecnologia di accumulo maggiormente consolidata e sperimentata. I suoi principali vantaggi riguardano sia la ormai diffusa conoscenza delle prestazioni di tali sistemi di accumulo, sia i criteri di progettazione degli stessi al fine di realizzare una batteria con specifiche caratteristiche meccaniche/elettriche. Inoltre, la possibilità di utilizzare tali sistemi in configurazioni serie e parallelo senza particolari circuiti di monitoraggio e bilanciamento rappresenta un notevole vantaggio nelle applicazioni industriali di potenza.

L'unica vera limitazione risiede nella bassa densità di energia di tali dispositivi a confronto con gli accumuli elettrochimici più innovativi, svantaggio particolarmente significativo negli usi di trazione, fatta eccezione per alcune categorie (muletti e trattori per l'industria). L'energia estraibile da tali dispositivi è poi fortemente funzione del profilo di corrente di scarica, sia della corrente media che della corrente efficace, ed Infine tanto maggiore è la possibilità del dispositivo di accumulo elettrochimico di funzionare a corrente costante, tanto più la vita attesa, in termini di cicli di vita, si avvicina ai valori dichiarati dai costruttori.

Dualmente i sistemi di accumulo elettrostatici basati sulla tecnologia a supercondensatore presentano a fronte di un limitato accumulo di energia in termini di densità di energia, un'elevata densità di potenza e un elevatissimo numero di cicli di vita (sino a 1 milione).

La possibilità di disporre di sistemi di accumulo di potenza da accoppiare ai sistemi di accumulo tradizionale piombo acido permette quindi di realizzare la funzione di peak-shaving al fine di raggiungere i benefici sopra elencati.

Lo studio effettuato per la valutazione dell'incremento di durata possibile per le batterie piombo-acido "assistite" da un banco SC, studio reso possibile dai dati relativi alle prove di durata eseguite in ENEA negli anni passati su batterie piombo-acido per uso "auto motive", è sintetizzato nella Tabella 74, relativa a due dimensionamenti possibili per un accumulo elettrico misto per una micro vettura (batteria piombo-acido da 10 kWh e 15 kW continuativi) , e per confronto lo stesso accumulo senza SC.

Ipotizzando una durata del veicolo pari a 70000 km, in Tabella 74 sono confrontati i tre casi:

Tabella 74. Tre casi a confronto: batterie da sole vs. batterie assistite da SC, di due taglie distinte

Taglia	Costo €	km percorsi con un pacco batterie km	Sostituzioni pacco batterie in 70000 km	Costo totale batterie in 70000 km €	Costo totale sistema di accumulo €	Costo chilometrico totale €/km
40 Wh – 7 kW	1900	21600	3	6000	7900	0,11
100 Wh – 11 kW	4100	29400	2,4	4800	8900	0,13
Solo pacco batterie 10 kWh			**5,8**	**11600**		**0,17**

Le valutazioni sperimentali delle potenzialità applicative della tecnologia sono state condotte in ENEA e presso il Laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova, inizialmente su batterie piombo-acido soggette a diversi regimi di scarica, e successivamente con un sistema a 48 V, realizzato nell'ambito del programma, sia a Padova che in ENEA.

Il sistema è costituito da classiche batterie da trazione piombo-acido (6 V/200 Ah) e supercondensatori, un banco serie x parallelo 4x2 formato da moduli Maxwell BMOD0250P016 B02 da 250 F/16 V. I flussi di potenza sono gestiti da una interfaccia sviluppata in collaborazione con Padova.

Il sistema è stato pensato per un quadriciclo, per il quale è di seguito riportato lo schema elettrico funzionale (Figura 214).

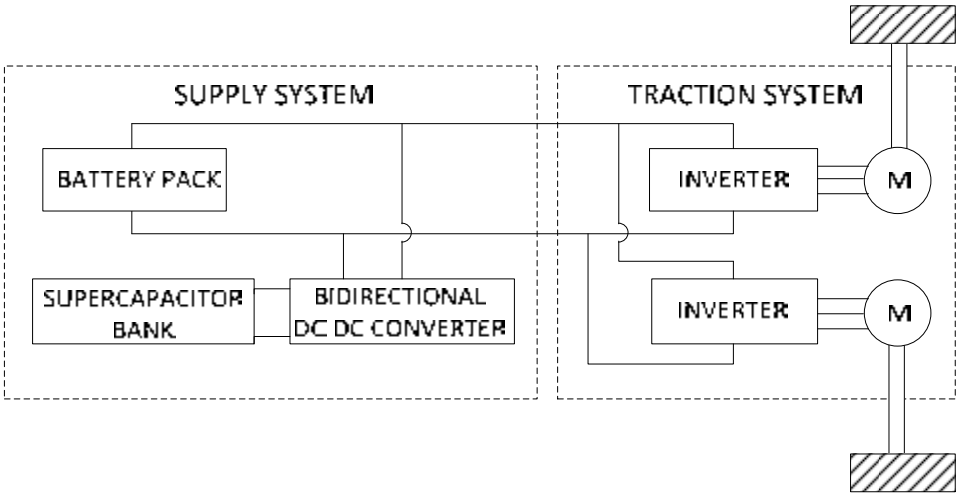


Figura 214. Schema elettrico funzionale del quadriciclo

Tra le numerose prove eseguite, si riporta, a titolo d'esempio, la Figura 215 relativa all'avviamento di un motore brushless, dove sono riportate la corrente assorbita dall'inverter, traccia verde; la corrente fornita dal banco di supercondensatori, traccia arancione, e la corrente di batteria, traccia rosa. I tracciati mostrano che il carico è sostenuto in massima parte dal banco di supercondensatori mentre l'intervento della batteria è minimo e si prolunga oltre il transitorio per effettuare la ricarica del banco SC.

Lo studio del sistema ha permesso, inoltre, di valutare l'incremento di "capacità estraibile in cicli dinamici" e quindi di autonomia del veicolo, consentita dall'uso dei supercondensatori, che può arrivare a superare il 10% (Figura 216).

Ogni valutazione alla base del dimensionamento di un sistema d'accumulo "misto", dovrà perciò tenere nel dovuto conto anche questo elemento di confronto, oltre alle considerazioni di carattere tecnico-economico relative all'incremento della durata delle batterie.

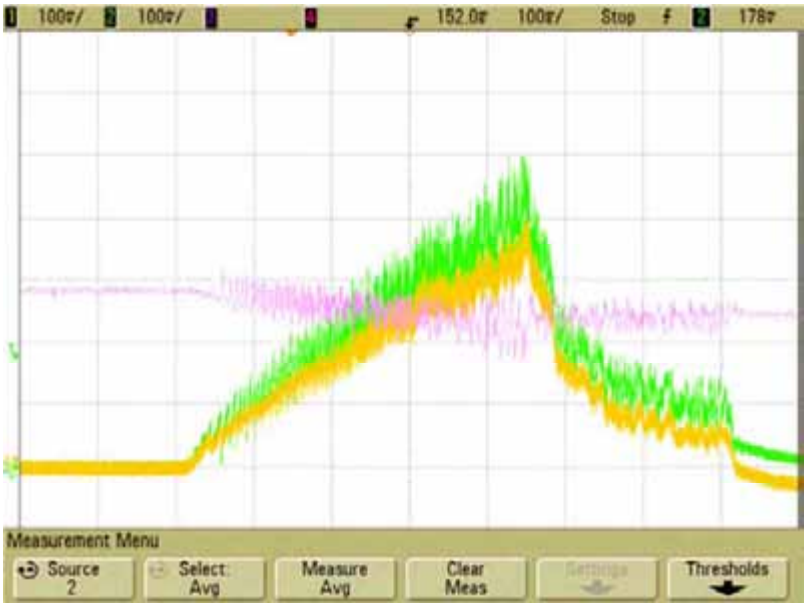


Figura 215. Correnti erogate dal banco SC e dalla batteria, assorbita dall'inverter di un motore brushless DC, durante un transitorio di avviamento (scala correnti 10A/div; scala tempo 100ms/div)

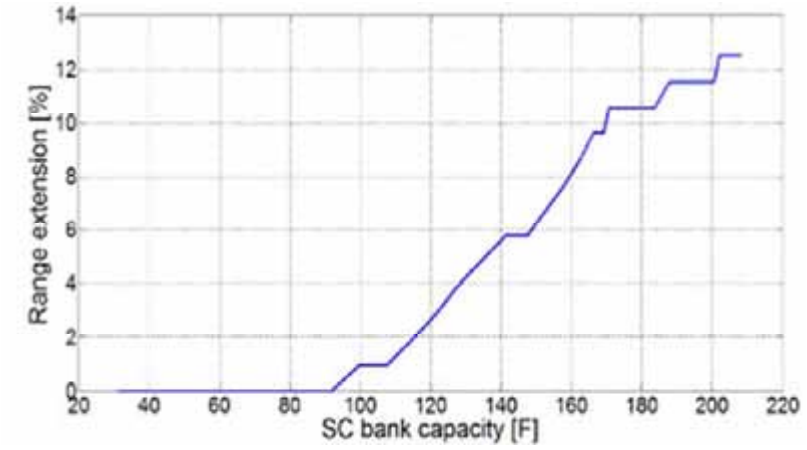


Figura 216. Incremento dell'autonomia in funzione della capacità del banco SC

In conclusione, lo studio e le sperimentazioni svolte hanno permesso di correlare, seppur limitamente all'accoppiamento batterie piombo-acido/supercondensatori, la capacità del banco SC aggiunto con l'incremento di autonomia di un veicolo equipaggiato originariamente con la sola batteria tradizionale e di quantificare l'incremento di vita utile per batterie della stessa tipologia.

L'aumento della durata delle batterie, riducendo drasticamente la frequenza di sostituzione del pacco, compensa il maggior costo del sistema misto, abbattendo il costo chilometrico dell'uso del veicolo (quella parte dovuta alle batterie) fino ad un massimo del 30%. La soluzione più conveniente è quella che prevede il pacco supercondensatori più piccolo, capace di erogare una potenza pari al 50% (circa) della potenza del pacco batterie da solo (7 kW vs. 15 kW).

Questo secondo risultato è indubbiamente ancora più significativo dell'incremento di autonomia, perché dimostra la convenienza economica di un possibile retrofitting dei sistemi di accumulo installati sulla generalità dei veicoli industriali, utilizzando un kit di conversione (SC+DC/DC converter) in grado di "tagliare" in misura adeguata i picchi di potenza richiesti alla batteria originaria.

Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida

Le linee di attività sono state:

- Convertitori di piccola potenza ad alto rendimento per l'uso in veicoli elettrici leggeri;
- Sistemi di ricarica rapida.

Per quanto riguarda la prima linea di attività, in particolare, l'ENEA, a valle di una precedente esperienza nel settore delle micro vetture, ha valutato le necessità energetiche di una micro vettura, con ogni possibile schema di trazione ibrida o puramente elettrica. Utilizzando dati sperimentali ottenuti su un proprio prototipo ibrido di micro vettura circolante presso la sede ENEA della Casaccia (Figura 217, la Urb-E) è stato possibile realizzare un modello matematico del sistema di propulsione sufficientemente modulare da permettere al simulazione di molte altre configurazioni progettuali, ottenendo interessanti informazioni sul bilancio energetico, non solo del veicolo, ma di suoi singoli componenti.

Figura 217. Il prototipo Urb-e di ENEA

A titolo esemplificativo, si riportano in Figura 218 gli andamenti temporali delle principali grandezze di bordo ed il bilancio energetico del veicolo su un ciclo di prova ECE, caratteristico dell'ambito urbano, con una configurazione di propulsione ibrida con un generatore elettrico di bordo a fuel cell ed un accumulo a batterie litio.

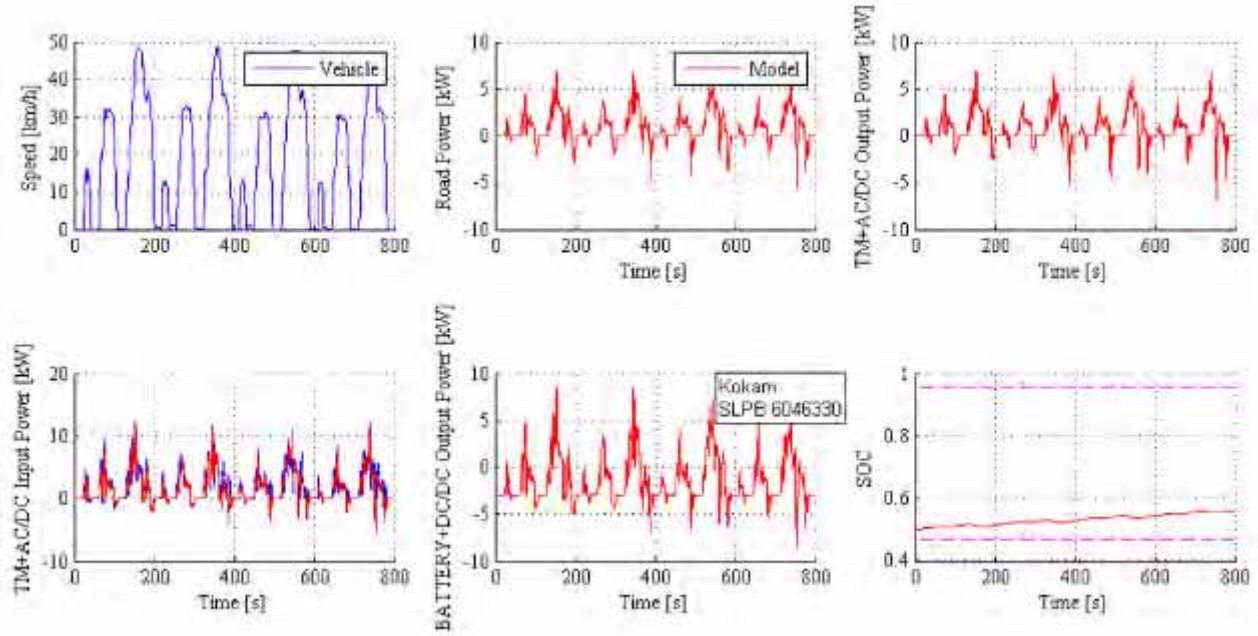


Figura 218. Andamenti temporali

Utilizzando lo stesso modello, è stato infine studiato anche il comportamento dell'accumulo per due versioni puramente elettriche del veicolo, equipaggiate da due differenti sistemi litio ioni.

Per quanto riguarda l'attività sperimentale sul prototipo Urb-E, questa nell'ultimo anno di attività è stata convertita in una versione puramente elettrica, alimentata da un accumulo misto batterie/supercapacitori. La vettura è attualmente in fase di test, in una versione preliminare che ancora non monta né le batterie Li-Ione, né il convertitore DC/DC di derivazione commerciale scelto dall'Università dell'Aquila. A partire dai dati ottenuti dall'ENEA, il gruppo di ricerca dell'Università dell'Aquila si è infatti concentrato sull'uso dei convertitori DC/DC nella trazione ed ha operato la scelta di un componente per microcar, considerandone efficienza, costo ed affidabilità. La reperibilità sul mercato di convertitori idonei si è rivelata più difficile del previsto. Al termine è stato approvvigionato un componente, prodotto dalla statunitense Zahn Electronics, i cui valori di targa sono riportati in Tabella 75. Si può notare che i valori della minima e della massima tensione del pacco batterie sono interni all'intervallo della tensione di ingresso nominale del convertitore. Dato il valore massimo della tensione di ingresso di 160 V, è possibile anche aumentare il numero delle batterie in serie al fine di aumentare l'autonomia del veicolo. La tensione di uscita può essere scelta in un intervallo che comprende la tensione di 84 V del link ed è controllata con controreazione dal convertitore stesso.

Tabella 75. Caratteristiche di targa del convertitore scelto

V_{IN} [V]	V_{IN} V	I_{OUT} continuativa [A]	I_{OUT} picco A	P_{OUT} (@V_{out}=90 V) [W]	Frequenza di commutazione [kHz]	Modello	Prezzo [$]
80 ÷ 160	0 ÷ 155	+/-45	+/-80	4050	31,25	CH20045-S, LC225s	2304

Per quanto riguarda la potenza nominale, il convertitore risulta essere sovradimensionato, ma non così come potrebbe sembrare. La potenza di uscita è infatti data alla tensione di 90 V ed è calcolata come prodotto tra 90 V e 45 A (corrente nominale di uscita continuativa). Nel caso specifico, essendo la tensione di uscita di 84 V, la potenza nominale scende da 4050 W a 3780 W e il convertitore è sovradimensionato in potenza del 20,6%, valore sicuramente accettabile, considerando che è un prodotto commerciale.

Il CH20045-S, LC225s è un convertitore compatto 2 quadranti ad alte prestazioni, di tipologia buck realizzato con un semiponte H a MOSFET di potenza. Generalmente richiede un filtro di uscita *LC* esterno. La dinamica è elevata, data l'elevata frequenza di commutazione di 31,25 kHz. Comprende, inoltre, sensori di corrente a effetto Hall per il possibile controllo della corrente di uscita ed è protetto da sovratemperatura, riducendo in automatico la corrente erogata nel caso in cui la temperatura ambiente sia così elevata da non permettere un adeguato raffreddamento.

Per quanto riguarda la linea di attività sulla ricarica rapida, l'ENEA si è concentrata sul testing di sistemi di accumulo per vetture di piccola e media dimensione, che potessero essere ricaricati al massimo in un'ora. In particolare sono stati individuati due sistemi di accumulo agli ioni litio prodotti dalla Dow Kokam (31 Ah) e dalla Thundersky (45 Ah).

I due prodotti sono differenti per caratteristiche dichiarate, tipologie di chimica di cella e costi. Si evidenzia il costo più di tre volte maggiore della batteria Kokam, rispetto alla Thunder-sky, costo che corrisponde però anche ad una migliore qualità ed efficienza del sistema. Gli intervalli di tensione sono quelli comuni ai due tipi di cella: la cella Kokam, ad elettrolita polimerico, ha un intervallo più ristretto (2,7 V – 4,2 V) rispetto Thunder-sky (2,5 V – 4,25 V) ma presenta una tensione nominale maggiore (3,7 V contro 3,2 V): ciò favorisce un maggior contenuto energetico e di potenza a parità di corrente di scarica.

Le batterie hanno lo stesso rate di corrente di scarica (10 C corrente di picco, 3 C corrente continua) mentre si differenziano sul rate di corrente di carica (2 C corrente continua per Kokam contro i 3 C corrente continua della Thunder-sky). In termini di massa la Thunder-sky ha un peso maggiore, il che influisce negativamente in termini di energia specifica (133,37 Wh/kg Kokam > 90 Wh/kg Thunder-sky) e potenza specifica di picco (1,374 kW/kg Kokam > 900 kW/kg Thunder-sky). Ai fini della ricarica rapida, le caratteristiche misurate non si sono discostate in maniera rilevante da quelle dichiarate dal costruttore ed entrambi i prodotti hanno dimostrato di poter assorbire le correnti dichiarate. Tuttavia il prodotto della Kokam presenta un comportamento decisamente migliore sia dal punto di vista della efficienza di capacità (97,9% contro 93,5%), sia soprattutto dal punto di vita della efficienza di ricarica energetica (98,4% contro 80,3%) durante processi di ricarica a 2C (30 minuti per una ricarica completa a corrente costante). A titolo esemplificativo delle prove effettuate, si riportano qui nel seguito gli andamenti ricavati durante alcune prove di carica rapida su due celle di diversa tipologia (Figura 219 e Figura 220).

Per quanto riguarda il sistema di carica ultrarapida, dove è necessario un convertitore controllato AC/DC di potenza adeguata, ovvero di potenza non inferiore a 100 kW, per problemi relativi al fattore di potenza e al THD (Total Harmonic Distosion factor) delle correnti assorbite, tale convertitore deve necessariamente essere a

commutazione forzata con PFC (Power Factor Corrector) e dato l'ingombro e il peso non può essere montato a bordo del veicolo.

Anche se è possibile utilizzare, per la carica delle batterie, l'elettronica di potenza già presente a bordo per il normale funzionamento del veicolo, i tempi ridotti in gioco ne limitano l'applicazione alla ricarica rapida (1 ora). Ad esempio, molti veicoli elettrici di piccola-media taglia sono equipaggiati con motore asincrono di potenza continuativa pari a 30 kW e potenza di picco di 60 kW. La minima potenza continuativa dell'inverter - ipotizzando un fattore di potenza del motore pari a 0,8 - è di circa 40 kVA, che in fase di carica corrispondono a 40 kW in presenza di PFC. Ammettendo anche una potenza superiore del 20% (circa 50 kW), se si vuole utilizzare il convertitore di bordo anche per la carica ultrarapida, è pertanto necessario sovradimensionarlo, rispetto alla potenza di trazione, circa del 100%. Si aggiunga che il convertitore a bordo deve essere "universale", nel senso che deve poter funzionare con diversi livelli di tensione alternata e a diverse frequenze industriali. In particolare il funzionamento con diversi livelli di tensione non permette di ottimizzare l'efficienza del convertitore e può determinare una diminuzione della potenza nominale per bassi valori della tensione di alimentazione. Sulla base di queste considerazioni si può quindi concludere affermando che per la ricarica ultrarapida il convertitore deve essere a terra.

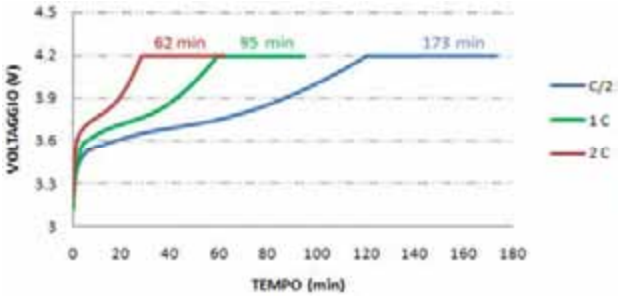


Figura 219. Prove carica-scarica a corrente costante – Kokam – V vs tempo

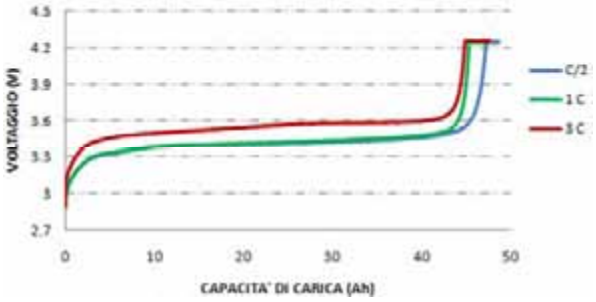


Figura 220. Prove carica-scarica a corrente costante - Thunder-Sky – V vs Ah

Life Cycle Assessment energetico ambientale delle tecnologie

L'ENEA e il Dipartimento dell'Energia (ex Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali – DREAM) dell'Università degli Studi di Palermo hanno sviluppato uno studio LCA per valutare gli impatti energetico–ambientali connessi alla produzione (escluso l'assemblaggio) di celle basate sulla tecnologia ferro-fosforo da impiegare nelle batterie di avviamento di auto elettriche. L'attività consiste nella valutazione delle prestazioni energetico – ambientali realizzata tramite l'applicazione della metodologia dell'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA), in accordo alle norme della serie ISO 14040 e con l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. La descrizione dettagliata della metodologia utilizzata e delle linee guida di riferimento per il settore è fornita nel rapporto tecnico "Applicazione della metodologia Life-Cycle Assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione".

L'attività è stata sviluppata attraverso tre fasi consecutive.

Analisi dettagliata dello stato dell'arte internazionale sulla LCA applicata alle batterie

Tale analisi ha definito il contesto scientifico di riferimento alla base della valutazione energetico-ambientale. Dall'analisi degli studi rilevati in letteratura, la cui sintesi è riportata nel Rapporto di dettaglio "Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche", sono emerse delle considerazioni sia di carattere metodologico che applicativo, che sono state utili per la definizione delle scelte metodologiche intraprese nello studio di LCA delle batterie per autotrazione. In particolare secondo la letteratura scientifica più recente, la fase d'uso è la maggior responsabile della quota degli impatti ambientali di una batteria. In particolare, sebbene il litio sia presenta nella crosta terrestre con una concentrazione inferiore a 0,01% e quindi si debba considerarlo un metallo a scarsa disponibilità, in una batteria a Litio-Ione, il contenuto di litio è molto piccolo (circa 0,7% - 1,4% in peso) e quindi è piccolo anche il suo impatto sulla categoria Abiotic Resource Deplation. Inoltre, essendo il processo di estrazione e raffinazione del litio non è particolarmente energivoro, è piccolo anche il suo contributo ad altre categorie di impatto correlate con il consumo energetico. Invece gli altri metalli presenti nella batteria e nel BMS e i processi di realizzazione danno un contributo significativo. Un aspetto da approfondire è inoltre il potenziale di risparmio di risorse derivanti dal riciclaggio delle batterie.

LCA delle batterie per autotrazione

E' stata condotta una valutazione dei sistemi batterie tramite l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment. Come prescrive la norma ISO 14040 per valutare le prestazioni energetico – ambientali delle batterie, è stata effettuata una raccolta dati secondo un approccio di ciclo di vita, relativamente alle fasi di produzione, uso e fine vita. I risultati ottenuti sono sintetizzati in specifici indici prestazionali relativi ai consumi di risorse ed agli impatti ambientali e hanno permesso di stimare le prestazioni energetico – ambientali del prodotto in esame e di individuare le fasi del ciclo di vita caratterizzate dai maggiori impatti. Relativamente al consumo di energia primaria i risultati ottenuti hanno evidenziato che la fase d'uso delle batterie è responsabile dei maggiori impatti energetico – ambientali (circa il 67-77%) durante l'intero ciclo di vita. Trascurabile risulta invece la fase di fine vita, i cui impatti sono inferiori al 2% del totale. La fase di produzione incide sul totale degli impatti energetico-ambientali per una percentuale variabile dal 21 al 31%. Si sottolinea che i dati relativi ai materiali e ai componenti delle celle, che rappresentano l'elemento fondamentale della batteria, sono stati forniti direttamente dall'azienda produttrice. Lo studio andrebbe ulteriormente implementato ricorrendo a dati primari anche per altri processi del ciclo di vita della batteria (in particolare sui dati relativi ai processi produttivi). Lo studio di LCA completo è descritto nel rapporto tecnico "Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche".

Organizzazione dei dati primari in formato ILCD-compliant

I dati raccolti (data sets primari) nella fase di Life Cycle Inventory (LCI) sono stati organizzati in formato ILCD-compliant in accordo con l'ILCD "International reference Life Cycle data System-ILCD Handbook", linee guida internazionali per l'applicazione dell'LCA sviluppate recentemente dal Joint Research Centre. I data sets primari possono costituire un importante base per la realizzazione di una banca dati di LCA specifica di settore valida in ambito nazionale, conforme alla banca dati dell'European Platform on Life Cycle Assessment. I data sets sono stati organizzati in file Excel che contengono i dati di inventario e i dati sugli impatti della fase d'uso delle batterie in formato ILCD-compliant.

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

L'obiettivo dell'attività si può riassumere in tre fasi.

La prima fase prevede l'analisi dello stato dell'arte e la valutazione delle caratteristiche chimico fisiche dei materiali commerciali, fra i quali gli AFS (Aluminum Foam Sandwich) e i verdi (precursori). La caratterizzazione è stata effettuata mediante analisi di microscopia ottica e SEM (Scanning Electron Microscope) per la definizione della distribuzione dei costituenti.

La seconda fase, effettuata attraverso test schiumatura di precursori commerciali su scala di laboratorio, è mirata ad individuare i parametri limite per i processi sia di compattazione sia di schiumatura che associati a dati di letteratura permettono di identificare le caratteristiche delle apparecchiature per la realizzazione di un apparato prototipale per la produzione di precursori e schiume metalliche che possano essere impiegati nel riempimento di forme (estrusi di alluminio o scatolati in acciaio).Questa attività ha come risultato finale l'individuazione delle caratteristiche dei componenti principali quali: pressa di adeguata capacità per compattazione /estrusione a pressioni superiori a 200 MPa di componenti di dimensioni rappresentative,;apposito forno con controllo del gradiente di temperatura, sistema di raffreddamento che blocchi il processo di schiuma tura e sistemi di monitoraggio del processo (ottico e chimico).

La terza fase è stata mirata allo sviluppo di un protocollo di qualifica meccanica macrostrutturale degli AFS basato su test a flessione su tre e quattro punti che permettono di valutare resistenza a flessione e all'indentazione. I dati sperimentali potranno essere utilizzati per la validazione di modelli di calcolo su componenti di maggiore complessità. Di seguito una breve descrizione riepilogativa della ricerca effettuata.

Analisi dello stato dell'arte e valutazione delle caratteristiche chimico fisiche dei materiali commerciali

L'analisi dello stato dell'arte sulla produzione delle schiume metalliche ha messo in evidenza la possibilità di produzione di schiume metalliche di molteplici tipi di materiali e con diverse tecnologie fra le quali la più promettente per componenti in lega di alluminio è certamente il metodo di metallurgia delle polveri. Questo metodo, infatti, consente di ottenere con una buona flessibilità sia con processi di produzione continua che discontinua elementi strutturali, come estrusi pieni o Aluminum Foam Sandwich, che possono trovare varie applicazioni nel settore dei trasporti. In particolare, nei grandi mezzi di trasporto come autobus, treni e navi esistono alcuni esempi di applicazione dei pannelli AFS con main frame in alluminio nella realizzazione di fiancate e duomi. La qualificazione chimico fisica è stata effettuata da un lato con analisi SEM, EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) e FIB (Focused Ion Beam) di materiali commerciali, sia sotto forma di pannelli AFS sia sotto forma di precursori, dall'altra con prove calorimetriche e test meccanici.

I risultati hanno evidenziato come per quanto riguarda i pannelli AFS si abbia una sostanziale differenza fra il materiale delle pelli ed il materiale delle celle delle schiume il cui corretto abbinamento, in termini di composizione e quindi di temperature di fusione, è indispensabile per poter ottenere il prodotto finale.

Anche i precursori commerciali, caratterizzati dal punto di vista sia metallurgico che calorimetrico mediante una campagna di prove mediante DSC (Differential Scanning Calorimeter), hanno evidenziato peculiarità differenti in termini di temperature di schiumatura. In particolare, i precursori il $AlSi_{10}$, lega prossima all'eutettico dell'alluminio con il silicio, hanno evidenziato una temperatura di schiumatura più bassa che meglio si adatta alla realizzazione di componenti compositi in alluminio e schiuma di alluminio (vedi AFS o estrusi rinforzati). Al contrario, i precursori a base di $AlMgSi_{0,6}$ da un lato permettono di ottenere una schiuma più resistente, grazie agli effetti di indurimento della matrice di alluminio da parte dei precipitati di magnesio, ma per i quali allo stesso tempo aumenta la temperatura di schiumatura per cui non rendono possibile l'accoppiamento con leghe di alluminio. Quest'ultimo tipo di precursore meglio si adatta alla realizzazione di componenti ibridi con involucro in acciaio e riempimento in schiuma a maggior capacità di assorbimento di energia.

Lo studio avviato su forni di tipo commerciale esistenti non ha fornito i risultati attesi, per la necessità di avere un sistema di raffreddamento rapido per "congelare" in modo quasi istantaneo il processo di schiumatura.

Questo ha portato ad effettuare uno studio su piccola scala in DSC su pasticche di pochi mg di peso considerando 5 livelli di temperatura da 580 °C a 620 °C e 3 livelli di tempo (2, 3 e 4 min). Le pasticche ricavate per tornitura da una barra di precursore in AlSi10 hanno una densità media di 2,598 g/cm^3 e deviazione standard di 0,015 g/cm^3. Successivamente è stato eseguito un secondo piano sperimentale utilizzando due livelli di temperatura (615 e 620 °C) e tre livelli di tempo (1; 1,25; 1,5 min). La schiumatura in DSC permette di portare rapidamente il campione in temperatura, controllarne perfettamente la temperatura ed effettuare un raffreddamento estremamente rapido consentendo di effettuare uno studio sull'influenza dei due principali parametri di schiumatura.

Per quanto riguarda i test di schiumatura e la determinazione dei range di composizione e le temperatura e tempi di schiumatura, nel corso di questo primo anno l'Università Tor Vergata ha condotto degli studi per la produzione di schiume di alluminio su scala di laboratorio ottimizzando i parametri in termini di tempi, temperature, e contenuto e dimensioni di SiC e TiH_2 . Gli studi condotti su pellet di diametro 15 mm ed altezza di 6 mm andranno replicati per verificare se, per la realizzazione di componenti di maggiore dimensione, le condizioni in termini di tempi di miscelazione, pressioni di compattazione, tempi e temperature di schiumatura debbano subire modifiche legate sia alle dimensione dei componenti che alla dimensione delle diverse apparecchiature utilizzate.

A partire dallo studio ENEA con DSC, da quelli condotti dall'Università Roma Tor Vergata e considerando i dati di letteratura è stato identificato quello che il Layout di massima di un impianto pilota per la produzione di schiume metalliche e le caratteristiche delle apparecchiature che sono state acquistate dedicate al progetto.

L'impianto rappresenta una configurazione di dimensioni intermedie che permette di studiare i fenomeni di upscaling del processo produttivo in modo discontinuo di schiume, pannelli e componenti in schiuma fino ad una dimensione di 200 x 400 x 100 mm con un investimento limitato. La Figura 221 mostra una schematizzazione con i reali componenti. L'impianto è suddiviso in 3 zone. La prima di miscelazione/macinazione/*ball milling* dove miscelando opportunamente gli elementi costituenti la lega di alluminio, gli elementi nucleanti (SiC) e il componente schiumante (TiH_2) vengono prodotte le miscele. La seconda zona di compattazione delle miscele che pressate in apposite matrici realizzano i precursori che debbono avere densità relativa non inferiore al 95% della lega base. La pressione di compattazione è usualmente compresa fra i 200 ed i 250 MPa e per aumentare la densità del precursore può essere prevista un successiva fase di estrusione del precompattato.La terza zona riguarda la schiumatura del precursore in appositi stampi o, se l'accoppiamento involucro schiuma lo consente, in gusci (profilati estrusi o componenti) di appropriate leghe di alluminio.

Per evitare di ridurre l'effetto dello schiumante è prevista l'introduzione degli elementi da schiumare a forno caldo ed il raffreddamento rapido dopo un prestabilito periodo di tempo per evitare il coalescere delle celle della schiuma con conseguente perdita delle caratteristiche. Questo ha reso necessario la realizzazione di un forno apposito con doppia camera (calda e fredda). Inoltre, al fine di studiare gli effetti di *upscaling* durante le fasi di schiumatura, il fono è stato dotato di una finestra ottica per l'osservazione dell'espansione mediante misuratore ottico e di un analizzatore di miscele di gas binarie con sensore a conducibilità termica. Tale strumento è necessario per misurare on-line l'evoluzione dell'idrogeno che si sviluppa durante i trattamenti termici delle miscele leghe metalliche/agente schiumogeno (es TiH_2) e valutare l'effetto dell'uscita del gas sulla morfologia finale del solido. Per quanto riguarda gli aspetti di caratterizzazione meccanica dei materiali commerciali, questa ha previsto lo sviluppo di un protocollo di qualifica meccanica per pannelli AFS. In particolare, è stata sviluppata sulla base della ASTM C 393 una apparecchiatura per prove a flessione su 3 e 4 punti che è stata installata presso il laboratorio di prove meccaniche di ENEA Casaccia.

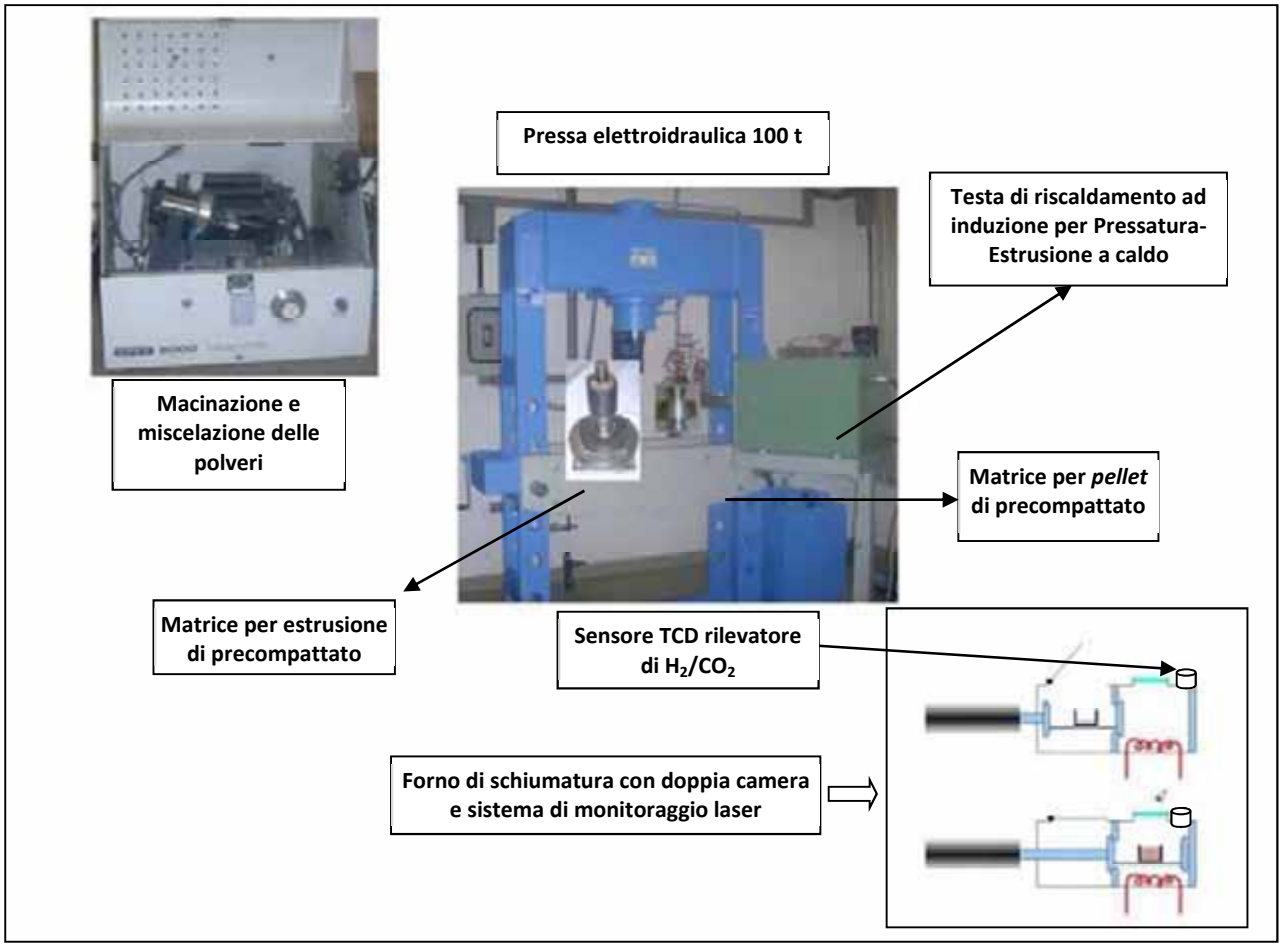


Figura 221. Schema dell'impianto pilota per la produzione di schiume metalliche

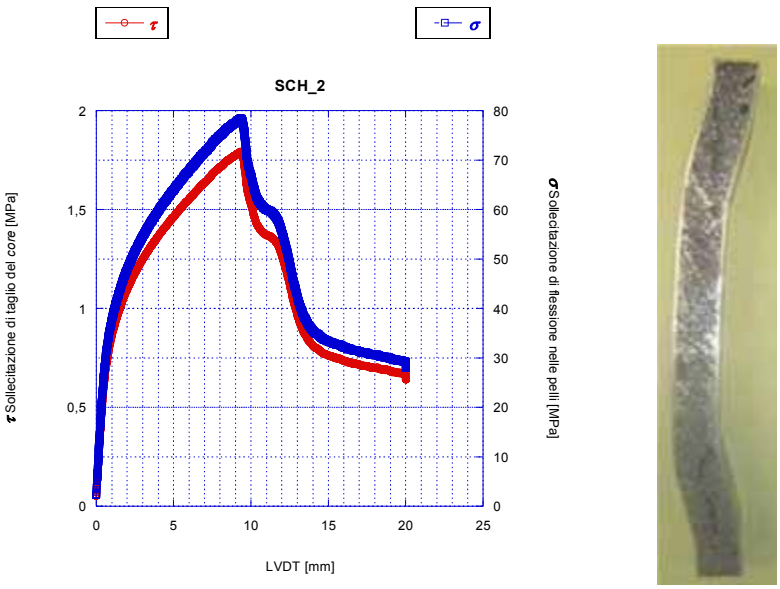


Figura 222. Andamento delle tensioni nel pannello AFS in funzione della deflessione ed aspetto a rottura del campione

Il test permette di determinare la tensione di sollecitazione a flessione nelle pelli e la sollecitazione a taglio del *core*. Come mostra la Figura 222 la resistenza a flessione dei pannelli raggiunge circa 80 MPa, mentre la resistenza a taglio del *core* è molto limitata, ma consente comunque di avere un pannello di buone caratteristiche in linea con i dati di letteratura.

Sviluppo di tecnologie di giunzione

Obiettivo dell'attività è stato lo sviluppo delle tecnologie di giunzione, con particolare riguardo alle tecnologie di saldatura a basso apporto termico indispensabili per la realizzazione di forme complesse ed il collegamento degli AFS a strutture primarie di tipo tradizionale. Sono stati privilegiati i processi di saldatura ad elevata densità di energia che riducono le deformazioni locali indotte dall'attivazione dell'agente schiumante e riducono la zona alterata del materiale garantendo al contempo un'elevata produttività tipica dei processi industriali automatizzati.

Infatti, l'impiego su larga scala dei pannelli AFS necessita dello sviluppo di appropriate tecnologie di giunzione. I processi che meglio si candidano per la saldatura di questo tipo di materiali sono processi di saldatura a basso apporto termico che consentono di limitare la dimensione del cordone di saldatura e le variazioni microstrutturali. Sono stati esclusi gli incollaggi in quanto il materiale AFS individuato, per le elevate caratteristiche meccaniche, la riciclabilità, la stabilità termica e la resistenza alla fiamma grazie ad una struttura completamente metallica, perderebbe queste caratteristiche nella zona di incollaggio.

Le tecnologie di saldatura investigate sono il laser ed il Fascio elettronico. Quest'ultima tecnologia è stata presa in considerazione fondamentalmente per l'elevata qualità di giunzione raggiungibile. Infatti, le leghe di alluminio sono suscettibili a fenomeni di criccatura a caldo e porosità. Questo aspetto di più semplice soluzione con la saldatura EBW grazie alla possibilità di rimescolamento del bagno fuso al alta frequenza, risulta un problema aperto nella saldatura laser. Per la riduzione delle porosità, tipiche della saldatura laser, è stato sviluppato di un processo di saldatura Laser TIG con possibilità di impiego di filo d'apporto per il controllo delle caratteristiche microstrutturali, della forma del cordone di saldatura e delle porosità grazie all'effetto stabilizzante che il filo ha sul key-hole.

Lo studio dell'ottimizzazione dei parametri è stato condotto applicando il Design of Experiment (DOE) per l'impostazione e l'analisi dei piani sperimentali fattoriali. Per il fascio elettronico sono stati testati a due differenti livelli di velocità l'influenza dei principali parametri di saldatura quali, focalizzazione, corrente di saldatura e ampiezza della deflessione. Gli studi effettuati hanno portato alla definizione dei parametri di saldatura ottimale a velocità di saldatura a 1,5 m/min e 3 m/min sia fra AFS sia fra AFS e *main frame* in alluminio. La Figura 223 riporta i tipi di elementi di transizione possibili e quelli testati.

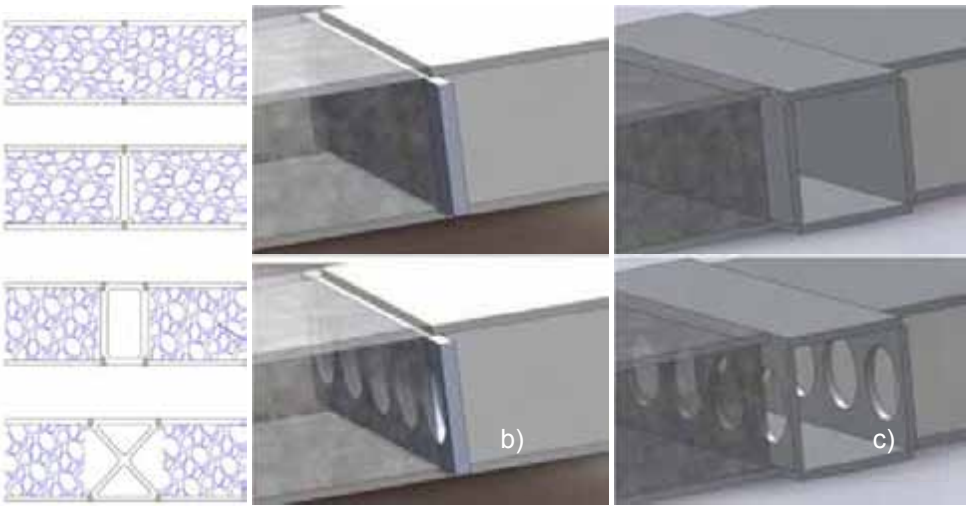


Figura 223. Potenziali componenti di transizione utilizzabili e componenti testati

La salatura al fascio laser delle leghe di alluminio si è confermata difficoltosa per via della elevata riflettività che queste leghe hanno, in particolare quelle della serie 6xxx di cui sono costituite le pelli degli AFS. I test hanno confermato che la saldatura laser da sola, senza supporto della tecnica TIG, ha una finestra di saldatura che con la stazione di lavoro utilizzata si riduce a un solo punto (P=2000 W ; v= 2 m/min) estremamente limitata. Questo ha imposto l'allestimento di un impianto per la saldatura laser-TIG mostrato nella configurazione con e senza filo d'apporto nella Figura 224.

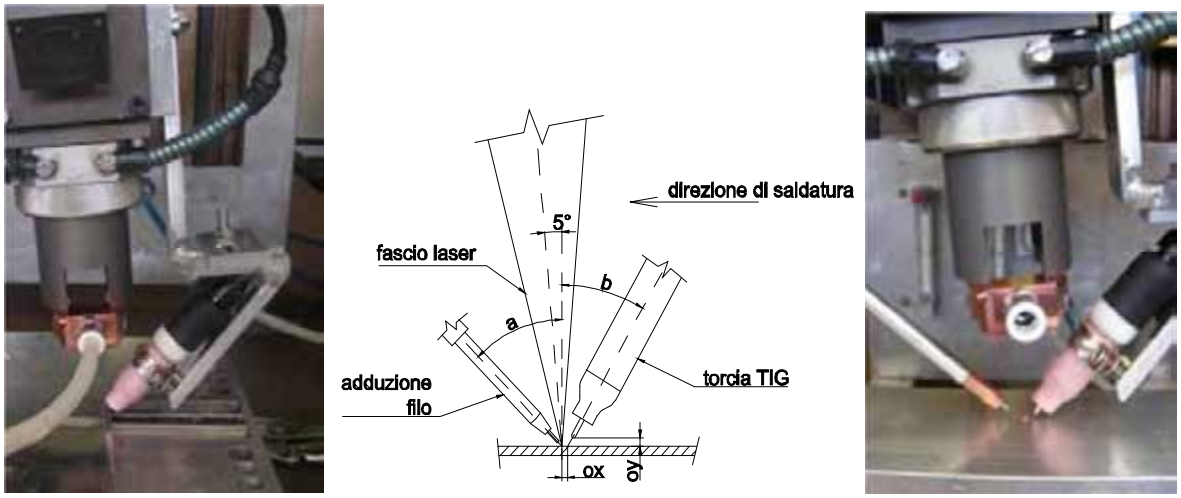


Figura 224. Testa di saldatura Laser TIG, schema di funzionamento e testa di saldatura Filo – Laser – TIG.

Anche in questo caso l'ottimizzazione dei parametri è avvenuta mediante tecnica DOE. L'analisi DOE ha permesso di identificare l'influenza dei parametri di processo sulla geometria del giunto (in particolare D = penetrazione, Wu= larghezza dl dritto e Wl=larghezza alla radice).

In particolare, la presenza del filo permette di poter compensare gap fra le pelli fino a 0,5 mm e permettere di estendere l'analisi anche ad altri elementi geometrici del cordone quali il sovrametallo (R) e l'accesso di penetrazione (e). L'analisi della difettosità è stata effettuata in accordo alla normativa UNI EN ISO 13919-2 Giunti saldati a fascio elettronico e laser - Guida dei livelli di qualità delle imperfezioni Parte 2: Alluminio e sue leghe. I risultati finali hanno evidenziato come sia la saldatura Laser TIG sia la saldatura Filo-Laser TIG permettono di realizzare cordoni conformi al livello C (medio) della normativa. La sinergia con il TIG permette di incrementare la velocità di processo fino a 3 m/min mentre l'aggiunta del filo d'apportopermette di migliorare le caratteristiche morfologiche del giunto e aumentare l'abilità al gap bridging del processo rendendolo molto più robusto ed applicabile a livello industriale.

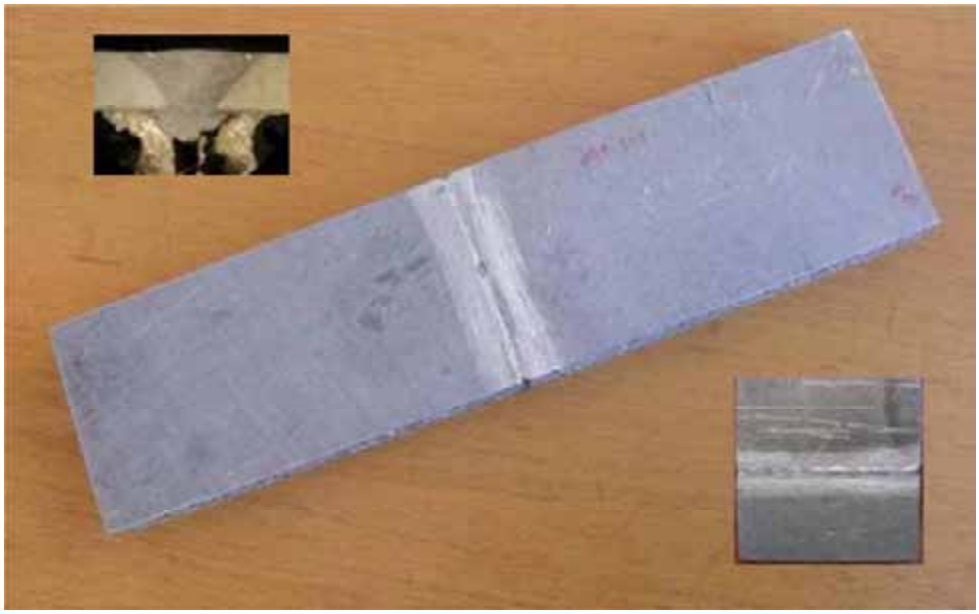


Figura 225. Esempio di campione di qualifica saldato laser TIG e pre qualifica saldato Filo laser TIG (WLT). In alto a sinistra la macrografia di un campione saldato WLT a 3 m/min con Gap 0,5 mm e 3m/min di filo d'apporto

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

Le attività di questa linea sono state finalizzate al raggiungimento di due distinti obiettivi:

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

Sviluppo di processi per l'impiego di fibre naturali in compositi termoplastici

Relativamente al primo obiettivo le attività hanno teso da un lato alla realizzazione di pannelli in composito termoplastico rinforzato con fibre naturali e dall'altro alla valutazione delle potenzialità di riciclabilità di tali tipologie di materiali.

Per quanto riguarda la realizzazione di pannelli, si è deciso di scegliere uno dei materiali termoplastici più comuni quali il PE e di rinforzarlo con fibre naturali di diversa tipologia. Rinforzando la matrice termoplastica con fibre corte si è voluto realizzare un classico WPC (Wood Polimer Composite) adoperando la tecnologia di estrusione. Il WPC presenta buone qualità estetiche, mentre si sono volute valutare le prestazioni meccaniche di questo materiale al variare della percentuale volumetrica di fibre e del fattore di forma andando ad utilizzare fibre lunghe di canapa. Naturalmente per impiegare fibre lunghe è stato necessario adoperare la tecnologia di stampaggio, che consente però l'utilizzo anche di polimeri riciclati. Nel seguito saranno illustrati i processi di fabbricazione dei pannelli e successivamente le tipologie di prova e i risultati della caratterizzazione termomeccanica. La composizione di tutte le miscele è stata effettuata utilizzando un estrusore bivite COLLIN ZK 35 (Figura 226).

Figura 226. Estrusore COLLIN ZK

Ad eccezione della farina di legno, tutti i materiali componenti erano sotto forma di pellet. Le fibre di legno caratterizzate da una mesh nominale di 40. Dunque facendo riferimento alle dimensioni standard delle mesh americane, il diametro delle fibre di legno è di circa 425 micron.

Le percentuali di rinforzo per i vari provini sono del 20, 30, 40 e 50%. Alla matrice e al rinforzo è stato aggiunto un compatibilizzante, che ha il compito di o migliorare l'adesione tra fibre di legno e matrice (HDPE, High Density PolyEthylene) o ridurre le concentrazioni di stress create dalle fibre di legno. Il compatibilizzante utilizzato è un polietilene "maleated", MAPE (Maleic anhydride grafted) che si presenta come un solido incolore con odore acre, e che ha un indice di fluidità di un polimero fuso di 5 g/10 min. Tutti i componenti sono stati inseriti in rapporti appropriati a seconda della percentuale di farina di legno. In particolare, a seconda della percentuale di farina di legno, di volta in volta si è dovuto calcolare la portata di compatibilizzante.

È stato utilizzato un sistema di alimentazione gravimetrico per assicurare un'accurata misura di tutte le sostanze , nelle giuste proporzioni. Tutto l'impianto di produzione comprende, oltre all'estrusore, una trafila, un sistema di calibrazione del diametro, un bagno di raffreddamento, un dispositivo di traino, ed un pellettizzatore (cioè un dispositivo per tagliare automaticamente il filo in pellet).

I laminati compositi sono stati realizzati con WPC al 20, 30, 40 e 50% con e senza rinforzo in canapa. Al fine di conoscere il peso dei materiali utilizzati, per poter stabilire la composizione percentuale in peso dei laminati realizzati, si è fatto uso di una bilancia elettronica di precisione, in grado di effettuare una misurazione accurata

del peso. La realizzazione del laminato ha previsto l'impiego di uno stampo metallico con compattazione sotto pressa.

Lo stampo utilizzato possiede geometria rettangolare con misure di lunghezza e larghezza utili interne pari a 220x150 mm, con uno spessore massimo di 20 mm. La pressa impiegata ha piastre in grado di raggiungere temperature elevate (250 °C) ed è caratterizzata da un telaio, che può essere fissato nella posizione desiderata, e da una traversa mobile, che si accosta alla parte fissa attraverso una pompa oleodinamica, azionata manualmente. A queste due parti della macchina sono fissate meccanicamente le due piastre, che possono essere portate alla temperatura di stampaggio, grazie alla presenza di resistenze elettriche. La forza che si instaura tra le due piastre viene letta mediante un manometro. In Figura 227 si riporta una foto scattata durante la preparazione di un laminato in WPC rinforzato con fibre di canapa con disposizione casuale; nella Figura 228 si può notare la fotografia con i pellets di WPC al 20% e fibre di canapa; in Figura 229 è presente la fotografia dopo la chiusura dello stampo; infine in Figura 230 si riporta la fotografia dello stampo posizionato nella pressa.

Figura 227. Inserimento pellets nello stampo

Figura 228. WPC e Canapa

Figura 229. Stampo pronto per la pressa

Figura 230. Posizionamento dello stampo

Successivamente sono state eseguite sempre prove dinamiche con la configurazione di flessione a tre punti variando la temperatura per valutare la caduta del modulo all'incrementare di questa. L'esigenza di eseguire tale tipologie di test è sorta in quanto il polietilene, utilizzato come matrice, ha un comportamento viscoelastico, con un abbassamento del modulo elastico, e quindi della sua rigidezza, al variare della temperatura di prova.

Prove di flessione sui laminati in WPC realizzati

Le prove di flessione statiche condotte sui provini nelle diverse percentuali di carica hanno fatto registrare un comportamento meccanico crescente con la percentuale di carica. In particolare in Figura 231 si riporta l'andamento del modulo in funzione della percentuale di fibre di legno; in funzione della stesa percentuale in Figura 232 si riportano i valori della sollecitazione massima registrata nelle stesse prove. Nelle figure sono evidenziate anche gli intervalli con i valori minimi e massimi ottenuti per i cinque provini testati per ciascuna tipologia.

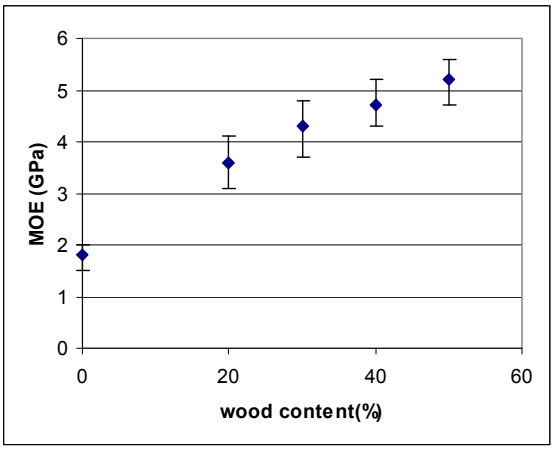


Figura 231. Modulo elastico a flessione

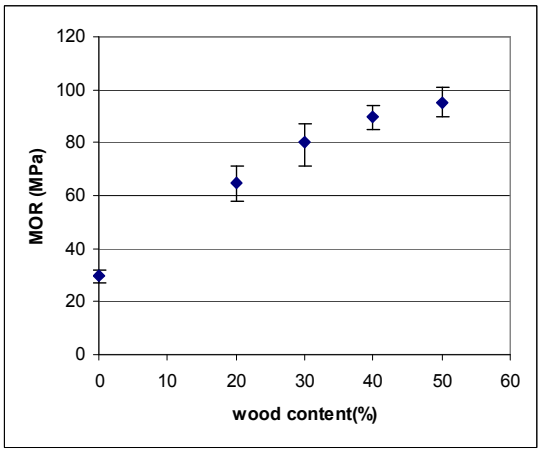


Figura 232. Sollecitazione massima

Il massimo valore dello stress, come indicato dai precedenti diagrammi, è stato registrato dal provino D relativo al provino composto da WPC al 50% di farina di legno. Per tale tipologia di composito il massimo valore dello stress raggiunto in una prova è stato di 102 MPa. In Tabella 76 sono riportati i valori delle σ^{max} medie relativi alle varie tipologie di provini.

Tabella 76. Valori degli stress massimi

Identificativo provino	Contenuto in fibre (%)	σ^{max} (MPa)
A	20	65
B	30	80
C	40	89
D	50	94
HDPE	0	28

Si osserva una notevole differenza dei valori delle σ^{max} tra i provini in WPC e quello composto da solo HDPE. Infatti paragonando il valore della σ^{max} del laminato in solo HPDE al 100% con quello del provino D (cioè quello che ha riportato il valore più alto della σ^{max}) si ha uno scarto di 70 MPa, o meglio si nota che il valore della σ^{max} risulta triplicato.

Laminati in WPC rinforzati con fibre lunghe di canapa

Sono state realizzate due tipologie di compositi con fibre lunghe di canapa con percentuale del 20%; sono stati impiegati pellets in WPC con il 20% di polpa di legno. Le due tipologie si differenziano per la disposizione di fibre lunghe: random e monodirezionale. Quest'ultima configurazione è stata testata sempre in direzione delle fibre per valutare le massime proprietà che è possibile ottenere con fibre lunghe. In Figura 233 si riportano i valori del modulo per le due tipologie con fibre lunghe e per confronto i valori ottenuti per il solo HDPE e per il WPC con la massima percentuale di carica di legno. In Figura 234si riportano i valori della massima sollecitazione per le due tipologie con fibre lunghe e per confronto i valori ottenuti per il solo HDPE e per il WPC con la massima percentuale di carica di legno.

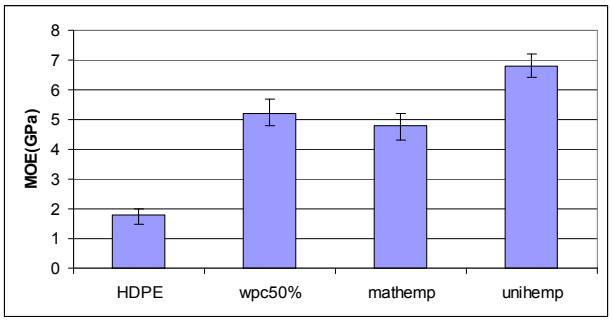


Figura 233. Modulo per i differenti compositi

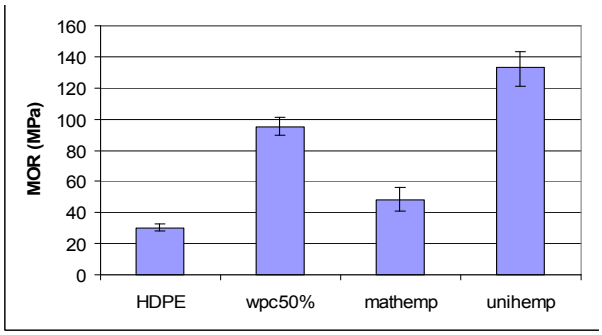


Figura 234. Sollecitazione massima

Dagli istogrammi riportati nelle figure precedenti è evidente il miglioramento delle proprietà per i compositi con fibre lunghe monodirezionali. Mentre le fibre di canapa disposte in modo casuale non fanno registrare un miglioramento delle proprietà rispetto al WPC al 40% di polpa di legno.

Da tutte le prove sia statiche che dinamiche è risultato un notevole incremento delle proprietà del polietilene caricato con fibre naturali. L'incremento di modulo elastico e di sollecitazione massima è proporzionale alla percentuale di carica per il WPC. Mentre le proprietà meccaniche crescono ulteriormente rinforzando il WPC con fibre lunghe di canapa monodirezionali ; un modulo di circa 7 GPa e resistenze superiori a 100 MPa rappresentano incrementi di proprietà notevoli rispetto ai circa 2 GPa e 30 MPa del solo polietilene.

Per i laminati di WPC rinforzati con fibre lunghe disposte in modo casuale le proprietà meccaniche sono inferiori al solo WPC al 40% di polpa di legno. Tale risultato potrebbe essere imputabile a due fattori: il primo al processo di produzione che favorisce l'azione dell'anidride maleica per la polpa di legno, ma non per le fibre lunghe inserite con lo stampaggio, il secondo legato alla elevata percentuale di canapa che compattandosi non permette alla matrice di impregnare bene le fibre con zone quasi secche che fanno decadere le proprietà. Tuttavia le fibre lunghe anche in disposizione casuale conferiscono delle buone proprietà al composito all'aumentare della temperatura. Infatti a differenza del WPC che presenta un forte decadimento delle proprietà, tutti i laminati con fibre lunghe presentano decrementi più contenuti con l'aumentare della temperatura. Questo è evidentemente legato ad un effetto lunghezza delle fibre.

In definitiva si può concludere che i laminati in WPC rinforzati con fibre lunghe di canapa presentano elevate proprietà meccaniche che subiscono decadimenti contenuti con l'aumentare della temperatura mantenendo le buone proprietà estetiche del WPC.

Come accennato precedentemente i nuovi approcci alla progettazione devono necessariamente tener conto della riciclabilità dei prodotti, una volta raggiunta la loro fine vita (End of Life, EoL). In questi termini un materiale se riciclabile, ha un valore aggiunto che può essere il fattore chiave per il suo utilizzo.

Per i materiali compositi termoplastici il riciclaggio passa necessariamente attraverso un processo di tipo meccanico, da cui si ottengono granulati, polveri o prodotti fibrosi, da utilizzare in seguito in processi di estrusione o di iniezione una volta miscelati con un parte di polimero vergine. Ovviamente non si può pensare di ripetere questo ciclo infinite volte, ad ogni riprocessamento le proprietà dei diversi componenti, degradano. In particolare la lunghezza delle fibre diminuisce e quindi l'equilibrio delle sollecitazioni tra queste e la matrice.

Laminati in WPC rinforzati con fibre corte di kenaf

In questa fase si è studiata la riciclabilità del polipropilene rinforzato con fibre corte naturali di kenaf. Il materiale utilizzato è un composito in PP con una percentuale di Kenaf tra il 16% e il 20% in peso, inoltre è presente circa un 30% di carica minerale. Il materiale ha subito una serie di processi costituiti da stampaggio sotto pressa, caratterizzazione meccanica e successiva frantumazione e riduzione in granuli. Si sono così ottenuti i valori di decadimento delle proprietà meccaniche per ogni ciclo di recupero. Il test di riciclabilità è stato realizzato eseguendo 5 cicli successivi di stampaggio e relativa macinatura. Inoltre per avere un termine di confronto le stesse operazioni sono state eseguite su PP vergine e PP caricato con fibre di vetro al 18% in peso.

Sono state effettuate sia la caratterizzazione meccanica che quella termica su campioni pre-post riciclaggio. I grafici che mostrano l'andamento delle caratteristiche meccaniche e termiche al variare del numero di riciclaggi sono illustrati nel relativo rapporto tecnico.

Sviluppo di processi di ibridizzazione di microsfere metalliche con polimeri termoplastici

Relativamente al secondo obiettivo lo scopo dell'attività è stato lo sviluppo, a livello laboratorio, e la qualificazione, delle tecnologie di realizzazione di sfere cave in leghe leggere (es. alluminio), di piccolo diametro (es. 2-6 mm), del loro utilizzo per la realizzazione di componenti, cellulari anche di geometria complessa, miscelando le sfere con opportuni polimeri in modo da conferire le necessarie proprietà di resistenza, rigidezza ed assorbimento di energia. La principali attività effettuate sono state:

Fase 1: messa a punto del processo per la fabbricazione in scala laboratorio di sfere cave:

- valutazione, sulla base delle esperienze pregresse e su una analisi dello stato dell'arte attuale, dei metodi ottimali per la realizzazione di sfere o grani cavi (es. realizzabilità con tecnologie applicabili anche su scala laboratorio o prepilota). Sono stati presi in considerazione processi basati sia sulla tecnica di gocciolamento, con doppio ago, della lega fusa e solidificazione es. in acqua sia sulla tecnica di metallurgia delle polveri, mediante rivestimento di sfere organiche con slurry contenenti polveri di metallo, successivo dewaxing e sinterizzazione e tecniche di formatura con miscela di polveri metalliche, organiche e successiva granulazione anche con utilizzo di leganti, successivo dewaxing e sinterizzazione.

- Scelta, dopo una serie di prove preliminari, del processo più promettente, realizzabile anche su scala laboratorio: quello basato sulla granulazione di miscele di polveri di alluminio e polveri organiche, e legante organico, successivo dewaxing e sinterizzazione.
- Realizzazione delle attrezzature di laboratorio necessarie ed effettuazione le prove di messa a punto del processo fino alla produzione di un lotto limitato di granuli cavi/porosi.
- Caratterizzati da un punto di vista micro strutturale dei granuli ottenuti.

Fase 2: fabbricazione di campioni a geometria semplice da destinare ai test di caratterizzazione:

- valutazione delle possibili opzioni commerciali per la scelta del polimero da utilizzare come legante delle sfere/granuli per la realizzazione del materiale cellulare e successive prove di miscelazione ad analisi della bagnabilità;
- realizzazione, per riempimento della intercapedine fra due lamiere in alluminio, di un pannello con dimensioni limitate ma tali da poter essere utilizzato per ricavare alcuni campioni per la caratterizzazione meccanica di base (flessione, compressione).

Fase 3: caratterizzazione meccanica e termica del pannello in schiuma metallica realizzato con grani cavi:

- esecuzione di prove di flessione su campioni con geometria parallelepipeda ricavati dal pannello, valutazione della sollecitazione di rottura, della rigidezza e della modalità di deformazione e rottura.
- Esecuzione di prove di compressione su campioni con geometria a sezione quadrata ricavati dal pannello, valutazione della resistenza a rottura, della rigidezza e della modalità di deformazione e rottura.
- Valutazione complessiva del comportamento meccanico del pannello in schiuma metallica realizzato con grani cavi e confronto con i dati di letteratura relativi a pannelli in schiuma metallica realizzati con diverse tecnologie.
- Valutazione sperimentale della conducibilità termica del pannello, su campione cilindrico ricavato dallo stesso e confronto con le proprietà termiche del materiale base e di analoghi pannelli in schiuma metallica realizzato con diverse tecnologie.

Nella Tabella 77 sono presentati i risultati delle prove di compressione.

Tabella 77. Risultati prove di compressione

	Tensione massima [MPa]	2% deflection stress [MPa]	Modulo a compressione [MPa]
Campione 0	21,1	2,00	433
Campione 1	11,9	1,10	35

I diagrammi load-piston stroke e stress-strain sono riportati nella Figura 235 e nella Figura 236.

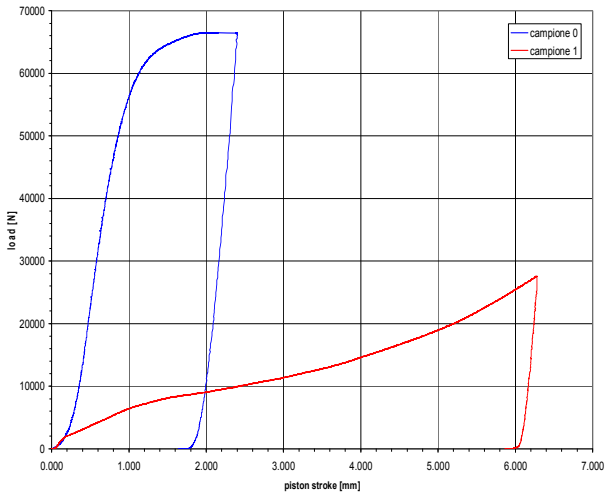


Figura 235. Andamento del carico in funzione della corsa del pistone

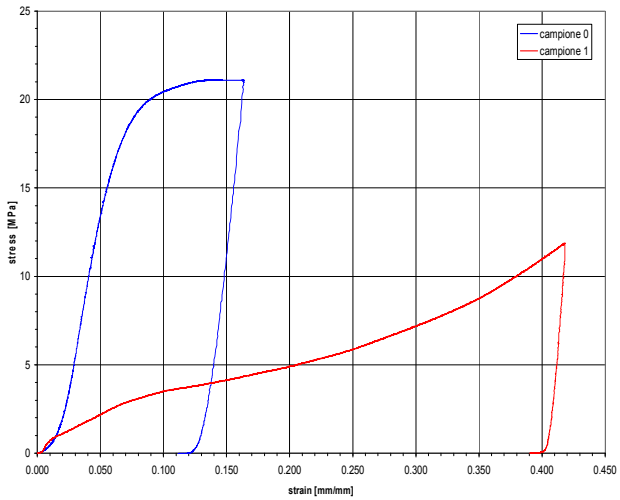


Figura 236. Andamento dello stress in funzione dello strain

Nella Tabella 78 sono presentati i risultati delle prove di flessione. La differenza di carico massimo registrata durante le prove sui due campioni è imputabile ad una cavità macroscopica rilevata all'interno del campione 0.

Tabella 78. Risultati prove di flessione

	P max [N]	Core shear ultimate stress [MPa]	Facing stress [MPa]
Campione 0	854	0,67	20,76
Campione 1	1351	1,08	33,52

In conclusione si può affermare che la tecnologia di fabbricazione di sfere/grani porosi messa a punto a livello laboratorio ed in fase di ottimizzazione sembra promettente per la realizzazione del materiale base per la realizzazione di componenti in schiuma metallica, anche con geometria complessa. Il pannello sperimentale, assemblato con tecniche di laboratorio, ha permesso di ricavare campioni per prove meccaniche e misure di conducibilità che presentano aspetti morfologici e geometrici adeguati per la esecuzione delle caratterizzazioni previste. Anche i risultati ottenuti dalla caratterizzazione del pannello sandwich risultano incoraggianti, in quanto comparabili con i dati reperibili in letteratura, anche se riferiti a pannelli realizzati con tecnologie diverse con densità simili.

Principali soggetti esterni coinvolti

L'ENEA ha ritenuto opportuno coinvolgere diversi soggetti esterni che hanno dato al lavoro svolto un importante contributo tecnico e scientifico. Di seguito sono riportate brevemente le attività che hanno visto la partecipazione di soggetti esterni, la presentazione dei soggetti esterni ed una breve descrizione dei lavori da essi eseguiti.

Università degli Studi Roma TRE

Ha portato avanti il *"Monitoraggio impianto di solar heating and cooling a servizio dell'edificio F-51"* e la *"Simulazione di sistemi di climatizzazione a pompa di calore elio assistiti"* e la **"***Realizzazione di un Web G.I.S. finalizzato alla gestione delle risorse geotermiche a bassa entalpia con sonde verticali***".**

Università degli Studi di Palermo

costituito nel 1986 al fine di "organizzare e promuovere ricerche finalizzate alla produzione ed alla gestione delle fonti di energia e delle risorse energetiche ed ambientali, alla implicazione di esse nel rapporto uomo-ambiente ed alla conoscenza di fondamentali proprietà fisiche delle materie utili per le applicazioni nel campo energetico, astrofisico e spaziale". Il DREAM ha portato avanti la "*Progettazione costruttiva di un sistema Solar DEC per Uffici e per il Test di un refrigeratore ad Acqua-Ammoniaca di tipo commerciale*".

ISES ITALIA

Rappresenta nel nostro paese una delle principale associazione tecnico-scientifica *non profit* legalmente riconosciuta per la promozione dell'utilizzo delle Fonti Energetiche Rinnovabili (solare termico, solare fotovoltaico, energia eolica, energia da biomasse, bioclimatica, energia geotermica, energia idrica, energia dal mare). L'ISES ITALIA ha portato avanti una attività di ricerca su "*Tecnologie solari a concentrazione per la produzione di calore a media temperatura***".**

Università di Padova

Le attività coprono le aree della conoscenza nell'ingegneria industriale e in quella economico-gestionale al fine di sviluppare nuovi prodotti, materiali e processi produttivi e organizzativi. Ha portato avanti lo **"***Studio di sistemi di accumulo a cambiamento di fase nel solar cooling***".**

Politecnico di Torino

Si occupa di energia in tutte le sue forme, come la fissione e fusione nucleare, propulsione aerospaziale, oleodinamica e pneumatica, motori a combustione interna, modellistica e pianificazione energetica, impatto ambientale dei sistemi energetici, termoeconomia, analisi di sicurezza e affidabilità, ingegneria dell'ambiente interno (acustica, illuminazione, climatizzazione, qualità dell'aria), combustione, energie rinnovabili. Il Politecnico di Torino ha portato avanti lo sviluppo di "*Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici*".

Elenco dei report

SISTEMI AVANZATI DI ACCUMULO DI ENERGIA

1. M. Montanino, M. Moreno, M. Carewska, F. Alessandrini, A. Masci, C. Cento, P.P. Prosini, R. Lo Presti e G.B. Appetecchi. "Ricerca e Sviluppo di Anodi e Catodi per Batterie Litio-ione: i materiali catodici". ENEA
2. C. Arbizzani, L. Damen, F. De Giorgio, S. Monaco e M. Mastragostino. "Materiali catodici per batterie litio-ione e loro caratterizzazione in celle da laboratorio". Università Alma Mater Studiorum di Bologna
3. M. Montanino, M. Moreno, M. Carewska, F. Alessandrini, A. Masci, R. Lo Presti e G.B. Appetecchi. "Ricerca e Sviluppo di Anodi e Catodi per Batterie Litio-ione: i materiali anodici". ENEA
4. M. Marinaro, R. Marassi, F. Nobili, R. Tossici. "Ricerca di materiali anodici avanzati per celle a litio e preparazione di celle da laboratorio". Università di Camerino.
5. M. Pasquali. "Caratterizzazione elettrochimica di materiali elettrodici nanostrutturati di batterie al litio e litio-ione per applicazioni di potenza". Università di Roma "La Sapienza".
6. G. B. Appetecchi. "Ricerca e Sviluppo di Anodi e Catodi per Batterie Litio-ione: le celle complete". ENEA.
7. M. Conte, G. Graditi, M. G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, E. Telaretti, G. Zizzo. "Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate - Report 1 – Analisi dello stato dell'arte". Università di Palermo, ENEA
8. M. Conte, G. Graditi, M. G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, E. Telaretti, G. Zizzo. "Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate - Report 2 – Applicazioni in reti isolate e interconnesse". Università di Palermo, ENEA
9. C. Di Bari. "Studio preliminare di sicurezza di un sistema di accumulo elettrico realizzato con celle Litio-ione". ENEA
10. S. Barsali, M. Ceraolo, R. Giglioli, D. Poli. "Definizione delle specifiche dei sistemi di controllo e d'interfaccia dei sistemi di accumulo con accumulatori al litio per l'impiego nelle reti di distribuzione". Università di Pisa
11. S. Barsali, P. Di Marco, S. Filippeschi, A. Franco, R. Giglioli, D. Poli. "Dimostratore di casa attiva". Università di Pisa
12. M. Pasquali, F. Vellucci. "Applicazione di un sistema di accumulo costituito da batterie al Litio ad un impianto funicolare: risoluzione dei problemi termici e gestione delle potenze". ENEA
13. M. Pasquali, C. Villante, E. Pagano, P. Tricoli. "Applicazione di un sistema di accumulo a supercondensatori in un carroponte industriale: sintesi delle strategie di gestione energetica e dei cicli sperimentali per la verifica delle prestazioni". Università di Napoli, ENEA

NUOVO NUCLEARE DA FISSIONE: COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI E SVILUPPO COMPETENZE IN MATERIA NUCLEARE

Studi sul nuovo nucleare e partecipazione ad accordi internazionali

1. O. Aronica. "Rapporto di sintesi delle attività effettuate a supporto del MSE-DGENRE". ENEA
2. A cura di M. Sepielli. "Raccolta delle relazioni di partecipazione ai comitati e gruppi internazionali sul nucleare da fissione". ENEA, CIRTEN
3. F. Vettraino, M. Adorni, A. Vuerich, F. D'Auria. "Rapporto di avanzamento sullo sviluppo di un NESA Italia – Metodologia e condizioni preliminari". ENEA, CIRTEN
4. F. Padoani, G. Glinatsis. "Stato di sviluppo delle principali metodologie per valutare la resistenza alla proliferazione e protezione fisica e loro applicazione a sistemi innovativi". ENEA
5. G. Abbate, M. Ciotti, M. Olivetti. "Rapporto di review sullo stato di sviluppo dei reattori di piccola-media taglia di tipo modulare". ENEA
6. L. Paparusso, M.E. Ricotti, M. Sumini. "World status of the SMR projects". CIRTEN
7. F. Vettraino, L. Luzzi, A. Cammi, M. Adorni, F. D'Auria. "Review stato programma Halden Project e definizione linee di R&S di interesse nazionale". ENEA, CIRTEN
8. F. Pisacane, M. Cappelli, C. Lombardo. "Rapporto sulle attività nell'ambito della collaborazione ENEA-IRSN". ENEA
9. F. Pisacane, A. Gandini. "Metodo per la stima del punto caldo di un nocciolo di reattore nucleare basato su tecniche perturbative generalizzate (GPT)". ENEA, CIRTEN
10. G. M. Giannuzzi. "Sviluppo del codice strutturale della catena francese CAST3M". ENEA
11. F. Corsi, M. E. Angiolini. "Verifica della validità del diagramma di "efficacità" in RCC-MRx". ENEA, CIRTEN
12. D. Bernardi. "Life Extension: studio degli effetti di Warm Pre-Stress (WPS) su un Reactor Pressure Vessel". ENEA
13. F. Vettraino. "Rapporto di sintesi su risorse e domanda mondiali di uranio con riferimenti alla situazione nazionale". ENEA
14. AA.VV. "Studio preliminare sul ciclo del combustibile e sul costo dell'energia nell'ipotesi di uno scenario nucleare italiano". ENEA, CIRTEN
15. V. Barbara, G. Forasassi. "Analisi di Scenari Energetici: Scenario italiano, introduzione di reattori termici". CIRTEN

16. S. Boarin, M. Ricotti, F. Vettraino. “Valutazioni economiche con validazione-applicazione dei modelli economico-finanziari”. CIRTEN

Reattori evolutivi di III+ Generazione

17. R. Ferri. “SPES3 facility: RELAP5 simulations of the DBE and BDBE DVI line DEG break from 65% and 100% power for design support”. SIET S.p.A.
18. R. Ferri. “Simulating capabilities of the SPES3 facility”. SIET S.p.A.
19. G. Tortora, S. Gandolfi. “Verifica sperimentale di prototipi di barre scaldanti per l’impianto SPES-3”. SIET S.p.A.
20. A. Achilli. “Progettazione, sviluppo e prove di sonde capacitive per la misurazione del grado di vuoto”. SIET S.p.A.
21. M. De Salve, G. Monni, B. Panella. “Relazione tecnica sulle prove a freddo delle sonde per la misurazione del grado di vuoto e sulla verifica sperimentale della catena di misura, costituita da una turbina, un drag disk e della sonda sviluppata”. CIRTEN
22. S. Botti. “Set documentale relativo all’approvvigionamento e montaggio del trasformatore e ausiliari”. SIET S.p.A.
23. S. Botti. “Set documentale relativo all’approvvigionamento e installazione dei componenti dell’impianto SPES-3”. SIET S.p.A.
24. N. Forgione, V. Baudanza, I. D’Angelo, D. Martelli. “Downcomer and lower plenum experimental facility”. CIRTEN
25. M. Ricotti, A. Achilli, S. Gandolfi. “Progettazione e fasi realizzative della facility sperimentale SP&DE per esperienze termoidrauliche”. CIRTEN
26. M. Colombo, D. Papini, A. Cammi, M. E. Ricotti. “Experimental investigation of thermal hydraulic instabilities in Steam Generator helical coil tubes”. CIRTEN
27. F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, P. A. Di Maio, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella. “Modifiche del Codice RELAP5/MOD3.2.β per lo studio delle perdite di carico e dello scambio termico in condotti elicoidali interessati da deflussi bifase: validazione attraverso gli esperimenti effettuati dal politecnico di milano presso l’impianto SIET di Piacenza”. CIRTEN
28. A cura di M. D’Apice. “Caratterizzazione funzionali e tecniche dei futuri simulatori ingegneristici”. ENEA, CIRTEN
29. A cura di M. Serra. “Implementazione ed utilizzo di simulatori semplificati "desktop"”. ENEA, CIRTEN
30. A. Poggianti. “Updated design of the IRIS nuclear reactor seismic isolation system and seismic analysis in beyond project design condition”. ENEA
31. G. Forasassi, R. Lo Frano. “Dynamic analysis of an advanced, isolated NPP assuming real HRDB properties”. CIRTEN
32. M. Domaneschi, F. Perotti. “Seismic Risk Computation For the Base-Isolated Reactor Building of the IRIS NPP”. CIRTEN
33. G. Forasassi, R. Lo Frano. “Dynamic global structural response of an innovative reactor subjected to an aircraft impact”. CIRTEN
34. W. Ambrosini, A. Manfredini. “Methodology for coupling thermal-hydraulic codes for primary system and containment analysis”. CIRTEN
35. W. Ambrosini, A. Manfredini. “Preliminary validation of the coupling between a primary system and a containment code”. CIRTEN
36. F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, P.A. Di Maio, M.Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella. “Analisi mediante il codice TRACE delle principali fenomenologie caratterizzanti il transitorio conseguente ad una rottura a ghigliottina nella linea DVI dell’impianto sperimentale SPES-3”. CIRTEN
37. S. Tirini. “Relazione sulle attività a supporto del reattore sperimentale Jules Horowitz Reactor (JHR)”. ENEA
38. F. S. Nitti. “Preliminary Thermohydraulics Design of the LORELEI Device with CATHARE”. ENEA
39. P. Console Camprini, D. Mostacci, M. Sumini, C. Artioli. “Thermal hydraulic and Neutronic Core Model for JHR Kinetics Analysis”. CIRTEN
40. A. Kovtonyuk, M. Cherubini, M. Adorni, B. Bianucci, F. D’Auria. “Safety of evolutionary reactors: feasibility study for the experimental program of SPES facility”. CIRTEN
41. C. Lombardo, M. Polidori. “Definizione di una prova sperimentale da effettuarsi sull’impianto SPES2 della SIET di Piacenza”. ENEA

Reattori evolutivi di IV Generazione

42. D. Rozzia, A. Toti, M. Tarantino, L. Gramiccia, D. Vitale Di Mario, F. Giannetti. “Double-wall bayonet tube steam generator for LFR application. Preliminary characterization”. ENEA, CIRTEN
43. N. Forgione, N. Montagnini, E. Semeraro, A. Del Nevo, R. Giammusso, A. Ciampichetti. “Caratterizzazione sperimentale dell'interazione metallo liquido pesante - acqua e qualifica rottura generatore di vapore LFR”. ENEA, CIRTEN
44. I. Di Piazza, P. Gaggini, M. Tarantino. “Progettazione preliminare di una pompa centrifuga per l’impianto a metallo liquido pesante HELENA”. ENEA
45. N. Forgione, J. Fusani, F. Oriolo. “Thermal-hydraulic analysis of HELENA facility”. CIRTEN

46. M. Tarantino. “Implementazione strumentazione sezione di prova per qualifica dello scambiatore prototipico DHR per sistemi LFR”. ENEA
47. M. De Rosa, N. Forgione, D. Martelli, F. Oriolo. “Thermal-hydraulic pre-test analysis of ICE test section with WA-DHR”. CIRTEN
48. G. Barone, N. Forgione, F. Oriolo. “Thermal-Hydraulic post-test analysis of the transition from forced to natural circulation in ICE test section”. CIRTEN
49. I. Di Piazza, P. Gaggini, M. Tarantino, N Forgione, G. Galgani. “Progettazione e realizzazione di un pin bundle per l'investigazione dello scambio termico in regime di convezione mista in sistemi LFR”. ENEA, CIRTEN
50. F. Fabrizi, W. Gaggioli, L. Rinaldi, C. Rocca, R. Surace. “Progettazione e realizzazione di uno scambiatore di calore prototipico per reattori refrigerati a sodio con circuito intermedio a sali fusi”. ENEA
51. M. Angiolini, R. Calvagioli, G. Console, F. Giannetti, L. Gramiccia, P.C. Incalcaterra, A. Naviglio, L. Scotto, G. Tiranti. “Studio di fattibilità per un impianto a sodio per shock termici e ratchetting sui materiali”. ENEA, CIRTEN
52. A. Gessi, S. Storai, N. Bettocchi. “Implementazione laboratori per prove termo-meccaniche su materiali innovativi”. ENEA
53. A. Gessi, S. Storai, N. Bettocchi. “Caratterizzazione fuori pila di materiali strutturali”. ENEA
54. E. Ferrari, E. Ghisolfi. “Sviluppo di materiali ceramici compositi per componenti di reattori nucleari a fissione di quarta generazione”. FN S.p.A.
55. R. Coppola. “Caratterizzazione di materiali e componenti per il nucleare da fissione mediante tecniche neutroniche”. ENEA
56. F. Corsi, G.M Giannuzzi, L. Gramiccia, F. Manni, D. Vitale Di Maio, M. Nobili. “Ricognizione ad ampio spettro, individuazione e studio degli effetti strutturali caratteristici dei transitori termici in reattori di quarta generazione”. ENEA, CIRTEN
57. M. Agostini, V. Cuzzola. “Metodiche di cleaning per componenti LFR/SFR”. ENEA
58. A. Gessi. “Progettazione del sistema di monitoraggio e controllo dell'ossigeno disciolto nell'impianto a metallo liquido HELENA”. ENEA
59. F. Franza, A. Ciampichetti, M. Zucchetti. “Analisi del trasporto del trizio nei sistemi SFR”. ENEA, CIRTEN
60. G. Bornia, M. Finelli, S. Manservisi, V. Mikhin, M. Polidori, K. Voukelatou. “Sviluppo e validazione del codice di calcolo per la termoidraulica di sistema CATHARE-2 per reattori refrigerati a metallo liquido pesante”. ENEA, CIRTEN
61. S. Manservisi , R Scardovelli, M. Polidori. “Development and validation of FEM-LCORE code for the thermal hydraulics of open cores”. ENEA, CIRTEN
62. R. Bonifetto,S. Dulla, P. Ravetto, L. Savoldi Richard, R. Zanino, M. Carta, G Bianchini. “Studi di dinamica di nocciolo per reattori LFR”. ENEA, CIRTEN
63. G. Bianchini, N. Burgio, M. Carta, V. Fabrizio, V. Peluso, L. Ricci. “Validazione del modulo di cinetica KIN3D di ERANOS. Analisi per i sistemi GODIVA e GUINEVERE”. ENEA
64. A. Gandini, F. Giannetti, L. Cretara. “Metodologia per l’analisi delle quantità integrali misurate nell’esperienza benchmark e loro correlazione con quelle relative al reattore di riferimento”. CIRTEN
65. G. Grasso, C. Petrovich.”Revision of the DEMO core configuration and of its dynamic behavior”. ENEA
66. S. Bortot, A. Cammi, S. Lorenzi, R. Ponciroli. “Development of a Dynamic Simulator for a LFR DEMO”. CIRTEN
67. A. Del Nevo, M. Utili, M. Polidori. “Validazione su base sperimentale del codice RELAP5 mediante campagna di prove sperimentali su impianto HEFUS-3”. ENEA

Rifiuti radioattivi

68. E. Zio, F. Cadini, J. De Sanctis, D. Avram. “Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso - Fase 3”. CIRTEN
69. R. Levizzari, B. Ferrucci. “Utilizzo del codice AMBER per la simulazione del rilascio nel sottosuolo di 14C, 137Cs e 234U da un deposito superficiale di rifiuti radioattivi”. ENEA
70. M. Sumini, F. Teodori. “Sviluppo di codici e strumenti di simulazione numerica per l’analisi dell’impatto ambientale di installazioni nucleari per analisi di scenario”. CIRTEN
71. P. Bartolomei, R. Levizzari, R. Lorenzelli, E. Nava, A. Rizzo, S. Salvi, A. Taglioni, F. Troiani. “Approccio metodologico al monitoraggio dei depositi di rifiuti radioattivi”. ENEA
72. M. De Salve. “Stato dell’arte sulle problematiche del monitoraggio ambientale dei depositi radioattivi in accordo alle normative internazionali e implementazione delle stesse in linee guida”. CIRTEN
73. A. Rizzo, P. Bartolomei, E. Nava, R. Lorenzelli, S. Salvi. “Il ruolo del 14C nella gestione dei rifiuti radioattivi”. ENEA
74. A. Rizzo, P. Bartolomei, A. Luce, E. Nava, R. Lorenzelli, S. Salvi. “L’utilizzo degli analoghi naturali a supporto della modellazione del trasporto dei radionuclidi nell’ambiente e della “Performance Assessement” del Deposito”. ENEA
75. N. Cherubini, L. Falconi, A. Massi. “Sviluppi evolutivi e manutentivi per l’applicazione DBRR-SIAP – Database rifiuti radioattivi”. ENEA

76. M. Capone, N. Cherubini, A. Dodaro, L. Falconi. “Revisione critica dell’Inventario Nazionale dei Rifiuti Radioattivi ai fini dello Smaltimento - Anno 2011”. ENEA

77. M. Capone, A. Compagno, A. Dodaro, A. Manniello. “Valutazione delle metodologie di calcolo degli scaling factor per rifiuti contenenti radionuclidi di difficile rilevabilità”. ENEA

78. N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro. “Panoramica dei rivelatori di neutroni potenzialmente alternativi ai contatori proporzionali a ^{3}He”. ENEA

79. N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro, L. Silvi. “Tecniche di localizzazione del materiale fissile all'interno delle matrici di contenimento tramite misure neutroniche passive”. ENEA

80. Alfredo Luce, Giorgio Giorgiantoni, Francesco Troiani, Giuseppe Forasassi, Rosa Lo Frano. “Partecipazione ad iniziative europee ed internazionali in merito allo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita”. ENEA, CIRTEN

81. R. Levizzari, F. Troiani. “Progetto internazionale di confronto ed armonizzazione dei criteri per dimostrare la sicurezza dello smaltimento geologico (GEOSAF)”. ENEA

82. P. Bartolomei, G. Giorgiantoni. “Rapporto sulla Partecipazione ad ARIUS ed ERDO-WG 2011”. ENEA

83. M. Frullini, C. Rusconi, F. Giannetti, D.V. Di Maio. “Indagini conoscitive relative alle problematiche inerenti lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita”. CIRTEN

84. G. Abbate, G. De Angelis, M. Ferrando. “Processi di idro- e piro-metallurgia per il riprocessamento di combustibile nucleare esaurito”. ENEA

85. R. Calvigioni, M. Capone, A. Compagno, G. De Angelis, C. Fedeli, G. Tiranti, E. Baicchi, L. Baldi, A. Ventura. “Prove sperimentali per la valutazione di un processo di pirometallurgia in sali fusi”. ENEA

86. M. Capone, A. Colaiuda, G. De Angelis, C. Fedeli, A. Gessi, A. Manniello, M. Poli, M. Da Ros, F. Giacobbo, M. Giola, E. Macerata, M. Mariani. “Matrici di contenimento per rifiuti radioattivi da processi pirometallurgici”. ENEA, CIRTEN

87. M. Zucchetti. “Modelli di rilascio di radionuclidi dalle matrici di contenimento”. CIRTEN

Qualifica di componenti e sistemi

88. M. Pescarini, V. Sinitsa, R. Orsi, M. Frisoni. “ENEA-Bologna Multi-Group Cross Section Libraries for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications”. ENEA

89. F. Bassenghi, G. Bornia, L. Deon, S. Manservisi, P. Meloni, M. Polidori. “Implementation and validation of the NURISP platform”. ENEA, CIRTEN

90. G. Glinatsis, G. Grasso, R. Pergreffi, F. Rocchi. “Problemi di fisica del reattore ad acqua leggera e metodi di calcolo neutronico avanzati”. ENEA

91. B. Ferrucci, K. Voukelatu. “Modelli di calcolo per valutazioni di impatto ambientale radiologico implementati nel codice di calcolo RadCal-III”. U-Series S.r.l., ENEA

92. F. De Rosa, M. Sangiorgi, P. Turroni, M. Ciotti, A. Campedrer, S. Paci, F. Mascari, G. Vella, A. Naviglio, D. Vitale di Maio, M. Adorni. “Gruppo di Lavoro MILLE600: Repertorio dati per un reattore PWR come caso di esercizio per codici di analisi di sicurezza e di PSA”. ENEA, CIRTEN

93. G. Bandini, G. Bianchini, L. Burgazzi, F. De Rosa, S. Ederli, M. Sangiorgi. “Attività di validazione di codici di calcolo per lo studio degli incidenti severi in impianti nucleari”. ENEA

94. D. Araneo, V. Cefali, E. Coscarelli, F. Fiori, A. Kovtonyuk, L. Mengali, A. Petruzzi, A. Raimato, M. Adorni, F. D’Auria, L. Burgazzi, P. Vestrucci, M. Sperandii. “Studio e sviluppo critico di metodi di analisi delle incertezze nei processi di analisi del rischio”. CIRTEN

95. P.C. Incalcaterra. “Adeguamento del sito dell’impianto termoidraulico “VAPORE” (ENEA – C.R. Casaccia) per test su componenti. Rapporto sulla programmazione degli interventi per l’operatività dell’impianto”. ENEA

96. G. Albertini. “Studi di materiali per rivelatori neutronici: acido borico granulare in polvere prima e dopo l’irraggiamento neutronico, Acciaio AISI 304 trattato con ultrasuoni”. Università Politecnica delle Marche

97. R. Bove, L. Falconi, A. Grossi, D. Manco, M. Palomba, A. Santagata, E. Santoro. “Effetti di irraggiamento da neutroni sui materiali. Azioni di adeguamento degli impianti TRIGA e TAPIRO”. ENEA

98. R. Remetti, V. Costantini. “Caratterizzazione del flusso neutronico in uscita del collimatore del canale tangenziale del reattore TRIGA RC-1 Enea-Casaccia mediante il codice di calcolo MCNP”. CIRTEN

99. M. Cumo, A. Naviglio, F. Giannetti. “Attività propedeutiche per la messa in funzione di un impianto termoidraulico ad alta pressione per pretest su simulacri di componenti”. CIRTEN

100. F. D’Errico, A. Di Fulvio. “Viability of 2D neutron-sensitive superheated emulsions for active cargo interrogation”. CIRTEN

101. S. Baccaro, A. Cemmi, L. Gramiccia, F. Manni. “Progettazione consolle di concezione avanzata per l’impianto di irraggiamento Calliope”. ENEA, CIRTEN

102. E. Ghisolfi, L. Mannarino, C. Repetto. “Caratterizzazione di materiali ceramici compositi da impiegare in reattori nucleari di nuova generazione con qualifica dei metodi e delle apparecchiature impiegate”. FN S.p.A.

103. M. Marchetti, F. Agostinelli, F. Cioeta, P. Coluzzi, A. Grilli, C. Vassalli. "Caratterizzazione di materiali ceramici compositi da impiegare in reattori nucleari di nuova generazione con qualifica dei metodi e delle apparecchiature impiegate (Deliverable 1)". CIRTEN
104. F. Agostinelli, P. Coluzzi, C. Vassalli, A. Grilli, M. Albano. "Caratterizzazione di materiali ceramici compositi da impiegare in reattori nucleari di nuova generazione con qualifica dei metodi e delle apparecchiature impiegate (Deliverable 2)". CIRTEN
105. P. D'Atanasio, A. Zambotti, M. L. Mongelli, I. Roselli. "Rapporto sullo studio di metodologie innovative di prova per le qualifiche elettromagnetiche, meccaniche e sismiche di componenti e sistemi per le centrali nucleari". ENEA
106. R. Lo Frano, G. Forasassi. "Studio di metodologie innovative di prova e di integrazione tra prove di tipo e metodo analitico per le qualifiche ambientali, meccaniche, sismiche ed elettromagnetiche di componenti e sistemi per le centrali nucleari Parte I: qualifica sismica di SSC nucleari". CIRTEN
107. F. Canavero, L. Cristinelli, R. Serra. "Studio di metodologie innovative di prova e di integrazione tra prove di tipo e metodo analitico per le qualifiche ambientali, meccaniche, sismiche ed elettromagnetiche di componenti e sistemi per le centrali nucleari. Parte II: camera riverberante per prove EMC". CIRTEN

STUDI SULLA PRODUZIONE ELETTRICA LOCALE DA BIOMASSE E SCARTI

1. S. Baccaro, C. Amelio, E. Ghisolfi. "Analisi dello stato dell'arte dei processi di rimozione della CO2 da biogas". FN S.p.A.
2. G. Cinti, F. Curbis, D. Penchini, G. Discepoli. E. Sisani, U. Desideri. "Anodi tolleranti all' acido solfidrico: caratterizzazione attraverso prove in cella da 100 cm^2 alimentata con gas simulante quello proveniente dalla catena biodigestore-cleanup-reformer". Università di Perugia
3. P. Greppi. "Rapporto PERT3 "Modellizzazione di Membrane". Università di Genova
4. S. Baccaro, C. Amelio, E. Ghisolfi. "Individuazione dei materiali e dei processi produttivi più idonei per lo sviluppo di membrane ceramiche". FN S.p.A.
5. L. Ansaloni, M. Giacinti Baschetti, M. G. De Angelis, G. C. Sarti. "Studio di processi in membrane polimeriche per l'arricchimento in metano del biogas: analisi preliminari su membrane commerciali". Università di Bologna
6. S. Baccaro, C. Amelio, E. Ghisolfi. "Realizzazione di campioni di elettrodi per celle a combustibile a carbonati fusi con il processo di estrusione". FN S.p.A.
7. E. Massi, R. Ciccoli, G.Migliore, L. Pirone, C. Alisi, F. Tasso, P. Marconi, S. Chiavarini, C. Ubaldi, C. Cremisini, A. R. Sprocati. "Sviluppo di sistemi alimentati con gas derivante da scarti e residui agricoli e zootecnici". ENEA
8. G. Braccio, I. De Bari, A. Molino. "Sviluppo di un processo in membrane polimeriche per la purificazione del biogas da CO_2 e H_2S". ENEA
9. Massimo Migliori, Girolamo Giordano. "Gassificazione di biomasse in acqua supercritica: Modellazione termodinamica". Università di Calabria
10. Massimo Migliori, Girolamo Giordano. "Gassificazione di biomasse in acqua supercritica: Stato dell'arte". Università di Calabria
11. P. U. Foscolo, K. Gallucci, F. Micheli. "Studio della valorizzazione dell'impianto di gassificazione di biomasse a letto fluidizzato internamente ricircolante per la produzione di metano". Università de l'Aquila
12. V. Calabrò, A. Iulianelli, A. Basile, A. Gugliuzza. "Schemi progettuali per la realizzazione del modulo a membrane piane per test con membrane polimeriche". Università di Calabria
13. V. Calabrò, A. Iulianelli, S. Liguori, A.Basile, A. Gugliuzza, A. Saraceno. "Stato dell'arte sui processi di rimozione della CO_2 mediante tecnologie a membrane". Università di Calabria
14. G. Braccio, A. Molino. "Sperimentazione di un sistema da 125 kW gassificatore di biomasse/celle a combustibile. Risultati delle simulazioni numeriche con analisi delle performance di cella in diverse condizioni di carico e di processo". ENEA
15. P.U. Foscolo, L. Rossi, K. Gallucci, F. Micheli. "Studio della valorizzazione dell'impianto di gassificazione di biomasse a letto fluidizzato internamente ricircolante per la produzione di metano. Parte A: Studio di configurazioni impiantistiche e variabili processuali per massimizzare la resa di metano". Università de l'Aquila
16. P.U. Foscolo, L. Rossi, K. Gallucci, F. Micheli. "Studio della valorizzazione dell'impianto di gassificazione di biomasse a letto fluidizzato internamente ricircolante per la produzione di metano. Parte B: Studio dei processi di purificazione finale del metano". Università de l'Aquila
17. V. Calabrò, A. Iulianelli, S. Liguori, A. Basile. "Test di permeazione miscele gassose simulanti con modulo a membrane ceramiche tubolari modificate". Università di Calabria
18. M.R. Mastrullo, F. Reale, M. Sarnataro, S. Scarfogliero, D. Toto. "Piattaforma WEB A.I.D.A. - Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants. Valorizzazione energetica delle biomasse mediante la digestione anaerobica e/o la gassificazione". Università di Napoli
19. A. Polettini, R Poma, E Massi. "Digestione anerobica a singolo e doppio stadio di scarti e residui agricoli e zootecnici". Università di Roma "La Sapienza"
20. G. Monteleone, M. De Francesco, S. Galli, P. Gislon, M. Marchetti. "Rimozione degli inquinanti da una corrente di biogas mediante l'utilizzo di carboni attivi". ENEA

21. M. Alvisi, E. Serra, R. Rossi, D. Dimaio, M. Massaro, M. L. Protopapa. “Sintesi e misura della permeselettività di membrane ceramiche per la separazione di gas (CO_2 - CH_4)”. ENEA
22. G. Monteleone, M. Carewska, S. Galli, V. Naticchioni. “Stato dell’arte dei processi di upgrading del biogas”. ENEA
23. F. De Poli Fabrizio, F. Fiocchetti, G. Izzo, A. Maron, G. Massini, L. Mentuccia, C. Patriarca, S. Rosa, A. Signorini, C. Varrone Cristiano. “Valorizzazione bioenergetica degli scarti agro zootecnici”. ENEA
24. E. Simonetti, H. Devianto, F. Zaza. “Sviluppo e caratterizzazione di anodi per celle a combustibile a carbonati fusi resistenti all’avvelenamento da idrogeno solforato presente nel gas di alimentazione”. ENEA
25. Silvia Silvi, Paolo Barghini, Massimiliano Fenice. “Studio delle popolazioni microbiche riguardanti processi di fermentazione anaerobica in condizioni di mesofilia”. Università della Tuscia
26. V. Calabrò, A. Iulianelli, S. Liguori, A. Basile, A. Gugliuzza, A. Saraceno, S. Curcio. “Misure di sperimentali di permeabilità per processi di rimozione della CO_2 mediante tecnologie a membrane polimeriche”. Università di Calabria

RICERCA SU CELLE FOTOVOLTAICHE INNOVATIVE

1. A. Aronne, M. L. Addonizio, O. Tari, P. Pernice, S. Daliento, E. Fanelli. “Sviluppo di ossidi trasparenti e conduttivi mediante processo Sol-Gel: sintesi di film di ZnO puro”. Università “Federico II” di Napoli, ENEA
2. A. Aronne, M. L. Addonizio, O. Tari, P. Pernice, S. Daliento, E. Fanelli. “Sviluppo di ossidi trasparenti e conduttivi mediante processo Sol-Gel: sintesi di film di ZnO drogato con Al o con B”. Università “Federico II” di Napoli, ENEA
3. Ricciardi, M. Pisco, A. Cusano. “Analisi numerica di cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile”. Università del Sannio
4. F. Buatier de Mongeot, C. Martella, C. Boragno, D. Chiappe. “Dispositivi fotovoltaici a film sottile potenziati da plasmoni su substrati metallo-dielettrici nanostrutturati”. Università di Genova
5. G. Cocorullo, F. Crupi, M. Lanuzza, V. Mocella, I. Rendina. “Progettazione e sviluppo di tecniche per il miglioramento del funzionamento delle celle solari a film sottile mediante cristalli fotonici e dispositivi plasmonici”. Università della Calabria, IMM-CNR
6. A. Mucci, F. Parenti, L. Schenetti. “Sintesi di polimeri semiconduttori per celle fotovoltaiche organiche”. Università di Modena e Reggio Emilia
7. Z. Syrgiannis, M. Prato. “Sintesi di derivati fullerenici e nanostrutture di carbonio per celle fotovoltaiche organiche”. Università degli Studi di Trieste
8. H.C. Neitzert, G. Landi, M. Henninger. “Studio di strati compositi di nanotubi di carbonio per il miglioramento di celle solari”. Università di Salerno
9. P. Morvillo, R. Diana. “Miglioramento delle prestazioni di celle fotovoltaiche polimeriche tramite ottimizzazione dei contatti elettrici”. ENEA
10. AA.VV. “Realizzazione e caratterizzazione di dispositivi fotovoltaici in film sottile di Cu_2ZnSnS_4“. ENEA, Università di Trento, Università di Roma “La Sapienza”, FN S.p.A

STUDI E VALUTAZIONI SUL POTENZIALE ENERGETICO DELLE CORRENTI MARINE

1. Bargagli, A. Carillo, V. Ruggiero, P. Lanucara, G. Sannino. “Modello di onde per l’area mediterranea”. ENEA, Consorzio interuniversitario per le Applicazioni di Supercalcolo per Università e Ricerca (CASPUR)
2. S. Calmanti, A. Dell’Aquila, A. Carillo, V. Ruggiero, P. Lanucara, G. Sannino. “Modello accoppiato per l’area Euro-mediterranea”. ENEA, CASPUR
3. A. Carillo , E. Napolitano, G. Leuzzi, P. Monti, P. Lanucara, V. Ruggiero, G. Sannino. “Valutazione del potenziale energetico delle correnti marine del Mar Mediterraneo”. ENEA, CASPUR, Università di Roma “La Sapienza”
4. S. Calmanti, A. Dell’Aquila. “Modello climatico regionale”. ENEA
5. G. Sannino, A. Carillo, A. Bargagli, E. Caiaffa , E. Lombardi, P. Monti, G. Leuzzi. “Valutazione del potenziale energetico del moto ondoso lungo le coste italiane”. ENEA, Università di Roma “La Sapienza”
6. B. Zanuttigh, E. Angelelli. “Analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina dai mari italiani (onde)”. Università Alma Mater di Bologna
7. P. Monti (Dicea), G. Leuzzi (Dicea). “Analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento della energia marina dalle correnti marine”. Università di Roma “La Sapienza”

UTILIZZO PULITO DEI COMBUSTIBILI FOSSILI E CATTURA E SEQUESTRO DELLA CO_2

1. P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, A. Dedola, A. Assettati, G. Guidarelli. “Analisi e sperimentazione dei processi di gassificazione”. ENEA
2. C. Bassano, P. Deiana, A. Dedola, M. Subrizi. “Sperimentazione di sistemi di clean-up e trattamento del syngas”. ENEA
3. G. Calì, A. Pettinau, M. Caboni, F. Ferrara, C. Frau, D. Multineddu, A. Orsini. “Test sperimentali di gassificazione in letto fisso up-draft presso la piattaforma pilota Sotacarbo”. Sotacarbo Srl
4. G. Calì, M. Caboni, F. Tedde, P. Miraglia, E. Maggio, M. Fadda, A. Madeddu. “Migliorie di impianto e inserimento di nuova strumentazione”. Sotacarbo Srl

5. G. Calì, P. Miraglia, D. Multineddu, M. Caboni, F. Tedde. “Sperimentazione di sistemi di lavaggio e depolverazione elettrostatica”. Sotacarbo Srl
6. A. Orsini, F. Ferrara, A. Plaisant, M. Fadda, D. Multineddu. “Sperimentazione di sistemi di campionamento e analisi tar”. Sotacarbo Srl
7. C. Frau, F. Ferrara, M. Caboni, A. Plaisant, P. Miraglia, F. Tedde, A. Pettinau. “Produzione di energia elettrica e H_2 a partire da syngas da carbone”. Sotacarbo Srl
8. F. Ferrara, C. Frau, M. Caboni, G. Calì, F. Tedde, A. Pettinau. “Sperimentazione di sistemi di separazione della CO_2 operata sui gas provenienti dal gassificatore della piattaforma pilota Sotacarbo”. Sotacarbo Srl
9. G. Calì, M. Caboni, F. Ferrara, A. Madeddu, P. Miraglia, F. Tedde, E. Loria. “Progettazione, realizzazione e prime prove sperimentali dell’unitá di rigenerazione termica di soluzioni amminiche presso la piattaforma pilota Sotacarbo”. Sotacarbo
10. M. Fadda, E. Maggio, A. Plaisant, A. Madeddu. “Valutazione tecnico economica dei processi”. Sotacarbo Srl
11. V. Tola, G. Cau. “Analisi e modellazione di processi di shift-conversion del CO in CO_2 integrati con impianti IGCC con rimozione della CO_2”. Università degli Studi di Cagliari
12. M. Giorgia Cutrufello, E. Rombi, R. Monaci, I. Ferino, C. Cannas, A. Musinu, G. Piccaluga. “Studio e sviluppo di processi e materiali innovativi per il trattamento di syngas da carbone”. Università degli Studi di Cagliari
13. P. De Filippis, M. Scarsella, B. De Caprariis, N. Verdone. “Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione”. Università di Roma “La Sapienza”
14. M. Paci, P. Tagliatesta, F. Bertocchi, T. Eliseo, A. Leoni, G. D’ Arcangelo, C. Schillaci. “Studio e caratterizzazione dei principali composti provenienti dalla gassificazione del carbone”. Università di Roma Tor Vergata
15. S. Cassani, L. Pagliari, R. Mecozzi. “Specifica generale – Studio sul processo di devolatilizzazione del carbone Sulcis”. ENEA
16. S. Scaccia, A. Calabrò, R. Mecozzi. “Studio del processo di pirolisi del carbone Sulcis per ottenere un char ottimizzato per la produzione di metano”. ENEA
17. R. Baciocchi, G. Costa, M. Di Gianfilippo, M. Morone, D. Ochsenbein, D. Zingaretti. “Studio sulle potenzialità della carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio di anidride carbonica prodotta da impianti di piccola/media taglia - II anno di attività: Studio di fattibilità dello stoccaggio di anidride carbonica da gas di sintesi mediante carbonatazione di ceneri e scorie industriali”. Università di Roma “Tor Vergata”
18. C. Bassano, P. Deiana. “Analisi e modellazione di impianti Coal To Liquids”. ENEA
19. A. Pettinau, E. Maggio. “Stato dell'arte delle tecnologie CTL e valutazione della possibile integrazione negli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo”. Sotacarbo
20. C. G. Visconti, P. Forzatti. “Studi e sperimentazione del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone”. Politecnico di Milano
21. M. Seggiani. “Analisi e modellazione di processi e componenti per la produzione di syngas e combustibili liquidi da carbone”. Università di Pisa
22. C. Herce, S. Stendardo , A. Calabrò. “Pretrattamenti della dolomite calcinata per la cattura della CO_2 ad alta temperatura: calcinazione in 2-step”. CIRCE, ENEA
23. S. Stendardo, A. Calabrò, P.U. Foscolo. “Modellazione di un reattore eterogeneo fluido-solido per la produzione di idrogeno e la cattura della CO_2”. ENEA, Università de L’Aquila
24. S. Stendardo, LK. Andersen, C. Herce, A. Calabrò. “Caratterizzazione di un sorbente a base di calcio per la cattura di CO_2 ad alta temperatura”. CIRCE, ENEA, JRC-IE
25. C. Herce, S. Stendardo, A. Calabrò. “Metodologia per l’analisi della stabilità della fluidizzazione e perdite di carico nel carbonatatore di Zecomix”. CIRCE, ENEA
26. C. Herce, R. Mecozzi, A. Di Annunzio, A. Calabrò. “Fabbisogno energetico della cattura di CO_2 nel impianto Zecomix”. CIRCE, ENEA
27. C. Herce, R. Mecozzi, A. Di Annunzio, A. Calabrò. “Caratterizzazione della dolomite come sorbente della CO_2: esperimenti in TGA”. CIRCE, ENEA
28. P. U. Foscolo, L. Di Felice, K. Gallucci, S. Stendardo. “Validazione modello a grani per l’assorbimento di CO_2 in una particella di dolomite calcinata: verifica della affidabilità del modello mediante dati sperimentali ottenuti su un ampio campo di variazione delle dimensioni delle particelle del sorbente”. ENEA, Università de L’Aquila
29. P. U. Foscolo, S. Stendardo. “Modello short cut del reattore di decarbonatazione e simultaneo steam reforming del metano dell’impianto ZECOMIX: approccio chimico-fisico e sviluppo delle equazioni del modello matematico applicando l’ipotesi del perfetto mescolamento”. ENEA, Università de L’Aquila
30. P. U. Foscolo, L. Di Felice, K. Gallucci. “Ottimizzazione del ciclo di gassificazione carbone - decarbonatazione syngas e calcinazione sorbente”. Università de L’Aquila
31. F. Ferrara, C. Frau, M. Caboni, A. Orsini, A. Pettinau. “Impianto da banco di assorbimento della CO2. Messa a punto delle apparecchiature e analisi sperimentale del processo”. Sotacarbo Srl
32. A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Mongiello. “Progetto di una camera di combustione per turbogas alimentata a syngas di tipo trapped vortex”. ENEA

33. E.Giulietti, M. Nobili, C. Stringola, G. Guidarelli, E. Giacomazzi. “Prove sull’impianto MICOS con bruciatore a tecnologia Trapped Vortex”. ENEA
34. R. Camussi, T. Pagliaroli. “Sperimentazione in galleria del vento di bruciatori non convenzionali”. Università Roma Tre
35. M. Seggiani. “Analisi e modellazione di processi e componenti per la produzione di syngas e combustibili liquidi da carbone”. Università di Pisa
36. G. Rossi, B. Favini, E. Giacomazzi, F.R. Picchia, N. Arcidiacono. “Mesh Refinement per simulazioni LES di flussi comprimibili e reattivi”. Università di Roma “La Sapienza”, ENEA
37. F. Donato, B. Favini, G. Calchetti, A. Di Nardo. “Simulazioni di un combustore con tecnologia ISOTHERM”. Università di Roma “La Sapienza”. ENEA
38. D. Cecere, E. Giacomazzi, et al. “An Immersed Volume Method for Large Eddy Simulation of compressible flows”. ENEA
39. T. Faravelli, E. Ranzi, A. Frassoldati, T. Maffei. “Modellazione della volatilizzazione e ossidazione di carbone del Sulcis”. Politecnico di Milano
40. M. de Joannon, P. Sabia , A. Cavaliere. “Strutture reattive locali relative a prodotti di devolatilizzazione/gasificazione del polverino di carbone in un bruciatore operante in condizione “flameless”. IRC-CNR, Università di Napoli
41. G. Coraggio, L. Biasci, C. Galletti, M. Faleni, L. Tognotti. “Sviluppo ed ottimizzazione di metodi e strumentazione per la diagnostica di sistemi a carbone operanti in ossi-combustione”. International Flame Research Foundation-Livorno, Università di Pisa
42. R. Bruschi. “Sviluppo e messa a punto di metodologie diagnostiche per lo studio delle principali variabili chimico-fisiche del processo di ossi-combustione”. Energy System Engineering Srl
43. R. Bruschi. “Sviluppo e messa a punto di metodologie diagnostiche per lo studio delle principali variabili fisiche del processo di ossi-combustione – Parte 2: analisi dati e sviluppo di metodologie diagnostiche”. Energy System Engineering Srl
44. R. Bruschi. “Test ed analisi su combustore semi-industriale per lo sviluppo di metodologie diagnostiche ottiche avanzate per il controllo della ossi-combustione di carbone. Parte 1: Campagna di misure. parte 2: Analisi e sviluppo di metodologie diagnostiche”. Energy System Engineering Srl
45. V. Barbarossa, G. Vanga. “Metanazione della CO_2 con H_2”. ENEA
46. V. Barbarossa, G. Vanga, G. Battipaglia. “Metodo di cattura selettivo della CO_2”. ENEA
47. A. Pettinau, R. Cara, C. Frau, E. Loria, A. Madeddu, D. Multineddu, A. Plaisant. “Stato dell'arte delle tecnologie CCS e proposta di una configurazione impiantistica per un impianto dimostrativo a carbone”. Sotacarbo Srl
48. G. Cau, V. Tola. “Analisi e modellazione dei processi di conversione termica del carbone con trattamento e conversione degli effluenti gassosi prodotti”. Università degli Studi di Cagliari
49. R. Ciccu, C. Tilocca, A. Mazzella. “Analisi comparativa delle potenzialità di confinamento della CO_2 per via geologica e mineralogica all’interno del bacino minerario del Sulcis”. Università degli Studi di Cagliari
50. S. Lombardi, A. Annunziatellis, S. Graziani. “Realizzazione e valorizzazione del CCS nel Sulcis”. Università di Roma “La Sapienza”

TECNOLOGIE PER L’EFFICIENZA ENERGETICA NEI SERVIZI

1. M. Presutto, S. Fumagalli. “Sviluppo di specifiche per la progettazione ecocompatibile: definizione metodi e acquisizione strumentazione tecnico-scientifica”. ENEA
2. M. Presutto. “Pubblicazione dei metodi di misura per gli elettrodomestici del lavaggio a supporto della legislazione comunitaria”. ENEA
3. M. Presutto, S. Fumagalli, P. Pistochini. “Utilizzo delle specifiche tecniche di eco-progettazione ed etichetta energetica per il green procurement - Progetti pilota di acquisti verdi”. ENEA
4. M. Presutto, S. Fumagalli, P. Pistochini. “Diffusione del nuovo sistema di etichettatura energetica a partire dai principali elettrodomestici”. ENEA
5. P. Pistochini, M. Presutto, V. Longoni. “I laboratori per la market surveillance sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica per gli elettrodomestici del freddo e i forni elettrici”. ENEA
6. G. Leonardi, M. G. Villani, V. Longoni, V. Tarantini, G.P. Bottani, D. Scarano, R. Pollidori. “Il laboratorio ENEA sugli elettrodomestici del freddo e forni elettrici. Parte I: caratteristiche e potenzialità di prova. Parte II: caratteristiche, prime prove e potenzialità del laboratorio FIRELAB”. ENEA
7. M. G. Villani. “Inchiesta su caratteristiche e utilizzo degli elettrodomestici del freddo, del lavaggio e della cottura da parte degli utenti finali”. ENEA
8. I. Bertini, L. Castellazzi, F. Ceravolo, B. Di Pietra, R. Iannucci, F. Margiotta, A. Pannicelli, G.Puglisi. “Integrazione di layout impiantistici nella piattaforma di simulazione ODESSE (Optimal DESignfor Smart Energy)”. ENEA
9. M. A. Segreto. “Linee guida per progetti a consuntivo e proposte di miglioramento del meccanismo dei Titoli di efficienza energetica”. ENEA
10. M. Chinnici, A. Quintiliani. “Definizione di algoritmi e indicatori per l’efficientamento dei centri di elaborazione dati (CED)”. ENEA

11. P. Caputo,. G. Costa, V. Canotto. “Rapporto sulla validazione del modulo edificio”. Politecnico di Milano
12. P. Caputo, G. Costa, L. Pistocchini, A. Roscetti, V. Canotto. “Comportamento della piattaforma in relazione al corretto abbinamento tra curve di domanda e sistemi di generazione e controllo”. Politecnico di Milano
13. M. Badami, A. Portoraro. “Micro - trigenerazione nel settore residenziale con l’utilizzo di motori a combustione interna:sviluppo di un modello matematico di un assorbitore a bromuro di litio”. Politecnico di Torino
14. M. Beccali, F. D’Ippolito, P. Finocchiaro, Bettina Nocke. “Integrazione del modello DEC sviluppato in ambiente Simulink nella Piattaforma di simulazione ODESSE”. Università di Palermo
15. M. Beccali, F. D’Ippolito, P. Finocchiaro, Bettina Nocke. “Manuale utente del software Solar DEC integrato in ODESSE”. Università di Palermo
16. G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso. “Sviluppo di un ambiente di monitoraggio, controllo e gestione remota di una rete di micro_poligeneratori distribuiti. Deliverable A”. Università del Sannio, Seconda Università di Napoli (SUN)
17. G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso. “Risultati dell'attività sperimentale su sistemi distribuiti di micro-poligenerazione. Deliverable B”. Università del Sannio, Seconda Università di Napoli (SUN)
18. M. L. Di Silvestre, G. Graditi, M. G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, G. Zizzo, I. Bertini, G. Graditi. “Architetture e logiche di controllo ottimale di microreti per la razionalizzazione energetica. Report 1: Identificazione ed analisi di architetture e logiche di controllo ottimale di microreti per la razionalizzazione energetica”. Università di Palermo, ENEA
19. M. L. Di Silvestre, G. Graditi, M. G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, G. Zizzo, I. Bertini, G. Graditi. “Architetture e logiche di controllo ottimale di microreti per la razionalizzazione energetica. Report 2: applicazioni in reti di distribuzione”. Università di Palermo, ENEA
20. L. De Santoli, G. Lo Basso, G. Caruso. “Calibrazione di un sistema trigenerativo di piccola taglia e modellazione di un sistema innovativo per cogenerazione a miscela di idrogeno”. Università di Roma “La Sapienza”
21. F. Savorana. “Gli strumenti disponibili per un concreto sviluppo delle ESCo e dei contratti a rendimento energetico. Definizione di linee guida operative alla luce del decreto legislativo 115/2008 - Deriverable A”. Università di Padova
22. F. Savorana. “Gli strumenti disponibili per un concreto sviluppo delle ESCo e dei contratti a rendimento energetico. Definizione di linee guida operative alla luce del decreto legislativo 115/2008 - Deriverable B”. Università di Padova
23. S. Capelli, D. Di Santo, G. Tomassetti. “Fondi di garanzia: linee guida”. FIRE
24. S. Capelli, D. Di Santo, G. Tomassetti. “Fondi di garanzia : esempi per il settore dell’energia”. FIRE

TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ELETTRICO NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA

1. M .Annunziato, C. Meloni, S. Pizzuto, F. Bucci, F. Moretti. “Sviluppo sistemi intelligenti per la gestione della smart street”. ENEA, Università di Roma “La Sapienza”, Università di Roma Tre
2. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Relazione relativa all’attività A: Contributo allo sviluppo di sistemi di illuminazione intelligenti per la gestione della “Smart Street”. Parte prima: Ricerca progettuale”. Politecnico di Milano
3. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. Relazione relativa all’attività A: Contributo allo sviluppo di sistemi di illuminazione intelligenti per la gestione della “Smart Street”. Parte seconda: Concept - P.L.U.S. (Public Lighting Unit System)”. Politecnico di Milano
4. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Relazione relativa all’attività B: Ricerca sperimentale e qualificazione sistemi di illuminazione innovativa. Punto 1: Relazione scientifica sulla metodologia di valutazione dell’affidabilità degli apparecchi di illuminazione a LED”. Politecnico di Milano
5. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Relazione relativa all’attività B: Ricerca sperimentale e qualificazione sistemi di illuminazione innovativa. Punto 2: Resa cromatica”. Politecnico di Milano
6. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Relazione relativa all’attività B: Ricerca sperimentale e qualificazione sistemi di illuminazione innovativa. Punto 3: Rapporti di misura su sorgenti LED”. Politecnico di Milano
7. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Relazione relativa all’attività B: Ricerca sperimentale e qualificazione sistemi di illuminazione innovativa Punto 3: Rapporti di misura su prodotti e/o prototipi di illuminazione”. Politecnico di Milano
8. M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Relazione relativa all’attività C: Realizzazione pilota di illuminazione efficiente in una situazione applicativa complessa: implementazione di nuove funzionalità. Valutazione metrologica del comfort visivo tramite misure video fotometriche e colorimetriche. Rapporti di misura sulle situazioni campione analizzate”. Politecnico di Milano
9. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Test sulla misura di contrasto percepito”. Università degli Studi di Milano
10. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Test percettivi sull’indice di resa cromatica”. Università degli Studi di Milano
11. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Studio di misure alternative per la misura dell'indice di resa cromatica e del contrasto percepito”. Università degli Studi di Milano
12. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Realizzazione di software implementante le misure alternative dell'indice di resa cromatica”. Università degli Studi di Milano
13. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Realizzazione di software implementante le misure alternative dell’indice di contrasto percepito”. Università degli Studi di Milano

14. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Test percettivi per la valutazione del contrasto di immagini digitali”. Università degli Studi di Milano
15. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Rasheed. “Test percettivi per la valutazione di differenti indici di resa cromatica”. Università degli Studi di Milano
16. F. Gugliermetti, F. Bisegna, J. Bundo. “Analisi dei sistemi integrati LED – Fotovoltaico per applicazioni stradali, approccio energetico e valutazione quantitativa”. Università di Roma “La Sapienza”
17. F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti. “Illuminazione urbana e scenari di progettazione”. Università di Roma “La Sapienza”
18. F. Gugliermetti, F. Bisegna, A. C. Violante. “Studio per la definizione di una metodologia di analisi di impatto prodotto dall’illuminazione artificiale notturna sull’ambiente naturale e sull’ambiente urbano”. Università di Roma “La Sapienza”
19. F. Gugliermetti, F. Bisegna, M. Barbalace. “Stato dell’arte dei LED (Light EmittingDiodes)”. Università di Roma “La Sapienza”
20. P. Iacomussi, G. Rossi, G. Scialpi. “Caratterizzazione di impianti di illuminazione ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto”. Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM)
21. P. Soardo. “Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l’alto”. Associazione Italiana di Illuminazione (AIDI)
22. S. Fumagalli, A. Frascone, R. Pollidori, E. Rusconi, G. P. Bottani, S. Ziglioli, M. Rossi, F. Musante, D. Casciani. “Marcallo con Casone. Via Roma. Misure illuminotecniche nella situazione attuale e descrizione del nuovo impianto”. ENEA, Politecnico di Milano
23. G. Leonardi, A. Scognamiglio. “Prove sperimentali su nuovo prototipo Stapelia”.ENEA
24. M. Annunziato, G. Giuliani, N. Gozo, C. Honorati Consonni, A. Frascone, F. Bucci, B. Lo Bue. “Progetto Lumière: Efficienza Energetica nell’illuminazione Pubblica. Percorso e metodologie di sviluppo”. ENEA, Università di Roma “La Sapienza”, Università di Milano Bicocca
25. AA.VV. “Modello sperimentale di audit energetico Lumiere”. ENEA, Università di Roma “La Sapienza”, AGESI, FEDERESCO
26. AA.VV. “LINEE GUIDA. Soluzioni economico-finanziarie per la riqualificazione della illuminazione pubblica”. Università Roma Tre, AGESI, E2SCo, CONSIP, Università di Pisa, FEDERESCO, Ministero Sviluppo Economico, ENEA

TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ELETTRICO NEL SETTORE CIVILE

1. G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio, G. Antonacci. “Definizione degli anni tipo climatici delle province di alcune regioni italiane (Abruzzo, Umbria, Basilicata, Lazio, Marche, Campania, Puglia, Calabria, Molise, Sicilia)”. CTI
2. L. Terrinoni , P. Signoretti, D. Iatauro. “Edifici del settore terziario: seconda applicazione dell'indice di severità climatica ‘all weather’”. ENEA
3. AA.VV. “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso banche”. CRESME Ricerche SpA
4. AA.VV. “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso centro commerciale”. CRESME Ricerche SpA
5. S. Agnoli, M. Zinzi. “Analisi parametrica delle prestazioni energetiche di edifici residenziali finalizzata all’implementazione di un sistema di classificazione energetica dei serramenti”. ENEA
6. F. Belcastro, E. Biele, V. Bini, M. Bramucci, D. Di Santo, D. Forni, G. Tomassetti. “Sistemi di telegestione e telecontrollo nel settore ospedaliero. Executive Summery”. FIRE
7. F. Belcastro, E. Biele, V. Bini, M. Bramucci, D. Di Santo, D. Forni, G. Tomassetti. “Sistemi di telegestione e telecontrollo nel settore ospedaliero”. FIRE
8. S. Elia, E. Santini. “Studio e progetto di un sistema di domotica per un kit ‘fai da te’ di facile installazione e utilizzo per l’utente ed a basso costo”. Università di Roma “La Sapienza”
9. M. Boriani, M. Giambruno, A. Garzulino. “Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l’efficienza energetica negli edifici di pregio”. Politecnico di Milano
10. AA.VV. “Studio, sviluppo e definizione di linee guida per interventi di miglioramento per l’efficienza energetica negli edifici di pregio e per la gestione efficiente del sistema edificio-impianto”. Università di Pavia, Arkedos, Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l’Innovazione (SITI)
11. W. Grassi, F. Fantozzi, D. Testi, E. Menchetti, P. Conti, D. Della Vista, E. Schito, R. Manetti. “Definizione di una metodologia per l’audit energetico negli edifici ad uso residenziale e terziario”. Università di Pisa
12. R. Schettini, M. Martini, G Ciocca, F. Marini, A. Colombo, I. Gagliardi. “Applicazione di modalità innovative GIS per la valorizzazione e la diffusione di opere e tecnologie, per l’efficienza energetica, negli edifici di pregio”. Università di Milano Bicocca, CNR-ITC, ENEA
13. G. Fasano, D. Iatauro, P. Morgante, A. Scognamiglio. “Studio di prefattibilità degli interventi dimostrativi proposti per il Parco della Villa Reale di Monza”. ENEA
14. A. Muscio, A. Libbra, C. Siligardi, P. Tartarini. “Sviluppo di materiali ad elevata riflessione solare per l’ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici durante la stagione estiva”. Università di Modena e Reggio Emilia

15. L. Fiumi, L. Congedo, C. Meoni. “Elaborazione dati del sensore MIVIS per l’individuazione di elementi e materiali da costruzione e analisi del comportamento termico, in aree campione, preventivamente selezionate nell’area metropolitana di Roma”. IIA-CNR
16. A. Fanchiotti, E. Carnielo. “Impatto di cool material sulla mitigazione dell’isola di calore urbana e sui livelli di comfort termico negli edifici”. Università Roma Tre
17. A. G. Daneo. “Sviluppo di una tecnica di estrapolazione dell’emissività spettrale a partire dai dati misurati con sfera integratrice al medio infrarossi”. Stazione Sperimentale del Vetro
18. M. Filippi, S.P. Corgnati, V. Fabi, N. Talà. “Statistical investigations and data-driven prediction methods to assess total energy use in buildings (IEA – ECBCS Annex 53)”. Politecnico di Torino
19. Maurizio Cellura, Aldo Orioli. “Partecipazione alle attività della TASK 40 ‘Net Zero Energy Buildings’ Joint Project SHC TASK 40 /ECBCS Annex 52”. Università degli Studi di Palermo

UTILIZZO DELL’ENERGIA ELETTRICA E SOLARE PER LA CLIMATIZZAZIONE ESTIVA

1. G. Corallo, A. Franchi. “Realizzazione di un prototipo reversibile di macchina ad assorbimento da 18 kW con alimentazione ad acqua calda da adibire al solar cooling and heating e prove sperimentali preliminarI”. ENEA
2. A. Mariani. “Analisi sperimentale pannelli solari termici a tubi evacuati ad heat pipe”. ENEA
3. G. Corallo, A. Simonetti, L. Di Rienzo, A. Fanchiotti. “Monitoraggio impianto di solar heating and cooling a servizio dell’edificio F-51”. ENEA, Università Roma Tre
4. G. Corallo, A. Franchi, A. Simonetti, L. Di Rienzo, A. Fanchiotti. “Messa in funzione e analisi sperimentale del prototipo di macchina elioassistita”. ENEA, Università Roma Tre
5. N. Calabrese, R. Trinchieri, A. Simonetti. “Solar heating and cooling innovativo su edificio F-92”. ENEA
6. N. Calabrese, R. Trinchieri. “Pompa di calore a CO_2 (R744)”. ENEA
7. Guido Giordano, Maria Paola Campolunghi. “Realizzazione di un WEB G.I.S. finalizzato alla gestione delle risorse geotermiche a bassa entalpia con sonde verticali”. Università Roma Tre
8. M. Beccali, P. Finocchiaro, V. Lo Brano, B. Nocke. “Progettazione costruttiva di un sistema solar DEC per uffici e test di un refrigeratore ad acqua-ammoniaca di tipo commerciale”. Università degli Studi di Palermo
9. L.Rubini, G. Habib, M. Lavra. “Tecnologie solari a concentrazione - Produzione di calore a media temperatura”. ISES ITALIA
10. V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio. “Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling”. ENEA
11. R. Lazzarin, M. Noro, F. Busato. “Studio di sistemi di accumulo a cambiamento di fase nel solar cooling”. Università degli Studi di Padova
12. M. Annunziato, M. De Felice, C. Meloni, S. Pizzuti, M.Bosello. “Modelli predittivi e soluzioni pilota per la diagnostica e controllo di smart buildings”. ENEA, Università Roma Tre
13. S. P. Corgnati, V. Verda, G. Baccino, A. Capozzoli, F. Causone, N. Talà. “Strategie di diagnostica ed ottimizzazione multiobiettivo di edifici con climatizzazione innovativa”. Politecnico di Torino

NUOVI MATERIALI E COMPONENTI INNOVATIVI PER I MEZZI DI TRASPORTO

1. F. Vellucci, G. Pede. “Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive”. ENEA
2. M. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta. “Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS”. Università di Pisa
3. E. Rossi, A. Puccetti, F. Smargiasse, G. Buja, M. Bertoluzzo. “Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia: progetto e realizzazione di un sistema di accumulo misto batterie-supercondensatori per microcar elettrica”. ENEA, Università di Padova
4. E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino, S. Grillo. “Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia quali supercondensatori e sistemi di accumulo misti (batterie + supercondensatori)”. Politecnico di Milano
5. G. Pede, E. Rossi, C. Villante. “Report sulle necessità energetiche di un quadriciclo e sui suoi possibili schemi di trazione ibrida e full-electric”. ENEA
6. G. Pede, V. Sglavo, F. Vellucci, C. Villante. “Report su test di ricarica rapida di batterie a Litio”. ENEA
7. A. Ometto, F. Parasiliti, L. Di Leonardo. “Convertitori commerciali per applicazioni automotive e studio di sistemi di carica rapida per veicoli elettrici”. Università dell’Aquila
8. F. Cappellaro e P. Masoni. “Applicazione della metodologia Life Cycle Assessment per la valutazione energetico ambientale di batterie per autotrazione”. ENEA
9. M. Cellura, S. Longo, A. Orioli. “Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche”. Università di Palermo
10. G. Barbieri, F. Cognini, M. Massimo, L. Pilloni. “Sviluppo delle apparecchiature e del protocollo di qualifica meccanica per pannelli AFS”. ENEA
11. G. Barbieri, F. Padella. “Test di schiumatura e definizione dei parametri e degli apparati necessari alla produzione di schiume”. ENEA
12. Rinaldi, L. Pilloni. “Analisi SEM/EDS di schiume AFS”. ENEA

13. R. Montanari. “Studio dei principali parametri di schiumatura per schiume di alluminio e supporto alla progettazione di un impianto pilota di schiumatura”. Università di Roma Tor Vergata
14. G. Barbieri, F. Cognini, M. Massimo, P. Colucci, M. B. Alba. “Sviluppo di procedimenti di saldatura laser ed EBW per pannelli AFS”. ENEA
15. E. Bemporad, M. Sebastiani. “Analisi macro e micro strutturale del materiali base e di giunti saldati di AFS”. Università Roma Tre
16. M. Schwarz, F. Caretto, T. Marcianò, F. Valentino. “Il riciclaggio di materiali compositi in PP rinforzato con kenaf e messa a punto di una/due tecnologie per la realizzazione di materiali cellulari ibridi metallo-polimero basati su sfere/grani cave”. ENEA
17. L. Carrino, M. Durante. “Realizzazione e caratterizzazione di laminati in composito polimerico termoplastico rinforzato con fibre naturali. Stato dell’arte e scelta della matrice polimerica e della fibra di rinforzo”. Università di Napoli Federico II
18. L. Carrino, M. Durante. “Realizzazione e caratterizzazione di laminati in composito polimerico termoplastico rinforzato con fibre naturali. Produzione di laminati con fibre naturali e loro caratterizzazione”. Università di Napoli Federico II