



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

**ACCORDO DI PROGRAMMA**  
**MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - ENEA**  
**SULLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO**

**PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2012**

Marzo 2013



## INDICE

<b>PREMESSA .....</b>	<b>5</b>
<b>AREA A GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE .....</b>	<b>9</b>
<b>Progetto A.4 SISTEMI AVANZATI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA .....</b>	<b>9</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	9
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	13
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	18
<b>AREA B PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE.....</b>	<b>25</b>
<b>Progetto B.1.1 SVILUPPO DI SISTEMI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA BIOMASSE E L'UPGRADING DEI     BIOCOMBUSTIBILI.....</b>	<b>25</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	25
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	30
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	36
<b>Progetto B.1.3 ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE .....</b>	<b>41</b>
<b>LINEA PROGETTUALE 1: RICERCA SU CELLE FOTOVOLTAICHE INNOVATIVE .....</b>	<b>41</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	41
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	44
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	48
<b>LINEA PROGETTUALE 2: SOLARE TERMODINAMICO.....</b>	<b>53</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	53
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	58
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	61
<b>Progetto B.1.4 STUDI E VALUTAZIONI SULLA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DALLE CORRENTI MARINE E DAL MOTO ONDOSO...65</b>	<b>65</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	65
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	70
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	74
<b>Progetto B.2 CATTURA E SEQUESTRO DELLA CO<sub>2</sub> PRODOTTA DALL'UTILIZZO DEI COMBUSTIBILI FOSSILI .....</b>	<b>79</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	79
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	83
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	92
<b>Progetto B.3.1 SVILUPPO COMPETENZE SCIENTIFICHE NEL CAMPO DELLA SICUREZZA NUCLEARE E COLLABORAZIONE AI PROGRAMMI     INTERNAZIONALI PER IL NUCLEARE DI IV GENERAZIONE .....</b>	<b>102</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	102
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	106
<b>LINEA PROGETTUALE 1: SVILUPPO COMPETENZE SCIENTIFICHE NEL CAMPO DELLA SICUREZZA NUCLEARE.....</b>	<b>117</b>
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	117
<b>LINEA PROGETTUALE 2: COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE PER IL NUCLEARE DI IV GENERAZIONE .....</b>	<b>122</b>
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	122
<b>Progetto B.3.2 ATTIVITÀ DI FISICA DELLA FUSIONE COMPLEMENTARI A ITER.....</b>	<b>131</b>
IL QUADRO DI RIFERIMENTO	131
IL PROGETTO NEL TRIENNIO	136
PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	141

<b>AREA C</b>	<b>RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA .....</b>	<b>148</b>
<b>Progetto C.1</b>	<b>RISPARMIO DI ENERGIA ELETTRICA NEI SETTORI: CIVILE, INDUSTRIA E SERVIZI.....</b>	<b>148</b>
	IL QUADRO DI RIFERIMENTO	148
	IL PROGETTO NEL TRIENNIO	150
	PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	153
<b>Progetto C.2</b>	<b>SVILUPPO DI MODELLI PER LA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI DI EFFICIENZA ENERGETICA SUL PATRIMONIO IMMOBILIARE PUBBLICO .....</b>	<b>161</b>
	IL QUADRO DI RIFERIMENTO	161
	IL PROGETTO NEL TRIENNIO	163
	PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	167
<b>Progetto C.3</b>	<b>UTILIZZO DEL CALORE SOLARE E AMBIENTALE PER LA CLIMATIZZAZIONE.....</b>	<b>173</b>
	IL QUADRO DI RIFERIMENTO	173
	IL PROGETTO NEL TRIENNIO	177
	PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	182
<b>Progetto C.4</b>	<b>PRODOTTI E PROCESSI PER IL MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NELL'ELETTROMOBILITÀ.....</b>	<b>187</b>
	IL QUADRO DI RIFERIMENTO	187
	IL PROGETTO NEL TRIENNIO	192
	PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ	196
<b>COMUNICAZIONE E DIFFUSIONE DEI RISULTATI.....</b>		<b>200</b>

## PREMESSA

Il presente Piano Annuale di Realizzazione (PAR 2012) è riferito alla prima annualità dell'Accordo di Programma 2012-2014 tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA per la Ricerca di Sistema Elettrico, stipulato in data 4 marzo 2013.

Il Piano proposto è un piano annuale da 27 M€, con durata delle attività da ottobre 2012 a settembre 2013.

Il Piano viene articolato per attività di ricerca, obiettivi intermedi, costi e tempi di realizzazione.

### Quadro di riferimento

Il presente Piano Annuale di Realizzazione tiene conto dei seguenti riferimenti:

- Il Piano Triennale per la ricerca nell'ambito del sistema elettrico nazionale 2012 -2014 approvato con Decreto del MSE del 9 novembre 2012 , pubblicato sulla G.U. Serie Generale n. 25 del 30 gennaio 2013. Il Piano stabilisce che le attività a totale beneficio degli utenti del sistema elettrico nazionale, siano affidate ad organismi a prevalente partecipazione pubblica e finanziati al 100% e riguardino temi di ricerca ad alto rischio (ricerca fondamentale) o studi di carattere sistemico e prenormativo
- il Piano Operativo Annuale (POA) per l'anno 2012 per la Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, approvato con il suddetto Decreto Ministeriale, che prevede all'art. 2 un finanziamento di 27 milioni di euro per le attività affiliate a ENEA
- il documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili" approvato con delibera dell'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas n. 19 del 24 gennaio 2013
- gli indirizzi programmatici espressi dalla Direzione Generale per l'energia nucleare, le energie rinnovabili e l'efficienza energetica del MSE e le indicazioni operative del Comitato di Sorveglianza dell'Accordo di Programma
- la Strategia Energetica Nazionale (SEN), che ritiene di interesse prioritario per il Paese:
  - La ricerca sulle tecnologie rinnovabili innovative, in particolare il solare a concentrazione e i biocarburanti di seconda generazione
  - Lo sviluppo di sistemi di accumulo, anche in ottica di mobilità sostenibile
  - La ricerca su materiali e soluzioni di efficienza energetica e il loro trasferimento tecnologico
  - Lo sviluppo di tecnologie di cattura e confinamento della CO<sub>2</sub>
  - Lo sviluppo, in un'ottica di più lungo periodo, di collaborazioni internazionali nel campo della sicurezza e degli studi sui reattori nucleari a fissione di IV generazione e sulla fusione
- quanto previsto a livello europeo dallo Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan), che prevede:
  - nel medio termine una maggiore diffusione delle tecnologie già oggi disponibili, in particolare lo sviluppo del fotovoltaico e del solare termodinamico, la generazione di energia distribuita e l'utilizzo di fonti rinnovabili, lo sviluppo dei biocombustibili, un aumento dell'efficienza energetica nei settori del civile, dell'industria e dei trasporti
- nel lungo termine, uno sforzo di ricerca e innovazione tecnologica in particolare verso: la seconda generazione di rinnovabili, lo stoccaggio dell'energia, lo sviluppo di nuovi materiali e tecnologie per l'efficienza energetica; la cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, i progetti dimostrativi per reattori nucleari di quarta generazione la realizzazione del reattore a fusione nucleare "ITER" la partecipazione del sistema universitario nazionale alle attività di ricerca, proseguendo l'azione svolta nei precedenti PAR in cui l'ENEA ha coinvolto le principali Università nazionali, individuando gli specialisti riconosciuti sulle tematiche di ricerca con l'obiettivo di realizzare una rete di eccellenza a servizio del Paese, con l'esclusione delle attività sulla fusione in quanto trattasi di attività definite a livello internazionale per le quali non è necessario il coinvolgimento di università italiane

- uno stretto coordinamento con gli altri soggetti affidatari di attività di ricerca mediante accordi di programma, RSE e CNR, per evitare sovrapposizioni e massimizzare i risultati
- l'obbligo che i risultati delle ricerche siano a totale beneficio dell'utente, trattandosi di accordi finanziati al 100% con risorse provenienti dalla tariffazione elettrica
- l'importanza della "diffusione dei risultati" delle attività, attraverso l'individuazione di canali opportuni, tradizionali e non, per rendere disponibili i risultati ai principali fruitori oltre che al pubblico non specializzato

## **II PAR 2012**

Il presente Piano Annuale di Realizzazione, in accordo con il Piano Triennale ENEA 2012-2014 comprende i seguenti undici progetti di ricerca, suddivisi nelle tre Aree prioritarie di intervento:

### **Governo, Gestione e Sviluppo del Sistema elettrico Nazionale**

- Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

### **Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente**

- Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili
- Energia elettrica da fonte solare
- Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso
- Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili
- Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione
- Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

### **Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica**

- Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi
- Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico
- Utilizzo del calore solare ed ambientale per la climatizzazione
- Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità.

Il PAR 2012, così come è stato per i precedenti Piani, prevede l'intervento delle società partecipate da ENEA Sotacarbo e FN, nonché la partecipazione da parte dei principali Istituti universitari nazionali per una quota pari al 20% delle risorse finanziarie messe a disposizione ad esclusione delle attività sulla fusione nucleare.

Il PAR 2012 comprende undici progetti di ricerca suddivisi nelle tre Aree come sopra indicato.

In particolare l'Area "Governo del Sistema Elettrico" comprende le attività finalizzate all'accumulo di energia elettrica, essenziali per la diffusione delle fonti rinnovabili caratterizzate da forte discontinuità temporale.

L'Area "Produzione di Energia Elettrica" è articolata in sei progetti: produzione da biomasse e scarti, energia elettrica prodotta da fonte solare, studi sulle correnti marine e tecnologie innovative per l'utilizzo dei combustibili fossili ed infine, le due linee di ricerca sul nucleare, la prima sugli aspetti della sicurezza degli impianti nucleari e sui sistemi nucleari di IV generazione e la seconda sullo sviluppo di tecnologie per la fusione nucleare nell'ambito del progetto internazionale ITER .

Le attività relative ai primi quattro progetti riguardano l'utilizzo di biomasse, disponibili nelle località di interesse, per la produzione di energia e l'impiego del biogas nella rete di metanodotti, sullo sfruttamento dell'energia solare per la produzione di energia elettrica ed in particolare nei sistemi fotovoltaici avanzati (film sottili innovativi, film sottili policristallini a base di Cu<sub>2</sub>-II-IV-VI<sub>4</sub>, celle organiche) e nei sistemi solari termodinamici che nello specifico si concentrano sull'utilizzo di sali fusi come fluido tecnico degli impianti di cogenerazione; sulla produzione di energia da impianti che sfruttano il moto ondoso e dalle correnti

marine; sullo studio delle tecnologie di cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> come strada per un utilizzo sostenibile dei combustibili fossili.

Nell'ambito del progetto sull'energia nucleare da fissione continuano le attività di ricerca che, a seguito degli eventi internazionali e delle successive indicazioni IAEA, saranno concentrate sulla sicurezza degli impianti e sullo sviluppo dei sistemi di IV generazione.

In particolare sono previste le seguenti attività:

- Sperimentazione e Calcolo in Appoggio agli Studi sulla Sicurezza
- Progettazione di sistema e analisi di sicurezza per un sistema LFR e SMR raffreddati a piombo
- Sviluppo di materiali strutturali e studi di fabbricazione.

Per quanto riguarda la fusione, continuano le attività di accompagnamento ad ITER/ Broader Approach, con lo sviluppo di ricerche di base sulla fisica e la tecnologia della fusione, finalizzate:

- alla realizzazione del magnete superconduttore, con incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche di una macchina Tokamak, denominata JT 60SA; concluse le attività di progettazione del magnete (bobine superconduttrici e strutture di contenimento) e le azione preparatorie alla costruzione delle bobine toroidali, si procederà la loro realizzazione. Proseguirà inoltre lo sviluppo dei 4 Switching Network Unit per la commutazione rapida della corrente delle bobine del solenoide centrale
- alla progettazione e costruzione di un target per la produzione di neutroni su cui fluisce litio ad alta velocità; progettazione e costruzione dell'impianto a litio EVEDA loop per IFMIF; sarà effettuata una campagna sperimentale dei sistemi di monitoring online per la misura delle impurezze in litio e per i fenomeni di cavitazione per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone)
- alla caratterizzazione termica di compositi ceramici SiC/SiC per un possibile utilizzo in ambito fusionistico. In particolare è prevista la collaborazione della società partecipata FN per la produzione di compositi ceramici in matrice e fibra di silicio.

I progetti ENEA inquadrati nell'Area, "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica", prevedono attività finalizzate al risparmio di energia elettrica negli usi finali con attività ricerche sull'efficienza energetica nei settori dei servizi, dell'illuminazione pubblica, del civile residenziale e non e nel settore della climatizzazione, con interventi di sviluppo tecnologico e di realizzazione di dimostrativi sperimentali. Un nuovo progetto riguarda nello specifico interventi di Efficientamento del patrimonio immobiliare pubblico.

Infine, sono previste attività sulla mobilità elettrica, che comprenderanno studi e sviluppo di componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici per la ricarica rapida ed attività di ricerca di base e sperimentazione su nuovi materiali più leggeri in grado di contribuire a ridurre ed ottimizzare i consumi energetici del settore.

I preventivi economici attività degli undici progetti sono riassunti nella tabella che segue, ripartiti per le voci di spesa definite nel documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili" approvato con delibera dell'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas n. 19 del 24 gennaio 2013. Si sottolinea in particolare che l'importo previsto per la voce "strumentazioni e attrezzature" rappresenta la quota ammissibile in base ai criteri di ammortamento e non già l'intero costo necessario per gli acquisti.

Si evidenzia che il piano prevede, complessivamente, l'impegno di circa 150 uomini x anno di personale ENEA, oltre a costi diretti (strumentazioni e attrezzature di ricerca, costi di esercizio, prestazioni di terzi e missioni) per circa il 35% del costo totale. Si definisce inoltre un budget di 4.750 M€ per attività di soggetti cobeneficiari, composto da 1.150 M€ per il già citato intervento delle società partecipate Sotacarbo e FN e da 3.600 M€ (corrispondente al 20% del costo complessivo con esclusione del progetto inerente la fusione nucleare) per il contributo che gli istituti universitari forniranno alle attività del Piano Annuale di Realizzazione 2012.

**Accordo di Programma MSE- ENEA**  
**Costo del PAR 2012 per principali voci (k€)**

AREA	PROGETTO		Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
				Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale	A.4	Sistemi avanzati di accumulo dell'energia	15.653	861	13	118	0	28	180	1.200
<i>Subtotale Area A</i>			15.653	861	13	118	0	28	180	1.200
Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente	B.1.1	Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili	18.509	1.018	196	119	20	47	600	2.000
	B.1.3	Energia elettrica da fonte solare	31.454	1.730	37	173	0	55	505	2.500
	B.1.4	Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso	2.928	161	10	43	0	6	80	300
	B.2	Cattura e sequestro della CO <sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili	16.383	901	104	340	5	50	1.100	2.500
	B.3.1	Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione	22.547	1.240	425	285	260	90	700	3.000
	B.3.2	Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER	51.654	2.841	5.354	120	345	90	250	9.000
<i>Subtotale Area B</i>			143.475	7.891	6.126	1.080	630	338	3.235	19.300
Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica	C.1	Risparmio di energia elettrica nei settori civile, industria e servizi	21.818	1.200	53	168	35	84	460	2.000
	C.2	Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico	34.781	1.913	34	180	230	73	570	3.000
	C.3	Utilizzo del calore solare e ambientale nella climatizzazione	8.309	457	62	92	0	19	170	800
	C.4	Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità	8.473	466	64	21	0	14	135	700
<i>Subtotale Area C</i>			73.381	4.036	213	461	265	190	1.335	6.500
<b>TOTALE</b>			<b>232.509</b>	<b>12.788</b>	<b>6.352</b>	<b>1.659</b>	<b>895</b>	<b>556</b>	<b>4.750</b>	<b>27.000</b>

\* in base al documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili", deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie (per 3.600 k€) e con le partecipate FN (per 550 k€) e Sotacarbo (per 600 k€)



## IL QUADRO DI RIFERIMENTO

### Descrizione del prodotto dell'attività

I sistemi di accumulo sono ormai ritenuti una tecnologia portante delle future reti elettriche. È accertata la possibilità per sistemi di accumulo di svolgere numerose funzioni tecnicamente ed economicamente necessarie alla prevista evoluzione del sistema di generazione e distribuzione nonché per gli usi finali dell'energia elettrica, che ormai contengono quote crescenti di fonti energetiche rinnovabili, per loro natura intermittenti, e che puntano ad una maggiore intelligenza del sistema sostanzialmente incrementando la generazione distribuita (GD) e le soluzioni smart. Le politiche a supporto dello sviluppo delle smart grid prevedono, infatti, l'utilizzo di sistemi di gestione e controllo sempre più sofisticati ed interattivi, aumentando il colloquio tra fornitore ed utilizzatore, per rispondere ad una maggiore richiesta di qualità della fornitura di energia che ha notevoli impatti economici sui processi industriali, la necessità di garantire un maggiore collegamento delle fasi di produzione con quelle della domanda di energia anche nell'ottica di un mercato aperto e libero nella commercializzazione dell'energia elettrica, ed affidando alle tecnologie dell'accumulo il compito non secondario di aumento della flessibilità e governabilità delle reti.

I sistemi di accumulo sono già utilmente usati in diverse applicazioni nelle reti elettriche, con funzioni già note (power quality, peak shaving, regolazioni di tensione o frequenza, ecc.), mentre un più ampio uso delle fonti rinnovabili e della generazione distribuita, in genere, può portare numerosi vantaggi aggiuntivi dall'integrazione dell'attuale uso dell'accumulo centralizzato con quello futuro di sistemi di accumulo distribuiti lungo la rete elettrica. Il pieno sviluppo di queste potenzialità dei sistemi di accumulo richiede però la soluzione di diversi problemi, di natura regolamentare ed organizzativa, e di opportunità di ricerca e sviluppo per rendere i vari metodi di accumulo (pompaggio d'acqua, sistemi ad aria compressa-CAES, magneti superconduttori, accumulo dell'idrogeno, accumulo termico ed accumulo elettrochimico) sempre più rispondenti alle necessità specifiche della rete elettrica.

In particolare, si prevede di sviluppare attività di ricerca e sviluppo di sistemi di accumulo maggiormente mirate alle specifiche funzioni richieste dal sistema elettrico nazionale, tenendo anche nel dovuto conto delle iniziative avviate in ambito europeo all'interno di piattaforme (come Smart Grids) ed alleanze tecnologiche (come EERA = European Energy Research Alliance) e degli associati programmi di ricerca e sviluppo della Commissione Europea. Queste attività saranno sempre più rivolte al soddisfacimento degli indirizzi esplicitamente indicati nel Programma Triennale del Ministero dello Sviluppo Economico (MSE) che sulle specifiche tematiche della *“Generazione distribuita, reti attive e sistemi di accumulo”* prevede che: *“Le politiche di incentivazione della produzione di energia da fonti rinnovabili hanno determinato una crescita impetuosa della potenza installata. Nel settore eolico si è passati dai 1.600 MW del 2005 ai 6.500 MW del 2011, in quello fotovoltaico da 87 MW nel 2007 a circa 12.000 MW nel 2011, con previsioni di ulteriore crescita negli anni a venire. Gli impianti per la produzione di energia da biomasse sono invece cresciuti in modo più contenuto, arrivando a circa 2.500 MW installati nel 2011. Si tratta di impianti di taglia piccola o medio-piccola, distribuiti sul territorio, che, con l'eccezione delle biomasse, producono energia in modo discontinuo e non programmabile, caratteristiche che impongono tanto un adeguamento della rete elettrica che l'utilizzazione di sistemi di accumulo dell'energia. La diffusione della generazione distribuita è legato allo sviluppo di reti attive (smart grids), che possono accogliere flussi bidirezionali di energia e permettere l'interazione tra produttori e consumatori, da perseguire in coerenza con le numerose iniziative nazionali ed europee. Una condizione abilitante per la diffusione della generazione distribuita e lo sviluppo delle reti attive è costituita dalla soluzione di importanti problematiche tecnologiche ad opera della comunità scientifica e delle realtà imprenditoriali, quali: sistemi ICT per la gestione delle reti e del sistema e per consentire le interazioni utente-sistema-mercato, componenti e sistemi dedicati, sistemi avanzati di*

*accumulo di energia elettrica di piccola e media taglia, sistemi per l'autogestione e la flessibilizzazione della domanda di energia elettrica, software per il controllo della produzione da fonti di energia rinnovabile, sistemi di misura per le varie componenti del sistema, modellazione delle reti, ecc. Una regolamentazione di tutti gli aspetti legati alla gestione di reti locali intelligenti e al loro rapporto con la rete nazionale rappresenta inoltre un'esigenza determinante ai fini della loro diffusione. Le attività per la realizzazione di sistemi di accumulo di energia dovranno essere concentrate esclusivamente su sistemi di accumulo funzionali al sistema elettrico nazionale, per natura e caratteristiche dimensionali, economiche e tecniche. Gli studi potranno riguardare le varie tecnologie allo studio della comunità scientifica internazionale: accumulo mediante aria in pressione, sistemi di accumulo chimico (con particolare attenzione all'idrogeno) o elettrochimico, supercapacitori. La maturazione di queste tecnologie potrà contribuire ad una migliore gestione del sistema di generazione-accumulo-trasmissione-distribuzione dell'energia elettrica. In questo contesto, merita un esame di fattibilità, seguito da iniziative dimostrative, la possibilità di sfruttare bacini naturali o artificiali in zone sopraelevate, opportunamente adattati a ricevere attraverso pompaggio l'acqua disponibile (eventualmente anche marina) per rappresentare un sistema per l'accumulo di energia prodotta da fonti rinnovabili collocate nello stesso sito. E' inoltre prevista l'attivazione di ricerche riguardanti i nuovi materiali avanzati per l'accumulo elettrico".*

L'attenzione delle attività ENEA verrà pertanto concentrata sui sistemi di accumulo per applicazioni alla generazione distribuita ed alle smart grid, con prevalenza per l'accumulo elettrochimico (con sistemi a base di litio ma anche con sistemi redox a flusso ed ad alta temperatura, che dovessero risultare più competitivi nelle varie applicazioni) e quello dell'idrogeno, con l'obiettivo di accelerare la ricerca di soluzioni più rapidamente applicabili ed, in alcuni casi particolarmente interessanti e competitive, valutando anche la fattibilità tecnica ed anche economica di soluzioni completamente innovative (come gli SMES ed i sistemi integrati per la generazione, l'accumulo e l'utilizzo dell'idrogeno).

L'approccio scientifico e tecnologico continuerà a mirare ad un costante aggiornamento dello stato delle tecnologie e dei metodi di accumulo con sostanziali attività di ricerca fondamentale e di continua analisi delle potenzialità applicative e dei vantaggi prevedibili per meglio sostenere i programmi di sviluppo della rete e dell'industria associata. Le diverse modalità di accumulo saranno continuamente e criticamente analizzate, in alcuni casi particolarmente promettenti ed innovativi anche sperimentalmente, in maniera da fornire un bagaglio completo di informazioni (tecniche, economiche, applicative e di mercato) ai potenziali utilizzatori, alle strutture pubbliche responsabili dei programmi di ricerca e sviluppo associati, ed a tutte le industrie coinvolte.

### **Situazione attuale del prodotto dell'attività**

Lo stato di sviluppo dei sistemi di accumulo dell'energia per applicazioni mobili e stazionarie continua ad evidenziare un sempre maggiore impegno di ricerca, sviluppo ed applicazioni in varie parti del mondo. Le risorse dedicate ai programmi di ricerca finanziati con fondi pubblici aumentano di pari passo con l'avvio di iniziative per lo sviluppo di "reti elettriche intelligenti" (generazione distribuita e smart grid), che richiedono sistemi di accumulo sempre più differenziati in termini di prestazioni e costi, a cui si aggiungono le necessità di accumulo nel settore dei trasporti stradali a propulsione elettrica, che ben potrebbero integrarsi in reti elettriche più evolute.

L'accumulo di energia nelle reti elettriche è considerato da circa un secolo come uno dei principali sistemi in grado di aumentarne la flessibilità e l'efficienza. I sistemi di accumulo presentano numerosi vantaggi in relazione alle molteplici funzioni che sono in grado di svolgere nell'intero sistema elettrico, giacché possono essere utilmente collocati a livello del sistema di generazione (impianti multiMW), della rete di trasmissione e distribuzione fino agli usi finali, con un posizionamento sempre più economicamente ed energeticamente conveniente da ambo i lati del "contatore". Sono attualmente allo studio e utilizzati numerosi sistemi di accumulo che si differenziano notevolmente per caratteristiche, prestazioni e costi e sono stati in parte analizzati e classificati in relazione alle funzioni privilegiate che possono svolgere. Nel caso specifico della crescente integrazione delle fonti rinnovabili nelle reti elettriche, l'uso dei sistemi di accumulo può significativamente migliorare le prestazioni tecniche ed economiche delle smart grid in cui tali sistemi sono inseriti. In tal caso, ci sono altre funzioni, aggiuntive a quelle già note (power quality, peak shaving,

regolazioni di tensione o frequenza, ecc.), che i sistemi di accumulo possono svolgere per rendere ancora più favorevole l'utilizzo delle fonti rinnovabili:

- uso dell'energia da fonti rinnovabili in periodi di maggiore convenienza (spostamento temporale tra produzione ed utilizzo);
- disponibilità della capacità produttiva (potenza costante connessa alla rete) delle fonti rinnovabili (principalmente impianti eolici e fotovoltaici) in modo da rinviare la necessità di realizzazione di nuovi impianti convenzionali;
- integrazioni di impianti eolici di breve (fino a qualche minuto) o lunga durata (fino a qualche ora).

Le molteplici funzioni sopra indicate richiedono sistemi e metodi di accumulo significativamente diversi. Negli ultimi anni, sono stati sviluppati ed applicati diversi metodi di accumulo con tecnologie appositamente studiate: accumulo di acqua in bacini di pompaggio; volani (flywheels), accumulo di aria compressa in caverne (CAES, Compressed Air Energy Storage); magneti superconduttori (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage); batterie elettrochimiche; supercondensatori; accumulo di energia termica e più recentemente, accumulo di idrogeno in abbinamento con le celle combustibile.

La forma più diffusa di accumulo dell'energia elettrica (non però per le reti elettriche), particolarmente indicata per applicazioni di alta potenza e di bassa energia, è certamente quella elettrochimica (batterie e supercondensatori). Tuttavia gli accumulatori elettrochimici presentano prestazioni (in termini di capacità di accumulo e di caratteristiche di ricarica) limitate e decrescenti con il numero di cicli di carica/scarica. Diverse soluzioni sono state proposte ed utilizzate, ma ulteriori attività di ricerca e di validazione sperimentale in applicazioni reali alle reti elettriche con fonti rinnovabili si rendono necessarie, in modo da coprire diverse taglie di applicazioni e differenti funzioni. Le batterie più interessanti sono attualmente, oltre a quelle ormai convenzionali al piombo ed alcaline, quelle al litio, ad alta temperatura ed a flusso. Alcune di queste batterie (alta temperatura come le Zebra e sodio-zolfo o quelle a flusso) sono state già oggetto di studio in precedenti Piani di Ricerca di Sistema, da parte principalmente di RSE. Inoltre stanno acquistando maggiore interesse ed importanza per le applicazioni di elevata potenza ed alto rendimento (per power quality, regolazioni di frequenza o riduzione delle potenze di picco = peak shaving) i supercondensatori (anche denominati condensatori elettrochimici) ed, in minor misura, la produzione e l'accumulo di idrogeno per un uso successivo con le celle a combustibile. La scelta del sistema ed, eventualmente, la sua possibile integrazione per disaccoppiare potenza ed energia, richiedono l'analisi puntuale delle specifiche applicazioni.

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

Le batterie al litio, insieme ai sistemi redox a flusso ed a quelli operanti ad alta temperatura (come le batterie Zebra e sodio-zolfo), sono i sistemi di accumulo elettrochimico più interessanti ed in maggiore sviluppo tra quelli attualmente considerati perché presentano numerosi vantaggi. In particolare, le batterie al litio soltanto recentemente hanno incominciato ad essere valutate in applicazioni pilota sperimentali per le reti elettriche, in quanto le attività di ricerca, sviluppo ed industrializzazione hanno finora puntato principalmente alle applicazioni mobili nell'elettronica di consumo (mercato maturo ormai in grande crescita) e nella trazione elettrica stradale. Inoltre, nell'ottica di una sempre crescente penetrazione della GD da fonte rinnovabile nelle reti elettriche, al fine di massimizzare l'energia prodotta da generatori non programmabili con una conseguente riduzione dei costi, sarà necessario progettare, realizzare e valutare sperimentalmente tecnologie e sistemi di accumulo che facilitino la conversione delle forniture energetiche intermittenti in un servizio caratterizzato da adeguati livelli di affidabilità e qualità, nonché adeguate strategie di controllo e supervisione delle interfacce in un contesto di rete complessa intelligente, come le smart grid, appunto. Insieme alle batterie al litio, dovranno pertanto essere sviluppate le piattaforme informatiche e gli algoritmi di controllo distribuito, necessari ad ottimizzare l'efficienza di tutti i sistemi coinvolti, che consentiranno di abilitare un processo di trasformazione strutturale di ogni fase del ciclo energetico, dalla generazione fino all'accumulo, al trasporto, alla distribuzione, alla vendita e al consumo

intelligente di energia, anche nell'ottica di un'integrazione di sistemi di accumulo "mobili" come i veicoli a trazione elettrica.

Le potenzialità tecniche delle batterie al litio, e di altri sistemi di accumulo elettrochimico od alternativi come quelli basati sull'idrogeno e su soluzioni ancora più avanzate che utilizzano materiali superconduttori, dovranno quindi essere opportunamente studiate e sviluppate fino ad un livello prototipale di taglia significativa con l'obiettivo di avere sistemi economicamente più convenienti ed energeticamente più efficienti, mentre i vantaggi e benefici applicativi dovranno essere chiaramente individuati e confermati sperimentalmente in alcune attività dimostrative pilota, opportunamente selezionate in base al loro potenziale impatto energetico, economico ed ambientale, ed anche sociale sulla rete elettrica nazionale.

### ***Stato attuale delle tecnologie***

La situazione nell'ultimo anno ha visto sostanziali progressi scientifici e tecnologici nel campo dell'accumulo di energia con l'individuazione di nuovi filoni di ricerca e potenzialità applicative, che si prevede di integrare gradualmente, in base a motivazioni di opportunità scientifica ed industriale (nuovi metodi e materiali più adeguati alle specifiche esigenze nazionali della rete elettrica, della capacità di ricerca e delle opportunità industriali), nelle attività previste in questo progetto, pur mantenendo gli obiettivi e l'approccio individuati inizialmente. Sostanzialmente però il panorama mondiale di applicazione dei sistemi di accumulo nelle reti elettriche rimane ancora ancorato al prevalente uso dell'accumulo di energia potenziale dell'acqua in grandi bacini di pompaggio nei sistemi di generazione centralizzata, con una quota complessiva che supera il 99% dell'intera capacità mondiale di sistemi di accumulo nelle reti elettriche (poco oltre i 110 GW). I contributi degli altri sistemi di accumulo non superano i 500 MW (CAES) e sono trascurabili per le batterie redox a flusso (circa 3 MW).

Il governo americano tramite il Dipartimento dell'Energia (DoE) sta potenziando un ampio programma di sviluppo ed applicazione di tecnologie smart grid. Questo programma trae vantaggio anche dal maggiore programma pubblico, a livello mondiale, di ricerca, sviluppo e dimostrazione di batterie al litio per applicazioni ai veicoli elettrici. Solo per la dimostrazione dei sistemi di accumulo per reti elettriche sono stati finanziati progetti dal 2009 per un totale di 1600 milioni di dollari (con circa il 40% di contributo pubblico del DoE). Studi specifici sull'uso dei sistemi di accumulo sono condotti da anni dall'EPRI (Electric Power Research Institute), che ha recentemente analizzato i vantaggi in termini di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di gas serra dall'introduzione delle smart grid con l'uso di fonti rinnovabili e sistemi di accumulo.

Il Giappone ha da molti anni avviato progetti per lo sviluppo di batterie al litio per applicazioni mobili e stazionarie nell'ambito dei progetti Moonlight e Sunshine. Le applicazioni di batterie al litio in sistemi distribuiti anche in corrente continua sono stati sperimentalmente analizzati: le batterie al litio sviluppate ed utilizzate sono però di una tecnologia ormai superata dai recenti risultati scientifici e tecnologici sulle nuove batterie al litio per veicoli elettrici. Questi interventi pubblici si affiancano ad impianti dimostrativi industriali di taglia medio-grande che utilizzano altri tipi di batterie.

L'accumulo di energia nelle reti elettriche è incluso negli obiettivi strategici della politica energetica dell'Unione Europea, come parte della European Electricity Grid Initiative del SET Plan, che prevede tra le sfide tecnologiche dei prossimi 10 anni un miglioramento sostanziale dei costi e dell'efficienza dei sistemi di accumulo per le smart grid. Inoltre la Commissione Europea (CE) ha lanciato, a supporto del SET Plan, l'alleanza EERA per la ricerca energetica europea che ha tra i temi prioritari individuati le smart grid e l'accumulo di energia. All'ENEA è stata data la responsabilità di coordinare, nell'ambito di EERA, il sottoprogetto relativo all'accumulo elettrochimico. Inoltre da più di 20 anni la CE finanzia progetti sull'accumulo di energia e su batterie al litio e supercondensatori, rivolti essenzialmente ad applicazioni relative a veicoli (come nel caso dei recenti progetti, approvato sul tema Green Cars).

In Italia, la ricerca sui sistemi a litio e supercondensatori elettrochimici è stata avviata a livello universitario oltre 30 anni fa, con il conseguimento di eccellenti risultati, che sono stati prevalentemente utilizzati all'estero. Le competenze sui materiali elettrodici, sugli elettroliti e sulla realizzazione e caratterizzazione di celle elettrochimiche complete sono state sviluppate presso università ed enti di ricerca (Università di

Bologna, Camerino, Pavia, Milano, Roma, Torino, ENEA, ecc.) anche grazie ai diversi finanziamenti pubblici (Progetti Finalizzati Energetica e dei Materiali, legge 95/95, PRIN).

La situazione industriale nel settore ha molto risentito della congiuntura economica sfavorevole degli ultimi anni anche se nel passato la ricerca industriale su nuovi sistemi di accumulo è stata molto limitata. Alcune iniziative industriali sono state preparate recentemente anche nell'ambito di proposte a bandi PON. Queste iniziative vedono parzialmente coinvolte alcune industrie nazionali di batterie, quali FIAMM e FAAM ed alcune altre, che hanno manifestato interesse ad avviare (o hanno già avviato) una specifica attività di sviluppo e produzione di sistemi di accumulo elettrochimico.

Nel campo della generazione distribuita, smart grid e tecnologie intelligenti collegate, oltre a quanto promosso dalla Ricerca di Sistema Elettrico, negli ultimi anni si è assistito ad un crescente impegno della ricerca con la partecipazione di diversi istituti universitari e la creazione di specifici consorzi interuniversitari con un aumentato coinvolgimento delle aziende elettriche, dei gestori del sistema elettrico e di alcune aziende produttrici di impianti a fonti rinnovabili e di elettronica avanzata. Non esistono ancora applicazioni reali di sistemi di accumulo con batterie al litio nelle reti elettriche, mentre l'integrazione di infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici sono state nell'ultimo anno oggetto di intensa attività di ricerca, normativa e regolatori (AEEG e Terna) ed sono state anche parte di alcune interessanti dimostrazioni, in fase di avvio, di ENEL e A2A.

Inoltre ENEL ha avviato un accordo di collaborazione strategica con la *Nippon Electric Company (NEC)* per un progetto pilota che prevede la sperimentazione di smart grid con sistemi di accumulo litio-ione da inserire nella propria rete di distribuzione.

TERNA, a sua volta, ha in corso un bando internazionale, che dovrebbe chiudersi entro l'estate, volto ad individuare i possibili fornitori di batterie per aumentare la flessibilità e la sicurezza della rete elettrica nazionale, con una forte presenza di fonti rinnovabili non programmabili. Il piano di sviluppo 2011 di Terna prevedeva inizialmente 130 MW di accumulo, in seguito esteso a 240 MW (per un totale di investimenti di oltre 1 miliardo di euro).

L'ENEA è da circa 25 anni impegnata nella ricerca e nello sviluppo di batterie al litio, in collaborazione con alcuni istituti universitari, nell'ambito di programmi e progetti nazionali ed internazionali, e nelle sue applicazioni ai veicoli elettrici. Nell'ultimo decennio l'ENEA ha coordinato e svolto due programmi nazionali, con il Ministero della Ricerca Scientifica, per la ricerca e lo sviluppo di batterie al litio per applicazioni mobili nei veicoli elettrici e nell'elettronica di consumo. Inoltre, l'ENEA è da anni coinvolta in progetti europei (tra gli altri, ASTOR, SCOPE, LIBERAL, ILHYPOS, GREENLION, HCV, HELIOS) per la ricerca, lo sviluppo e la caratterizzazione di batterie al litio per applicazioni prevalentemente mobili.

L'ENEA rappresenta l'Italia nell'alleanza europea EERA e partecipa a iniziative internazionali dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) che riguardano accumulo di energia per applicazioni sia mobili che stazionarie.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### ***Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali***

Le attività precedenti sulla ricerca e sviluppo di batterie al litio sono state svolte in una fase preliminare di studio nell'AdP 2006-08 nell'ambito del tema di ricerca 5.4.3.1 relativo alle "Elettrotecnologie innovative", da cui è derivato il programma di ricerca avviato nel Piano Annuale 2008-2009. Inoltre alcune attività dimostrative dell'accumulo elettrico in batterie e supercondensatori sono state svolte nei Piani Annuali di Realizzazione 2006 e 2007, mentre attività più strutturate hanno visto la loro attuazione nei PAR 2008-2009 e 2011.

Nel PAR 2006 è stato trattato il tema dell'accumulo elettrico con supercondensatori e batterie attraverso attività di tipo sperimentale presso i laboratori del Centro ENEA Casaccia. In particolare, per quanto riguarda l'accumulo elettrico con supercondensatori è stato realizzato un impianto sperimentale in scala,

per studiare l'applicazione di un sistema di accumulo con supercondensatori asservito ad un carro ponte. ENEA dispone inoltre di un banco freno in grado di simulare le diverse condizioni di carico in cui si trova a lavorare un azionamento di un carro ponte. È stata eseguita la sperimentazione di una sezione di impianto in scala 1:10 per l'analisi delle potenze in gioco ed in scala 1:2 per l'analisi delle tensioni di impianto (e quindi in scala 1:5 per quel che riguarda le correnti). È stato affrontato anche il tema dell'accumulo elettrico con batterie per applicazione ad una funivia: è stata eseguita l'analisi dei cicli di lavoro e si è proceduto al dimensionamento tecnico-economico dell'accumulo, con l'analisi comparata di tre tecnologie (supercondensatori, batterie al piombo, batterie litio-polimeri).

Nel PAR 2007 è stato affrontato il tema dell'accumulo elettrico con supercondensatori e batterie attraverso un approfondimento teorico-sperimentale dell'utilizzo dell'accumulo nei settori di applicazione e la realizzazione di installazioni sperimentali pilota, in particolare per l'applicazione di supercondensatori a sistemi di movimentazione (carro ponte) e per l'applicazione di batterie a sistemi di trasporto a fune (funivia) individuando utenti finali dei settori industriale e del terziario presso cui eseguire la sperimentazione sul campo, in condizioni di esercizio reale, per verificare i risultati ottenuti in laboratorio. Le batterie al litio sono state analizzate all'interno di una linea ad hoc nel PAR 2007. È stato eseguito uno studio di fattibilità: scientifico per individuare le principali necessità di ricerca di base; tecnologico per definire le potenzialità applicative ed eventuali limitazioni ambientali; ed economico per stimare costi attesi. Contemporaneamente è stata svolta un'indagine sulle potenzialità tecniche di applicazione di tali sistemi nelle reti elettriche con l'avvio di attività sperimentali per verificare, a livello di laboratorio e di casi esemplificativi, la fattibilità tecnica.

Nel PAR 2008-2009 sono state svolte attività di ricerca fondamentale su materiali innovativi per batterie al litio. In particolare sono stati selezionati, sintetizzati e completamente caratterizzati (da un punto di vista chimico-fisico) nuovi materiali catodici con caratteristiche migliorate in termini di prestazioni e costi: nuovi composti del ferro ( $\text{LiFePO}_4$ , litio ferro fosfato) in varie soluzioni costruttive o composizioni: ricoperto con carbone oppure drogato con ossidi metallici;  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ;  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ . Questi composti sono stati ottimizzati per produrre film catodici che sono stati poi caratterizzati elettrochimicamente. Analogamente materiali anodici sono stati studiati, prodotti e completamente caratterizzati: varie grafiti modificate e leghe metalliche a base di ossidi di titanio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), particolarmente adatti per applicazioni di alta potenza e di vita elevata, grazie alla grande stabilità di questo materiale. Successivamente, questi materiali sono stati assemblati in celle da laboratorio, opportunamente progettate, per analizzare il loro comportamento in celle complete per verificarne la stabilità e le prestazioni elettriche, oltre che elettrochimiche.

Inoltre, per meglio correlare i risultati delle attività di ricerca con lo sviluppo della tecnologia al litio e dei materiali utilizzati, è proseguita l'analisi del mercato e della ricerca nel settore delle batterie al litio con l'acquisizione e la prova di celle commerciali, anche usurate (da applicazioni veicolari svolte da altri), per verificare, mediante procedure concordate poi in ambito Gruppo di Coordinamento, le prestazioni elettriche e la possibile "second life" di celle soltanto parzialmente utilizzate e, quindi, in grado di svolgere funzioni diverse nelle reti elettriche. L'indagine di mercato e lo studio delle applicazioni sono stati condotti anche utilizzando collaborazioni internazionali nell'ambito dell'IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia) e dell'EERA (l'Alleanza Europea per la Ricerca Energetica) e mediante contatti diretti con enti ed organizzazioni internazionali.

In aggiunta alla ricerca sui sistemi di accumulo, sono state avviate le attività relative allo studio ed alla definizione di soluzioni ottimali di controllo interfaccia dei sistemi di accumulo al litio con le reti elettriche utilizzanti fonti rinnovabili: le attività hanno riguardato l'analisi di varie possibili applicazioni (oltre 15) con le necessità tecniche ed economiche collegate e la simulazione di varie soluzioni tecnologiche e la progettazione di sistemi in scala. Infine sono state completate, con un rilevante impegno non programmato sull'analisi dei problemi di sicurezza legati all'uso di sistemi di accumulo al litio, le attività dimostrative sul carro ponte con sistemi di accumulo a supercondensatori, per cui è stata completata l'ottimizzazione del software di gestione con la verifica finale sperimentale sull'impianto prototipo presso l'ENEA degli effettivi risparmi conseguibili, e sulla funicolare di Bergamo, per cui una nuova batteria al litio è stata riprogettata, acquisita ed installata sull'impianto e condotte le attività sperimentali in condizioni reali di funzionamento.

Infine, sono state poste le basi per l'effettuazione di una attività sperimentale, la progettazione esecutiva per la realizzazione di una "casa intelligente", in cui poter verificare in condizioni reali di utilizzo i sistemi di



accumulo, eventualmente integrati con sistemi di accumulo di altro tipo, e le modalità di controllo e di interfaccia verso la rete elettrica di questi sistemi di accumulo in presenza di fonti rinnovabili e di carichi definiti.

Nel PAR 2011 sono proseguite le attività di ricerca fondamentale su nuovi materiali anodici e catodici, e relativi processi di preparazione, e su progetti di cella ottimizzati per batterie al litio, con l'introduzione di attività su materiali di nuovissima generazione (materiali anodici a base di grafene e di vari metalli, quali Sn, Si, ecc., e composti catodici di fosfati di vari ossidi metallici) e su nuovi elettroliti: tutte le scelte proposte hanno mirato ad individuare soluzioni sempre più promettenti, in termini di costi e prestazioni, per le applicazioni stazionarie di grossa taglia con una crescente attenzione alle specifiche necessità della rete elettrica nazionale, dividendo in questa fase tra prototipi ad alta energia od ad alta potenza. Le attività di ricerca ed ottimizzazione sui materiali hanno portato alla selezione di materiali e processi, completamente caratterizzati da un punto di vista chimico, elettrochimico e strutturale, ed alla realizzazione di film sottili in scala da laboratorio e di celle di prova, che hanno consentito di verificare le prestazioni dei campioni prodotti secondo procedure di prova, sviluppate dal gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE.

Per quanto riguarda le attività relative all'interfaccia dei sistemi di accumulo verso le reti elettriche, sono stati progettati e realizzati due diversi dispositivi, di taglia diversa compresa tra 10 e 20 kW, di controllo ed interfaccia del sistema di accumulo in batterie al litio con la rete e con utenze particolari. Questi dispositivi sono stati provati in diverse condizioni di utilizzo simulate e reali. Uno dei due verrà poi installato in un'applicazione smart grid nel Centro ENEA della Casaccia, che sarà oggetto di una campagna sperimentale nel prossimo anno di attività all'interno di un altro progetto.

Inoltre sono stati individuati i profili caratteristici da utilizzare per l'esecuzione di prove di celle al litio per la valutazione sperimentale della "second life". Alcune celle usate sono state recuperate presso alcuni utilizzatori e produttori di veicoli elettrici e sottoposte a prove di laboratorio che hanno confermato le potenzialità e le opportunità pratiche ed economiche collegate a questa particolare estensione della vita delle batterie al litio, con conseguente riduzione del costo operativo.

In aggiunta è stata realizzata la dimostrazione della "casa attiva" con la selezione e realizzazione di un impianto sperimentale presso l'Università di Pisa e l'esecuzione di prove che hanno evidenziato i possibili utilizzi ed i vantaggi collegati all'integrazione delle fonti rinnovabili con sistemi di accumulo (sia elettrici che termici).

Infine è stato effettuato uno studio per valutare, in una visione sistemistica, le possibilità offerte dall'utilizzo di sistemi di accumulo non elettrochimico di piccola taglia (dalle decine di chilowattora al megawattora) distribuiti, quali ad esempio, i piccoli impianti di pompaggio, mini CAES, ecc., da utilizzare nella rete elettrica italiana per rendere programmabile lo scambio con la rete della produzione da fonte rinnovabile.

### ***Obiettivo finale dell'attività***

L'attuale tendenza nello sviluppo e nella innovazione delle reti elettriche - con un previsto significativo aumento del contributo delle fonti rinnovabili, dei costi associati alla gestione delle fluttuazione della domanda e dell'offerta di energia elettrica e dell'impegno economico prevedibile per adeguare le infrastrutture con la generazione più vicina all'utente finale anche in una logica di sistemi sempre più intelligenti (smart grid) - stanno accrescendo in maniera rilevante l'interesse per sistemi di accumulo di energia più flessibili, in termini di adattabilità alle diverse funzioni richieste dalle reti elettriche, più accettabili da un punto di vista ambientale, in termini di materie prime utilizzate o di localizzazione/posizionamento, e più economici.

Sulla base delle attività di ricerca fondamentale, dei risultati sperimentali, degli studi applicativi e dell'evoluzione delle tecnologie di accumulo e della rete elettrica nazionale, sono stati rivisti e resi più aggiornati e coerenti gli obiettivi per il nuovo piano triennale ENEA sui sistemi di accumulo di energia elettrica.

Lo scopo prioritario del progetto ENEA "*Sistemi avanzati di accumulo di energia*" è quello di garantire un costante ed aggiornato filone di ricerca fondamentale sulle tecnologie dell'accumulo di energia per le reti

elettriche, in considerazione delle competenze ENEA più avanzate nel settore e delle necessità e possibilità richieste dal sistema elettrico nazionale e dall'apparato produttivo ad esso collegato, che sta dedicando sempre più attenzione e risorse a queste nuove tecnologie, anche in ragione dell'imprevista crescita della quota delle fonti rinnovabili.

L'obiettivo generale pertanto è la ricerca, la realizzazione e la verifica sperimentale, di sistemi di accumulo elettrico con prevalenza per quelli di tipo elettrochimico basati sul litio, ma anche ad alta temperatura e redox a flusso. Nel corso del triennio saranno anche studiati e sviluppati ulteriori metodi di accumulo innovativi che riguarderanno sicuramente l'utilizzo dell'idrogeno, analizzando l'intera filiera dalla produzione, all'accumulo fino al riutilizzo finale, ed eventualmente altri sistemi di accumulo più avanzati, quali gli SMES.

L'obiettivo sarà perseguito sempre favorendo un approccio sistemico che, partendo dalla ricerca scientifica e tecnologica arrivi fino a sperimentazione di taglia significativa di sistemi commerciali, in grado di valutare le effettive prestazioni oggi disponibili in relazione alle reali necessità della rete elettrica italiana, considerando un notevole incremento delle fonti rinnovabili intermittenti, ed eventualmente di introduzione di una crescente flotta di veicoli a trazione elettrica.

L'approccio scientifico e tecnologico continuerà a mirare ad un costante aggiornamento dello stato delle tecnologie e dei metodi di accumulo con sostanziali attività di ricerca fondamentale e di continua analisi delle potenzialità applicative e dei vantaggi prevedibili per meglio sostenere i programmi di sviluppo della rete e dell'industria associata. Le diverse opzioni di accumulo saranno continuamente monitorate, anche sperimentalmente in maniera da fornire un bagaglio completo di informazioni (tecniche, economiche, applicative e di mercato) sugli effettivi sviluppi e sulle potenzialità applicative ai potenziali utilizzatori, alle strutture pubbliche responsabili dei programmi di ricerca e sviluppo associati, ed a tutte le industrie coinvolte.

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

### ***Descrizione dell'attività a termine***

Il progetto, su scala triennale, è strutturato su tre linee di attività principali, che mirano ad intensificare la ricerca di base su sistemi di accumulo elettrochimico, con maggiore enfasi su quelli 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, insieme ad altri sistemi su cui si prevede di svolgere nel triennio specifiche attività di ricerca.

#### **Studio e sviluppo di nuovi accumulatori con prestazioni elevate e con migliorate caratteristiche di sicurezza**

Lo scopo dell'attività è quello di studiare accumulatori al litio dotati di sicurezza intrinseca, tale da rendere sicuro l'accumulatore nei confronti di sovraccariche accidentali o di sovrascariche dovute ad esempio a corto-circuiti interni. Tale attività verrà portata avanti studiando nuove formulazioni di elettrolita contenente additivi in grado di agire come "shuttle" limitando la tensione di cella durante le sovraccariche o capaci di diminuire l'infiammabilità dell'elettrolita in modo da evitare che la batteria prenda fuoco durante la sovrascarica accidentale. Questi additivi potranno risultare passivi o attivi a seconda che prendano parte o meno al processo elettrochimico. Le attività saranno portate avanti valutando le caratteristiche termiche ed elettrochimiche delle varie formulazioni elettrolitiche proposte. Inoltre saranno introdotti nuovi nanomateriali a base di silicio in grado di migliorare le prestazioni e ridurre i costi delle batterie al litio. Nei tre anni di attività si prevede di arrivare alla realizzazione di prototipi di scala significativa (differenziati per potenza e per energia, in funzione dell'applicazione) e di poter anche indirizzare le scelte verso le formulazioni commerciali più adatte alla rete italiana. Sulla base di ulteriori studi, verranno avviate alcune attività su nuovi sistemi di accumulo elettrochimico, come i sistemi redox e quelli metallo-aria.



## Studio e sviluppo di nuovi sistemi di accumulo alternativi a quelli al litio-ione per le fonti rinnovabili

Questa attività si propone di studiare sistemi di accumulo elettrico alternativi a quelli basati sul sistema litio-ione: quali, ad esempio, nuove tipologie di accumulo elettrochimico (come i sistemi redox e quelli metallo-aria), l'accumulo mediante idrogeno ed altri sistemi più avanzati, quali ad esempio gli SMES (accumulo in magneti superconduttori) e altri metodi che dovessero risultare promettenti per la rete nazionale. Tali sistemi saranno analizzati in termini di efficienza energetica, di fattibilità tecnica ed economica, includendo anche la valutazione delle tecnologie di riconversione dell'energia immagazzinata in energia elettrica.

Per quanto riguarda l'utilizzo dell'idrogeno, è prevista inizialmente l'analisi delle potenzialità delle tecnologie dell'idrogeno per l'accumulo elettrico nelle reali condizioni di esercizio; in una seconda fase, sulla base dei risultati degli studi di fattibilità, si procederà alla realizzazione e sperimentazione delle soluzioni tecnologiche che dovessero risultare di interesse.

I sistemi di accumulo basati su magneti superconduttori (SMES) a temperature superiori a quelle dell'elio liquido hanno una forte potenzialità per essere utilizzati in accoppiamento con tutti i tipi di fonti energetiche rinnovabili senza aumentarne esageratamente i costi. Oggi sono disponibili cavi superconduttori realizzati in  $MgB_2$  che hanno potenzialità molto interessanti per i sistemi SMES. Il cavo tipo  $MgB_2$  è oggi realizzabile facilmente nelle lunghezze necessarie per realizzare delle bobine superconduttrici. L'obiettivo previsto nel triennio è la realizzazione di una bobina prototipo che utilizza un cavo tipo  $MgB_2$ .

### Studi di supporto e monitoraggio

Le attività principali di ricerca, sviluppo e esplorative sui diversi sistemi di accumulo devono essere necessariamente integrate da attività di supporto volte a rendere sempre più compatibili ed utilizzabili i sistemi di accumulo studiati con le necessità e le potenzialità della rete elettrica nazionale. In particolare, i sistemi di accumulo elettrochimico richiedono la realizzazione di dispositivi di gestione e controllo dedicati (Battery Management System, BMS), che devono essere sviluppati per le specifiche applicazioni alle reti elettriche adattando e verificando quanto è stato finora fatto per le applicazioni veicolari, che puntavano a garantire prestazioni e sicurezza in ogni condizioni di esercizio.

Saranno inoltre proseguite le attività di ricerca sugli aspetti ambientali e di sicurezza delle batterie al litio con lo studio di processi innovativi di riciclo e recupero dei materiali.

Infine, in continuità con il precedente Piano Triennale 2009-2011, si ritiene che debba essere compiuto uno sforzo particolare mediante studi sul campo di sistemi di accumulo, già disponibili commercialmente ma raramente sviluppati per le diverse applicazioni nella rete elettrica, con rilevante impatto sulla rete elettrica nazionale in grado di fornire dati ed informazioni sulle reali prestazioni che possano aiutare nello sviluppo di nuovi materiali e sistemi con l'individuazione e la definizione di cicli e procedure di prova specifici.

### ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

- ✓ Realizzazione di almeno due prodotti innovativi basati sui sistemi al litio, uno di alta potenza ed uno di alta energia, in scala significativa (alcuni Ah) in grado di consentire la verifica delle prestazioni e la definizione di base dei processi di preparazione
- ✓ Ottimizzazione di BMS (battery management systems) per le diverse funzioni di rete, in dispositivi completi (utilizzanti moduli e celle già commercialmente disponibili)
- ✓ Sviluppo di almeno due tecnologie di accumulo particolarmente innovative alternative al litio (che saranno scelte, a valle del primo anno di attività, fra l'utilizzo dell'idrogeno, le batterie redox e i sistemi SMES) per arrivare alla realizzazione di sistemi completi ed operativi con la piena caratterizzazione sperimentale: nel caso degli SMES sono previste, in linea con quanto si sta facendo in diversi laboratori internazionali, la realizzazione e prova di una bobina prototipo basata su materiali superconduttori innovativi.

## **Coordinamento con attività di CNR e RSE**

Le attività finora svolte relativamente al presente progetto sono state discusse e approfondite dal Gruppo di Coordinamento: "Ricerche su reti attive, generazione distribuita e sistemi di accumulo di energia elettrica".

Nel periodo 2011 e 2012 hanno trovato ampia applicazione le procedure di prova elettriche ed elettrochimiche, congiuntamente definite, per garantire una più agevole comparazione dei risultati sperimentali ottenuti dai tre enti su componenti analoghi. Sono state inoltre discusse altre modalità di collaborazione ed integrazione tra le attività dei tre enti che riguardano il confronto dei risultati sperimentali finora ottenuti su tipologie di accumulo similari, in modo da differenziare e rendere possibilmente complementari le attività sperimentali di laboratorio e dimostrative in modo da allargare lo spettro di tecnologie ed applicazioni analizzate: la differenziazione potrà attuarsi mediante la scelta di sistemi di accumulo diversi per chimica o per produzione/fornitura oppure mediante l'adozione di cicli di prova riferibili ad applicazioni diverse a parità di tecnologia del sistema di accumulo. Infine, si prevede di rendere più efficace la diffusione comune delle esperienze e dello stato dell'arte dell'accumulo nelle reti elettriche, andando oltre la partecipazione congiunta ad eventi di disseminazione.

## **Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività**

Il progetto per la ricerca e lo sviluppo di sistemi di accumulo di energia elettrica per applicazioni stazionarie, che utilizzano impianti di generazione con fonti rinnovabili e mobili, continuerà a perseguire obiettivi ambiziosi di ricerca avanzata ed innovativa sempre più tagliata per le specifiche esigenze della rete elettrica nazionale. In questo modo si prevede di mantenere un aggiornato supporto scientifico e tecnologico, insieme alla sperimentazione e dimostrazione delle soluzioni più promettenti.

Il progetto alla fine renderà disponibili conoscenze ed informazioni su materiali, processi, impianti ed applicazioni stazionarie e mobili, atti a migliorare l'efficienza in diversi punti delle rete elettrica (principalmente nella generazione distribuita includendo anche gli usi finali mobili e stazionari) e l'uso di fonti rinnovabili di varia natura (eolico, fotovoltaico, micro- e mini-idraulico) ed, ove possibile, verrà valutato anche il loro impatto ambientale. Questi risultati sono rivolti a tutti i possibili utilizzatori: l'industria nazionale per lo sviluppo delle tecnologie sviluppate nel progetto, le aziende elettriche, gli organismi istituzionali che regolano e gestiscono il settore elettrico e ne promuovono lo sviluppo, ed infine gli utenti finali del sistema elettrico che saranno resi partecipi dei cambiamenti in atto nel sistema energetico e delle possibili implicazioni economiche, tecnologiche ed ambientali.

## **PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ**

### **Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012**

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

L'attività prevede la realizzazione e caratterizzazione di due tipologie di celle complete di elettrolita (liquido e/o polimerico), opportunamente progettate: 1) in scala da laboratorio per la verifica delle prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale dei nuovi materiali anodici e catodici più recenti ed innovativi; 2) in taglia significativa (centinaia di mAh) con materiali ottimizzati sulla base di risultati degli anni precedenti di cui viene fatta l'analisi definitiva in base allo scale up di processi preparativi e di celle a design ottimizzato.

In aggiunta è prevista un'attività di ricerca volta a studiare accumulatori al litio dotati di sicurezza intrinseca, tale da rendere sicuro l'accumulatore nei confronti di sovraccariche accidentali o di dovute ad esempio a corto-circuiti interni. Tale attività verrà portata avanti studiando nuove formulazioni di elettrolita contenente additivi in grado di agire come "shuttle" limitando la tensione di cella durante le sovraccariche o capaci di diminuire l'inflammabilità dell'elettrolita in modo da evitare che la batteria prenda fuoco durante la sovrascarica accidentale. Questi additivi potranno risultare passivi o attivi a seconda che

prendano parte o meno al processo elettrochimico. Le attività saranno portate avanti valutando le caratteristiche termiche ed elettrochimiche delle varie formulazioni elettrolitiche proposte. Nei tre anni di attività si prevede di arrivare alla realizzazione di prototipi di scala significativa e di poter anche indirizzare le scelte verso le formulazioni commerciali più adatte alla rete italiana.

L'attività includono la prosecuzione della ricerca di materiali anodici e catodici per celle al litio particolarmente adatti per le applicazioni nelle reti elettriche, scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e basso impatto ambientale. Tali materiali ottimizzati nell'anno precedente, in base ai risultati sperimentali ottenuti in celle complete da laboratorio, saranno prodotti in scala utile (decine di grammi) per la verifica degli effetti dello scale up di produzione su prestazioni e costi e per la realizzazione di altre celle di scala significativa (centinaia di mAh) per l'esecuzione delle verifiche finali sulle soluzioni finora individuate.

Per quanto riguarda i materiali catodici saranno proseguite le attività di ricerca di materiali di nuova generazione a base di fosfato di manganese, eventualmente drogato. Inoltre proseguirà lo studio di catodi compositi per batterie allo stato solido prive di liquido.

Per la ricerca di materiali anodici, proseguirà lo studio di materiali ottimizzati nell'anno precedente (grafiti e composti metallici), in base ai risultati sperimentali ottenuti in celle complete da laboratorio, che saranno prodotti in scala utile (decine di grammi) per la verifica degli effetti dello scale up di produzione su prestazioni e costi e per la realizzazione di altre celle di scala significativa (centinaia di mAh). Saranno inoltre intensificate in parallelo le attività di ricerca di materiali anodici a base di silicio con lo studio di tecniche di preparazione innovative di materiali nanostrutturati e loro deposizione su supporti di diversa natura: l'attività sperimentale mirerà a dimostrare la loro utilizzabilità in celle a litio.

Tutti i materiali acquisiti e/o prodotti saranno caratterizzati in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti verranno costruiti elettrodi che saranno caratterizzati in celle di riferimento.

Inoltre tutte le celle prodotte verranno sottoposte a cicli di prova per verificarne prestazioni e vita utile, secondo le procedure di prove (elettrochimiche ed elettriche), in diverse condizioni operative tipiche delle applicazioni individuate per la rete elettrica.

Le caratterizzazioni elettrochimiche utilizzeranno le procedure concordate nel Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE.

#### Risultati/Deliverable:

- Selezione di nuovi materiali anodici e catodici
- Catodi e processi di preparazione con relativa caratterizzazione chimico-fisica ed elettrochimica
- Produzione di materiale catodico ed anodico per lo scale up di processo e di celle complete
- Progettazione e realizzazione di celle al litio di varie dimensioni con la verifica delle prestazioni e della vita utile
- Selezione di nuove formulazioni di elettrolita in grado di aumentare la sicurezza intrinseca delle celle al litio

Principali collaborazioni: Università di Bologna, Università di Camerino

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

#### **b. Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio**

Si prevede di adattare ed ottimizzare il funzionamento di moduli al litio, inizialmente concepiti per uso automobilistico, per l'impiego in applicazioni stazionarie, mantenendo i vantaggi tipici delle batterie al litio rispetto a quelle al piombo in termini di capacità di accettazione di ricariche rapide, oltre che in termini di riduzione di peso e volume (esigenza meno sentita nel settore stazionario rispetto a quello automobilistico, ma comunque sempre presente per ragioni legate all'ingombro ed alla maneggevolezza).

Il programma di test prevede l'esecuzione di prove al banco e consisterà nell'esecuzione di prove di caratterizzazione finalizzate a verificare le prestazioni dei moduli nel loro complesso, cioè come insieme di

celle, elettronica di controllo (BMS), meccanica (involucro), thermal management; i moduli saranno sottoposti a cicli di carica e scarica a diverse temperature, mediante ciclatori e camere climatiche. Questa serie di prove prevede la valutazione delle prestazioni dei moduli in condizioni il più possibile simili a quelle d'esercizio in impianti per applicazioni stazionarie.

Per proseguire l'acquisizione di dati di effettiva funzionalità e di cicli di funzionamento di sistemi di accumulo commerciali, si prevede di effettuare lo studio e la progettazione preliminare dell'introduzione di un sistema di accumulo stazionario in una metropolitana di superficie, tipo quella attualmente sviluppata per la città di Bergamo ed effettuata con tram.

L'idea è quella di analizzare, nel primo anno, i profili di potenza ed energia richiesti alla rete elettrica di alimentazione della metro ed individuare un punto soggetto a notevoli variazioni di potenza, dovute alle fasi di accelerazione e di frenatura dei mezzi, dove maggiore è ritenuto il vantaggio ottenibile dall'introduzione di un accumulo, (batterie o supercondensatori).

Si prevede inoltre di completare la verifica sperimentale in condizioni reali di esercizio dei dispositivi elettronici di controllo ed interfaccia verso la rete elettrica sviluppati nel precedente anno di attività con l'utilizzazione di una batteria al litio appositamente acquisita, sia nel caso dell'impianto già realizzato presso l'Università di Palermo, che nel completamento della sperimentazione sulla "casa attiva".

Infine saranno proseguite le attività per l'esecuzione di prove di celle al litio per la valutazione sperimentale della "second life", sulla base dei profili caratteristici in alcune applicazioni tipiche per le reti elettriche, individuati nel precedente anno di attività.

È inoltre prevista la prosecuzione delle attività sull'analisi della sicurezza nelle varie condizioni di produzione ed uso delle batterie al litio.

#### Risultati/Deliverable

- Report su test di caratterizzazione e duty cycle per applicazioni stazionarie con ottimizzazione del BMS
- Progettazione esecutiva di un sistema di accumulo per migliorare l'efficienza di una metropolitana leggera
- Rapporto di prova dell'interfaccia di gestione e controllo con batterie al litio in un impianto in rete con fonti rinnovabili
- Rapporto tecnico sui risultati sperimentali della sperimentazione della "casa attiva"
- Rapporto di prove "second life"

Principali collaborazioni: Università di Palermo, Università di Pisa

Durata: ottobre 2012 -settembre 2013

#### **c. Studio e sviluppo di metodi di accumulo alternativi a quelli al litio-ione**

La ricerca sui sistemi di accumulo elettrico mediante batterie sta vedendo lo sviluppo anche di nuove tipologie che incominciano ad avere interessanti prospettive industriali, seppur rimangano ancora rilevanti limiti scientifici e tecnologici che devono essere necessariamente essere risolti.

In particolare, in questo anno di attività, si prevede di concentrarsi sull'avvio di attività di ricerca su sistemi metallo-aria e su sistemi redox a flusso. La scelta è motivata dall'enorme crescita delle prestazioni che si prevedono possano ottenersi con i sistemi metallo-aria, mentre le batterie redox a flusso (di varia combinazione elettrochimica) hanno avuto alterne fortune, ma presentano interessanti potenzialità in termini di costi ed applicabilità alle reti elettriche. Pertanto le attività riguarderanno una prima valutazione dei materiali più innovativi ed originali in grado di affrontare i principali problemi attualmente incontrati nello sviluppo di questi nuovi sistemi di accumulo, con particolare attenzione alla membrana delle celle redox ed all'elettrodo gassoso e dei metalli più promettenti delle celle metallo-aria.

Sull'utilizzo dell'idrogeno, l'attività si propone di effettuare un'analisi di fattibilità comparativa dei diversi metodi di accumulo dell'energia elettrica utilizzando l'idrogeno, in alternativa e per confronto con quelli largamente diffusi come le batterie, con lo scopo di valutarne la convenienza sia tecnica che economica. Saranno pertanto valutati tutti i costi, economici ed energetici, a partire p.es. dal lavoro di produzione, di

compressione, del materiale per l'accumulo, dell'investimento per l'immagazzinamento sul territorio, e così via, fino alla spesa energetica necessaria per la produzione di energia elettrica.

Risultati/Deliverable:

- Selezione di nuovi materiali elettrolitici per celle redox
- Selezione di nuovi materiali per celle metallo-aria
- Utilizzo dell'idrogeno per l'accumulo dell'energia elettrica: studio di fattibilità dell'accumulo dell'idrogeno per applicazioni alle fonti rinnovabili

Principali collaborazioni: Università di Camerino

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**d. Studio ed analisi del recupero di materiali da batterie a fine vita**

Un programma di riciclo delle batterie a litio per il recupero del metallo costituisce un'opportunità per permettere di ridurre la dipendenza del nostro Paese rispetto alle fonti di approvvigionamento estere.

E' stato stimato che una batteria in grado di fornire energia per 100 km su un veicolo elettrico dovrebbe contenere tra i 2,3 e 7,9 kg di litio, secondo il materiale catodico utilizzato.

Il riciclo delle batterie litio-ioni è tuttavia attività complessa, in cui sono da valutare e gestire rischi chimici differenziati, che vanno dalla presenza di metalli a potenziale attività cancerogena, di vapori tossici (ad esempio acido fluoridrico) e di litio metallico anche in forma libera, che può essere causa di incendi ed esplosioni ove non adeguatamente gestito. Questo è da considerare un fattore critico nella progettazione di un eventuale processo di smantellamento e recupero, attività indispensabili sia dal punto di vista economico sia per la salvaguardia dell'ambiente. Per questo una particolare attenzione sarà indirizzata verso procedure di recupero del litio dai materiali che lo contengono utilizzando processi chimici a basso impatto ambientale, che possano essere in grado di minimizzare od al meglio annullare gli effetti sull'ambiente dei trattamenti proposti.

I principali materiali catodici usati nella fabbricazione delle batterie attualmente in commercio sono costituiti da:  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  e  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  e quelli anodici da grafite (con litio intercalato tra i piani grafenici) e titanati di litio. Data la rilevante variabilità delle forme in cui il litio è presente i metodi di recupero dovranno essere sviluppati tenendo conto delle differenze chimiche.

Risultati/Deliverable:

- Report sullo studio delle caratteristiche chimiche e fisiche delle batterie a fine vita
- Sviluppo di procedure adeguate per lo smantellamento delle batterie al litio
- Valutazione del recupero e riprocessamento dei materiali litiati tramite processi di soft-chemistry, in funzione del riutilizzo del litio in nuove batterie

Durata: ottobre 2012- settembre 2013

**e. Studio di sistemi di accumulo avanzati basati su magneti superconduttori**

La tecnologia per l'accumulo energetico basata su materiali superconduttori, denominata **SMES** (Superconducting Magnetic Energy Storage), è basata sull'accumulo di energia in forma di campo magnetico per mezzo di potenti magneti superconduttori. In aggiunta a questa applicazione, l'uso di magneti superconduttori è ormai consolidato in diversi campi, quali: magneti per acceleratori di particelle, per la fusione nucleare, per le applicazioni alla ricerca e per applicazioni medicali.

Attualmente sono stati costruiti prototipi per alcune decine di MW di potenza e con capacità energetica nell'ordine delle centinaia di kWh. Teoricamente, una bobina del raggio di 150-500 metri potrebbe accumulare 5000 MWh di energia e restituirla in 5 ore.

Le caratteristiche che rendono gli SMES vantaggiosi rispetto ad altri sistemi di accumulo possono essere sintetizzati nei punti seguenti:

- l'elevata densità di potenza e di energia li rendono di fatto generatori di corrente direttamente utilizzabili sulla rete
- la risposta immediata nel tempo
- il numero di cariche e scariche è praticamente infinito
- è un sistema statico e pertanto richiede poca manutenzione
- efficienza di conversione molto elevata (>97%)
- bassissimo impatto ambientale.

I sistemi di accumulo magnetici basati su sistemi superconduttori a temperature superiori a quelle dell'elio liquido hanno una forte potenzialità per essere utilizzati in tutti i tipi di fonti energetiche rinnovabili senza aumentarne i costi in modo non sostenibile.

Oggi sono disponibili materiali superconduttori, quali  $MgB_2$  e YBCO, che richiedono temperature operative comprese fra i 20 e i 70 K che, paragonate a quelle dell'elio liquido necessarie per i materiali superconduttori (LTS, Low Temperature Semiconductor) utilizzati negli SMES fino ad oggi, hanno costi sensibilmente minori.

Il cavo tipo  $MgB_2$  è oggi realizzabile facilmente nelle lunghezze necessarie e la sua industrializzazione in Italia è matura, mentre l'YBCO richiede sistemi di produzione più complessi, e la sua produzione industriale ha dei prezzi ancora proibitivi se paragonati ai materiali convenzionali.

Le attività del primo anno saranno incentrate nell'individuazione del materiale superconduttore più adatto ad essere utilizzato per l'eventuale prototipo dimostrativo, e la sua caratterizzazione in termini di misura delle proprietà di trasporto alle basse temperature.

#### Risultati/Deliverable

- Report di caratterizzazione di campioni di materiali superconduttori
- Disegno di massima di un prototipo dimostrativo

Durata: ottobre 2012 -settembre 2013

#### **f. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali**

L'attività prevede la partecipazione attiva a diverse iniziative internazionali che sono una fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni mobili e stazionarie. La partecipazione è funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso. Pertanto proseguiranno le attività relative alla partecipazione alle attività dell'International Energy Agency (IEA) su "Energy Conservation through Energy Storage" e "Hydrogen".

Inoltre, si prevede di proseguire la partecipazione all'alleanza europea, promossa dalla CE, denominata EERA, contribuendo ai temi "Smart grid" e "Energy storage". Inoltre sono previste alcune collaborazioni scientifiche e tecnologiche sull'accumulo, promosse dal circuito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica a livello europeo).

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulla partecipazione ai gruppi internazionali

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

I risultati delle attività svolte nell'ambito dell'accumulo di energia saranno diffusi a diverse tipologie di utilizzatori:

- la comunità scientifica tramite pubblicazioni su riviste scientifiche e partecipazioni a convegni nazionali ed internazionali;

- i Ministeri competenti e l'industria nazionale tramite i documenti ufficiali prodotti e diffusi tramite internet;
- la comunità scientifica e industriale in senso più ampio nell'ambito delle collaborazioni internazionali in atto in ambito IEA, CE (EERA e COST) e all'interno di progetti nazionali europei in corso, che risultano complementari alle attività previste nella ricerca di sistema.

Verrà valutata la possibilità di organizzare, entro i termini del PAR 2012 in corso o comunque entro il 2013, un workshop di aggiornamento sullo stato dei sistemi di accumulo, rivolto ai possibili utilizzatori nazionali, che possa anche consentire la diffusione delle attività svolte nella Ricerca di Sistema.

## PROGETTO A.4 “Sistemi avanzati di accumulo dell’energia”

### Obiettivi e relativi preventivi economici

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Progettazione, realizzazione e caratterizzazione di celle al litio con materiali innovativi	5909	325	5	25	0	5	70	430
b	Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio	2036	112	2	3	0	5	90	212
c	Studio e sviluppo di metodi di accumulo alternativi a quelli al litio-ione	1800	99	1	3	0	3	20	126
d	Studio delle caratteristiche chimiche e fisiche delle batterie a fine vita	2545	140	5	15	0	2	0	162
e	Studio di sistemi di accumulo avanzati basati su magneti superconduttori	2636	145	0	50	0	5	0	200
f	Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali	727	40	0	22	0	8	0	70
<b>TOTALE</b>		<b>15653</b>	<b>861</b>	<b>13</b>	<b>118</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>180</b>	<b>1200</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie



<b>AREA</b>	<b>PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE</b>
<b>Tema di Ricerca</b>	<b>STUDI E SPERIMENTAZIONI SUI POTENZIALI SVILUPPI DELLE ENERGIE RINNOVABILI - ENERGIA ELETTRICA DA BIOMASSE</b>
<b>Progetto B.1.1</b>	<b>SVILUPPO DI SISTEMI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA BIOMASSE E L'UPGRADING DEI BIOCOMBUSTIBILI</b>

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

La valorizzazione energetica di biomasse di diversa natura (scarti, residui e reflui di produzioni agricole, allevamenti zootecnici e lavorazioni agroindustriali e la frazione organica dei rifiuti urbani), disponibili nell'ambito di un determinato territorio, può essere ottenuta in diversi modi e in particolare, con specifico riferimento alla produzione di energia elettrica su scala locale, mediante la digestione anaerobica (DA) delle biomasse fermentescibili per la produzione di biogas, mentre per quelle lignocellulosiche si può utilizzare la gassificazione per ottenere il cosiddetto syngas o la combustione diretta per trasferire l'energia contenuta nella biomassa ad un opportuno vettore energetico.

Sia il biogas che il syngas possono essere utilizzati in sistemi di piccola taglia distribuiti sul territorio (da qualche decina di kW al MW) per la generazione di elettricità e calore con sistemi basati sull'utilizzo di diversi cicli termici (motogeneratori, turbogeneratori, moduli ORC), mentre il biogas (e, in prospettiva, anche il syngas modificato nella composizione con uno specifico processo di metanazione), dopo opportuna purificazione ed upgrading, può essere immesso nella rete gas nazionale come biometano.

La produzione di biometano da immettere nella rete richiede, da un lato, l'ottimizzazione dei processi di digestione anaerobica, per aumentare la resa e la quota 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 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 e l'integrazione tra i vari sottosistemi.

L'attività proposta per il triennio 2012-2014 prevede la sperimentazione su dispositivi e impianti pilota di processi e tecnologie, studiati e sviluppati nell'ambito del precedente AdP, per la produzione e purificazione di biogas e syngas, e il trattamento dei fumi di combustione delle biomasse lignocellulosiche, in modo da ottenere una serie di "prodotti" di un reale interesse applicativo.

In particolare, l'ottimizzazione dei sistemi di produzione di biogas verrà perseguita mediante lo studio e lo sviluppo dei processi di pretrattamento per ampliare la tipologia di biomasse utilizzabili e ridurre i tempi di permanenza nei reattori biologici di quelle più difficilmente degradabili per l'elevato contenuto in cellulosa e lignina, velocizzando i processi fermentativi, e, attraverso lo sviluppo e sperimentazione su un impianto pilota da 6 m<sup>3</sup> realizzato nel precedente AdP, di sistemi biologici in grado di incrementare la resa di metano partendo da diverse tipologie di biomasse/rifiuti, soprattutto di origine agricola ed agroindustriale, opportunamente miscelati (co-digestione). Saranno di conseguenza valutate le potenzialità produttive di nuove miscele da avviare alla DA, rappresentative delle diverse tipologie di biomasse maggiormente disponibili sul territorio nazionale (così come emerge anche dall'Atlante delle Biomasse realizzato dall'ENEA nel primo anno dell'AdP 2006-2008), più promettenti dal punto di vista della semplicità di reperimento e gestione e/o della resa energetica, quali ad esempio rifiuti o materiali di scarto (FORSU, deiezioni animali, scarti e rifiuti agroalimentari e delle lavorazioni agroindustriali ecc.) e colture non alimentari utilizzabili per la produzione di biogas come, ad esempio, il topinambur.

In tale contesto saranno inoltre avviate attività di studio e sperimentazione di sistemi per la produzione di microalghe, da inserire a valle del processo di DA, al fine di definire le condizioni operative da adottare per ottenere i migliori risultati in termini di resa energetica, economici ed ambientali, valutare la riduzione del contenuto in nutrienti, soprattutto azotati, degli effluenti liquidi e massimizzare la produzione di biomassa

algale da riciclare nei digestori.

Il tema della produzione di biometano di qualità adatta all'immissione in rete verrà affrontato potenziando le attività sullo sviluppo di sistemi di depurazione (clean up) per abbattere i contaminanti e quelle sui processi di separazione della CO<sub>2</sub> (fuel upgrading) contenuta nel biogas. In particolare, proseguiranno da un lato gli studi sul clean up iniziati nel secondo anno dell'AdP 2006-2009, con la messa a punto di nuovi materiali, sia per i processi di semplice assorbimento che per quelli di conversione chimica (catalizzatori strutturati), dall'altro si affronteranno le problematiche aperte per la separazione della CO<sub>2</sub>, con l'obiettivo di realizzare sistemi efficienti ed efficaci, anche per quantità di gas da trattare relativamente basse. In quest'ottica, saranno avviati studi sui sistemi di separazione della CO<sub>2</sub> con processi mutuati da precedenti attività nel campo della CCS, basati sull'utilizzo di ammine in soluzione organica con rigenerazione a bassa temperatura, e processi di rimozione selettiva della CO<sub>2</sub> tramite formazione di idrati.

Le attività relative alla digestione anaerobica e quelle sulla purificazione del biogas saranno oggetto di un progressivo scale-up con lo svolgimento di prove sperimentali con un sistema che verrà progettato e realizzato sulla base dei test effettuati in scala laboratorio con gas simulati, ed inserito a valle dell'impianto pilota da 6 m<sup>3</sup>, dotato di un adeguato sistema di condizionamento del biogas. Questo permetterà di verificare l'effettiva scalabilità dei diversi processi e sistemi messi a punto a livello di laboratorio e valutarne la loro fattibilità tecnico-economica, anche in funzione delle differenti biomasse utilizzate per alimentare il digestore.

In parallelo, saranno portate avanti le attività di studio di processi di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di particolari tipologie di biomasse ad elevato tenore di umidità (fanghi di depurazione, biomassa algale ecc.) ed implementata la ricerca e la sperimentazione sui processi per la produzione di metano a partire dal syngas, utilizzando un impianto pilota in scala laboratorio per la produzione di gas naturale di sintesi (BIOSNG), realizzato su apposito skid nel corso del precedente AdP presso il Centro Enea della Trisaia, utilizzabile sia in condizioni isoterme che adiabatiche, che consente di studiare la fluidodinamica del processo di metanazione in condizioni simili a quelle di un impianto industriale.

Si procederà inoltre al perfezionamento e potenziamento del portale WEB GIS A.I.D.A. (Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants), concepito allo scopo di permettere un utilizzo più rapido ed intuitivo di database, come quello dell'Atlante Nazionale delle Biomasse, in modo da consentire una valutazione preliminare della fattibilità tecnica ed economica di impianti energetici in base alla disponibilità territoriale delle biomasse e alle loro caratteristiche chimico-fisiche.

Sarà infine avviata nel corso del presente AdP una nuova linea di attività finalizzata alla ricerca e sviluppo di sistemi cogenerativi innovativi di piccola-media taglia a maggior efficienza energetica (caldaie a sali fusi ad alta temperatura associate a cicli termici operanti sia con vapore d'acqua che con fluidi organici) basati sulla combustione di biomasse lignocellulosiche, e di nuovi dispositivi catalitici per la riduzione degli inquinanti organici presenti nei fumi.

In particolare, per quel che riguarda i sistemi cogenerativi innovativi, le nuove attività saranno finalizzate allo sviluppo di una tipologia di caldaie innovative a ciclo indiretto, per potenze termiche nominali dell'ordine di 1-4 MWt del ciclo di vapore (acqua o fluidi organici), con utilizzo di sali fusi come fluido termovettore.

### ***Situazione attuale del prodotto dell'attività***

La digestione anaerobica (DA) è un processo biochimico di degradazione della sostanza organica in assenza di ossigeno che dà luogo alla produzione di biogas, costituito essenzialmente da una miscela di metano (55-65%v/v) e CO<sub>2</sub>, oltre alla presenza fino al 5%v/v di acqua, acido solfidrico ed ammoniaca. Il processo è realizzato da un consorzio microbico in grado di compiere diverse reazioni degradative della materia organica, più o meno rapide ed efficaci a seconda delle condizioni operative (pH, temperatura, diluizione del substrato, presenza di nutrienti o inibitori, ecc.) in cui si svolgono.

I processi di DA e le successive fasi di clean up e upgrading (rimozione della CO<sub>2</sub>) del biogas sono oggetto di crescente attenzione per i vantaggi che il loro impiego potrebbe presentare:

- per una gestione ottimale dei rifiuti, scarti e residui organici di diversa natura e provenienza, in quanto la loro conversione in energia trasforma un costo (lo smaltimento) in un possibile guadagno (la vendita e/o lo sfruttamento diretto dell'energia ricavata);
- come soluzione integrativa ed alternativa per incrementare il reddito derivante dalle attività del settore imprenditoriale agricolo ed agroindustriale, con la possibilità di diversificare e aumentare le produzioni agricole consentendo di ampliare le coltivazioni anche in quei terreni che, per scarsa remuneratività e difficoltà di accesso, sono stati marginalizzati o abbandonati, senza depauperarne la capacità produttiva e preservandone il valore agronomico;
- come possibile contributo al raggiungimento degli obiettivi comunitari relativamente all'aumento dell'impiego delle fonti rinnovabili, alla diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e della dipendenza dai combustibili fossili.

In questa direzione vanno le attività di ricerca e sviluppo nel campo della microbiologia per lo studio di sistemi di DA ottimizzati in termini di resa di biogas, presenza di inquinanti, utilizzo di nuove possibili miscele in co-digestione. Quest'ultima linea è quella oggetto di maggiore attenzione, in particolare dove, come è il caso dell'Italia, non c'è una disponibilità particolarmente elevata di biomassa e, soprattutto, è presente un'alta differenziazione locale e stagionale delle biomasse utilizzabili ai fini della digestione anaerobica. La co-digestione diventa pertanto una scelta obbligata: da qui discende la necessità di investigare le possibili miscele in termini di rapporto tra le differenti biomasse e di condizioni di esercizio (miscelazione, temperatura, acidità, tempi di ritenzione).

La presenza di contaminanti, in particolare dei composti dello zolfo, è critica sia per l'immissione in rete che per l'utilizzo del biogas in sistemi di cogenerazione. A tale riguardo, sono allo studio metodologie che inibiscono la formazione dei composti di zolfo allo stato gassoso che, in combinazione con sistemi di abbattimento biologico (batteri solfoossidanti), potrebbero portare a livelli di contaminazione sufficientemente bassi da semplificare significativamente la fase di clean up rendendola più rapida, efficace ed efficiente. Accanto alla diminuzione della produzione dei contaminanti gassosi nella fase di digestione, notevoli sforzi vengono anche rivolti ai metodi di abbattimento chimico-fisico o biologici a valle del digestore e prima dell'impiego del gas.

La conversione del biogas in biometano (del tutto analogo per composizione e caratteristiche al gas naturale distribuito in rete) mediante la separazione e successiva rimozione della CO<sub>2</sub> viene già praticata in diversi paesi, dove il biogas e/o il gas da discarica sono utilizzati per essere immessi in rete o utilizzati direttamente per il trasporto. Le tecnologie impiegate sono tipicamente chimico-fisiche (per assorbimento e/o adsorbimento) e relativamente recente è lo sviluppo di metodologie di separazione che applicano sistemi con membrane, con diverse Università e laboratori di ricerca attivi in questo campo.

Per quanto riguarda la produzione di syngas mediante i processi di gassificazione delle biomasse lignocellulosiche, il quadro si differenzia notevolmente passando dal processo che utilizza acqua supercritica ai sistemi di gassificazione "a secco", finalizzati alla produzione di syngas ricchi in metano (bio-SNG). Nel primo caso si tratta di un processo in cui lo studio è a livello di simulazione matematica e di prove sperimentali di verifica a scala banco con soluzioni simulate contenenti matrici organiche semplici e ben definite, su cui sono attive alcune Università e Centri di Ricerca, mentre nel caso della produzione di SNG si è in grado di effettuare delle sperimentazioni per definire operatività e performance con sistemi ingegnerizzati che potranno essere testati su impianti di gassificazione in primis di piccola taglia, con gassificatori a letto fisso, e, successivamente, su scala maggiore in impianti di gassificazione a letto fluido ricircolante interno ed operanti con fluidi gassificanti ricchi in ossigeno e vapore d'acqua, che consentono di avere miscele meno diluite in gas inerte (azoto) e con un contenuto maggiore di metano.

L'ENEA opera da tempo in tutti i campi menzionati nei punti precedenti ed ha prodotto risultati promettenti nell'ambito dell'Accordo di Programma per i precedenti trienni. In particolare, per quel che riguarda il settore della valorizzazione energetica delle biomasse, l'ENEA vanta una vasta esperienza sia nello studio e messa a punto di sistemi di gassificazione e nello sviluppo di processi innovativi di digestione anaerobica, fino ad arrivare alla realizzazione di impianti pilota e/o sperimentali, con numerose attività anche a sostegno di pubbliche amministrazioni per la gestione/realizzazione di impianti di valorizzazione energetica dei rifiuti. Anche per quanto attiene il clean up del biogas e l'impiego di biogas e/o syngas in

sistemi di generazione/cogenerazione, l'ENEA conduce da tempo attività sperimentali sulle relative tecnologie nell'ambito di diversi progetti nazionali, tra cui lo stesso AdP, ed internazionali (tipicamente progetti UE).

### **Stato attuale delle tecnologie**

Gli impianti di biogas connessi alla rete nazionale di distribuzione dell'energia elettrica erano 819 a fine 2011, con una potenza installata totale pari a 773,4 MW (GSE, 2012). Tenendo conto di tutti i possibili usi del biogas (non solo la produzione di elettricità, ma anche quella di calore e, in prospettiva, di biometano) e dell'elevato numero di impianti in costruzione, una recente indagine del CRPA (maggio 2011) ha individuato, per il solo settore agro-zootecnico, un totale di 521 impianti, per una potenza installata di circa 350 MW. A puro titolo di riferimento, il Piano di Azione Nazionale per lo sviluppo delle Fonti Rinnovabili (giugno 2010) prevede, per l'intero settore, una potenza installata pari a 1.200 MW.

La produzione di energia da biogas, utilizzando biomasse e rifiuti speciali non pericolosi (agricoli, agroindustriali e zootecnici), può essere realizzata in impianti di diversa taglia e tipologia, ma la sua economicità è spesso problematica proprio per i costi elevati connessi alla realizzazione di tali impianti di conversione.

E' indubbio che nel settore della digestione anaerobica l'industria, soprattutto quella estera, sia presente con prodotti maturi ed affidabili, tuttavia è altrettanto evidente la necessità di sostenere e sviluppare la ricerca in questo campo perché sono tante le sfide e le peculiarità da affrontare, in particolare in Italia, sia per quanto riguarda le tipologia e le potenzialità delle biomasse alimentabili, sia per le problematiche legate alla collocazione finale del digestato.

Tenendo conto delle particolari caratteristiche del sistema produttivo agricolo nazionale, a partire dall'orografia del territorio per arrivare alla notevole frammentazione e alle ridotte dimensioni delle superfici aziendali, la tipologia più richiesta di digestore anaerobico è quella di impianti di piccola-media taglia (qualche centinaio di kW) che si adattino al panorama italiano, dove le aziende agricole, zootecniche o agroalimentari e i sistemi di trattamento delle acque reflue, così come la raccolta differenziata dei rifiuti, generano flussi di materiale fermentescibile piuttosto modesti, poco concentrati e variabili nel tempo. Questo significa che vanno sviluppati sistemi ad alta resa energetica, robusti e affidabili, preferibilmente automatizzati in modo tale da facilitare la gestione delle diverse materie prime di volta in volta disponibili e rendere remunerativo l'investimento di capitali necessario per la loro realizzazione. Un discorso analogo vale, forse in maniera anche maggiore, per i gassificatori di biomasse lignocellulosiche, che rappresentano una tecnologia ancora non sufficientemente matura, sia per i sistemi di piccola-media taglia che per quelli di maggiori dimensioni.

Un altro problema da affrontare, sia per il biogas che per il syngas, è la presenza di contaminanti e, con specifico riferimento al biogas, la necessità di avere gas con maggiore concentrazione di metano. Per quel che riguarda la rimozione dell'idrogeno solforato, che rappresenta il principale contaminante del biogas, le tecnologie tradizionalmente utilizzate dall'industria petrolchimica (basate sull'assorbimento chimico mediante soluzioni amminiche, reazione chimica con ossidi metallici solidi e adsorbimento fisico su letti solidi di varia natura, come zeoliti o carboni attivi), trovano per la maggior parte un limite nella diversa scala degli impianti, e un discorso analogo può essere fatto anche per la rimozione della CO<sub>2</sub> presente nel metano estratto dai giacimenti naturali. L'industria petrolchimica tratta infatti portate orarie di gas grezzo che possono superare abbondantemente le decine di migliaia di metri cubi, mentre gli impianti di biogas, specialmente nell'ottica di una generazione distribuita, possono arrivare facilmente anche al di sotto dei 100 Nm<sup>3</sup>/h di gas grezzo da trattare.

Molti dei processi tradizionali non risultano quindi economici per il trattamento di portate di gas così basse e, per questo motivo, lo sviluppo di processi per la desolforazione e/o l'upgrading del biogas si è mosso, quando possibile, attraverso lo scale-down dei processi tradizionali, ma anche tramite l'introduzione di nuovi processi che, al contrario, non risultano facilmente gestibili su larga scala. Ad oggi, esistono diverse tecnologie mature per la desolforazione del biogas, mentre altre sono ancora oggetto di ricerca o in fase di test su scala pilota. Tali processi possono essere divisi in due principali categorie: i processi chimico-fisici e i processi biologici. Alla prima categoria appartengono operazioni di assorbimento e adsorbimento, basate su principi puramente fisici o in presenza di reazione chimica, mentre la seconda categoria include processi

che impiegano popolazioni batteriche solfoossidanti per l'ossidazione dell' $H_2S$  a zolfo elementare e si differenziano per tipologia di batteri utilizzati e per le modalità operative.

Una buona scelta dell'unità di desolforazione da inserire a valle del digestore non può prescindere dalle specifiche caratteristiche dell'impianto in cui si va ad inserire, ed in modo particolare dalla portata, temperatura e composizione del biogas prodotto. Altro aspetto importante da considerare è la non uniformità delle condizioni di produzione, sicuramente non trascurabile nel caso di impianti alimentati con biomassa variabile.

Sia per quel che riguarda la purificazione che per l'upgrading del biogas a biometano, la sfida da affrontare nel contesto nazionale è quindi quella della realizzazione di sistemi di taglia medio-piccola con un livello di affidabilità adeguato e con un grado di automazione che riduca l'impegno di personale, arrivando anche alla possibilità di poter essere gestiti da operatori con un livello di qualificazione professionale non particolarmente elevato senza perdere in efficienza e limitando i costi operativi e l'investimento necessario.

E' per questa ragione che si stanno esplorando nuove frontiere: interventi sul processo di digestione anaerobica per inibire la formazione di  $H_2S$ , sistemi biologici innovativi e nuovi materiali assorbenti e/o nuovi catalizzatori per l'abbattimento dei contaminanti, sistemi per la separazione della  $CO_2$  dal biogas basati sull'impiego di membrane polimeriche o composite, ammine in fase organica e/o formazione di idrati. Su tutte queste tematiche l'ENEA è stata impegnata nell'ambito dei precedenti AdP o sta avviando nuove attività di ricerca e continuerà a lavorare nelle prossime annualità.

Per quel che riguarda l'impiego di biogas o syngas da biomasse in sistemi di generazione elettrica e cogenerazione di piccola/media taglia, l'individuazione delle tecnologie più adatte alle diverse situazioni e l'integrazione delle stesse con il sistema di produzione/purificazione del gas richiedono ancora un notevole impegno di sviluppo e ottimizzazione.

A tale proposito, è importante sottolineare come l'upgrading del biogas a biometano consentirebbe, oltre alla sostituzione di metano di origine fossile distribuito dalla rete del gas, di produrre energia elettrica rinnovabile a livello locale utilizzando cogeneratori commerciali a metano, più efficienti e notevolmente meno costosi rispetto a quelli costruiti per l'alimentazione con biogas. La convenienza economica di una simile scelta è ovviamente legata in primo luogo ai costi del sistema di upgrading rispetto al risparmio sull'acquisto del cogeneratore.

Problemi per molti versi analoghi si presentano anche per le tecnologie più convenzionali, basate sulla combustione delle biomasse in impianti termici e/o cogenerativi di piccola-media taglia. In particolare, sarà necessario esplorare da un lato possibili soluzioni innovative per aumentare l'efficienza complessiva del sistema caldaia-generatore e dall'altro per ridurre le emissioni di particolato, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e composti organici volatili (COV), agendo sia sui sistemi di combustione che mediante lo sviluppo di nuovi dispositivi di abbattimento.

Anche per lo sviluppo di caldaie a sali fusi, sono noti alcuni sistemi di questo tipo applicati in settori di nicchia dell'industria chimica e petrolchimica, mentre sono stati effettuati studi che hanno investigato le possibilità di utilizzo di questo vettore energetico in caldaie a combustibile fossile in associazione con sistemi di riscaldamento solare ad alta temperatura per impianti di produzione di energia elettrica di grande potenza mediante cicli combinati. Non sono invece note attività di ricerca riguardanti l'associazione di combustori a biomassa con caldaie a sali fusi, e ad un eventuale impianto solare, e neppure studi sui sistemi di conversione da associare a questi dispositivi, soprattutto in una fascia di potenza medio-bassa compatibile con la generazione-cogenerazione elettrica distribuita.

L'ENEA ha sviluppato un livello di conoscenza unico nei processi termochimici e termodinamici con i sali fusi, fino ad arrivare alla realizzazione di impianti pilota e/o sperimentali, anche nell'ambito di diversi progetti nazionali ed internazionali.

## IL PROGETTO NEL TRIENNIO

### Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali

Nel periodo temporale di riferimento sono stati realizzati e/o completati dispositivi e circuiti sperimentali di laboratorio e impianti pilota, con l'obiettivo specifico di verificare su una gamma più ampia di condizioni operative e su diverse scale la fattibilità di processi e tecnologie oggetto di studio nel corso degli anni precedenti e, contemporaneamente, sono proseguite attività di ricerca di laboratorio, ne sono state avviate di nuove, realizzate analisi modellistiche e studi di fattibilità.

Per quel che riguarda più in particolare il processo di digestione anaerobica sono state svolte, a livello di laboratorio, specifiche attività di ricerca finalizzate ad ottimizzare i processi di produzione di biogas per ottenere miscele arricchite in idrogeno a partire da substrati liquidi (reflui) opportunamente selezionati quali liquame, scotta e glicerolo, mediante l'utilizzo di specifici inoculi microbici, caratterizzati con tecniche di sequenziamento e costruzione di librerie genetiche.

E' stato effettuato lo scaling-up su fermentatori da banco dei processi più promettenti per la produzione di idrogeno e metano dalla scotta e di idrogeno ed etanolo dal glicerolo crudo, sottoprodotto della produzione industriale del biodiesel.

E' stato messo a punto su scala laboratorio un sistema di pretrattamento biologico di substrati ad elevato contenuto di cellulosa e lignina (segatura e trucioli di legno), basato sull'impiego di funghi lignino-cellulolitici opportunamente selezionati, al fine di ottenere un substrato idoneo alla successiva fermentazione anaerobica per la produzione di idrogeno e/o metano. Campioni di biomassa trattata con ceppi fungini sono stati sottoposti a test di fermentazione con un inoculo di microrganismi idrogeno-produttori e, in una seconda fase, a test di produzione di metano allo scopo di verificare la fattibilità di un processo totalmente biologico a più stadi, e i risultati dei test sono attualmente in corso di valutazione. I risultati delle diverse ricerche saranno progressivamente oggetto di verifica sperimentale a livello di impianto pilota utilizzando il digestore modulare mobile da 6 m<sup>3</sup> (DMM6000®).

Il DMM6000®, in grado di produrre fino a 500 litri/ora di biogas, sarà utilizzato per effettuare sperimentazioni con mix di biomasse e/o di batteri e provare con biogas reale diversi processi e tecnologie di clean up e di upgrading, in modo da ottenere un biocombustibile gassoso "pulito", utilizzabile per la generazione di energia elettrica o per alimentare sistemi per la produzione di biometano.

Per quanto concerne il clean up del biogas, sulla base di un'approfondita analisi dello stato dell'arte, sono stati individuati i processi più promettenti di adsorbimento e di rimozione mediante ossidazione selettiva dell'idrogeno solforato (H<sub>2</sub>S), nello specifico carboni attivi impregnati con KOH e funzionalizzati con sali di rame e cromo per l'adsorbimento e catalizzatori strutturati a base di vanadio per l'ossidazione, e su di essi sono state condotte campagne sperimentali di valutazione delle prestazioni in termini di capacità ed efficienza di abbattimento, tempi di saturazione, modalità e tempi di rigenerazione.

Tra gli obiettivi del precedente AdP vi era anche la realizzazione e sperimentazione di un prototipo di unità di desolfurazione in colonna a letto fisso, dimensionata in modo da poter essere accoppiata con l'impianto pilota di digestione anaerobica. Il prototipo, realizzato nel corso della precedente annualità, è stato utilizzato per effettuare prove sperimentali di alimentazione con miscele simulate rappresentative della reale composizione del biogas, studiando in particolare l'effetto della presenza di CO<sub>2</sub> e di CH<sub>4</sub> in diverse percentuali, oltre ad eventuali inquinanti del biogas, sull'adsorbimento dell'H<sub>2</sub>S e quindi sulle prestazioni del processo di desolfurazione. Obiettivo di quest'ulteriore attività è quello di sviluppare un modello matematico del processo da utilizzare come strumento per l'analisi dei dati sperimentali raccolti, per la pianificazione delle future campagne di prove con il biogas proveniente dal digestore pilota DMM6000® e per la corretta progettazione di un'unità di desolfurazione di scala reale.

Nel corso dell'annualità 2011 sono proseguiti gli studi e le attività sperimentali relativi alla rimozione dei silossani, che hanno evidenziato una buona capacità adsorbente dei carboni attivi nei confronti di tali inquinanti. In particolare i test eseguiti hanno mostrato che l'adsorbimento su carboni attivi è di tipo fisico, risultando quindi importante la superficie specifica e non il tipo di trattamento chimico subito dal carbone. I

sistemi di rimozione dei silossani a carboni attivi potrebbero costituire una soluzione semplice ed economica, adeguata per impianti di piccola taglia, ma, per poter procedere alla definizione di un sistema prototipo, sono necessari ulteriori studi che consentano di valutare il comportamento nel caso di biogas reale, verificando gli effetti legati alla presenza di CO<sub>2</sub> e degli altri inquinanti presenti, in particolare H<sub>2</sub>S, che come è noto possono competere nell'adsorbimento su carboni attivi.

Parallelamente allo sviluppo di sistemi chimico-fisici per la rimozione dell'acido solfidrico a valle del digestore, sono state svolte attività di ricerca sull'abbattimento dell'idrogeno solforato nel biogas tramite il processo di fotosintesi anossigenica operato dai solfobatteri, già avviate nel corso delle precedenti annualità dell'AdP. Nell'ambito di tali attività, si è effettuata la messa a punto di tecniche colturali in batch di due ceppi di *Chlorobium limicola*, DSM 245T e 248 (DSMZ) per monitorare la loro capacità di rimozione dello ione solfuro dal mezzo di coltura, e si sta procedendo allo studio ed alla caratterizzazione della curva di crescita dei ceppi di *C. limicola* in un prototipo di fotobioreattore per il trattamento del biogas dotato di LED monocromatici, realizzato nel corso della precedente annualità.

Gli studi successivi saranno indirizzati a ridurre i tempi di abbattimento dello ione solfuro attraverso l'ottimizzazione delle condizioni colturali. I processi messi a punto in laboratorio saranno progressivamente oggetto di verifica e valutazione preliminare attraverso studi di fattibilità tecnico-economica utilizzando dapprima miscele simulanti il biogas e, successivamente, il gas reale prodotto dall'impianto pilota di digestione anaerobica DMM6000®.

Per quel che riguarda la separazione della CO<sub>2</sub> dal biogas, è stata avviata un'analisi dei sistemi a membrana, sia esplorando la possibilità di sviluppare membrane ceramiche, con la produzione di campioni mediante colatura su nastro o estrusione e successivo trattamento CVD di supporti ceramici microporosi rivestiti con film di membrane inorganiche selettive e la successiva esecuzione di test sperimentali per la valutazione delle performances, sia mediante il completamento e la messa in esercizio presso il Centro della Trisaia di un impianto sperimentale per prova e caratterizzazione di membrane polimeriche commerciali e/o sviluppate ad hoc.

Sono state effettuate prove di laboratorio per la caratterizzazione di alcune membrane polimeriche commerciali utilizzate per la separazione della CO<sub>2</sub> dal CH<sub>4</sub>, volte nello specifico a valutare l'influenza dei diversi protocolli di trattamento sulle caratteristiche delle membrane stesse, studiare la resistenza all'invecchiamento ed investigare l'effetto dell'umidità e degli altri composti presenti nella miscela di alimentazione sulle performance di separazione. I primi risultati sull'effetto dell'umidità non sono incoraggianti: infatti al crescere dell'umidità relativa diminuisce sensibilmente la permeabilità della CO<sub>2</sub>.

Parallelamente, sono stati preparati campioni di membrane polimeriche nanocomposite piane in scala da laboratorio, e su queste sono state condotte prove di permeazione in una cella appositamente realizzata nel corso dell'annualità precedente, utilizzando sia gas puri che miscele simulanti il biogas (già privo di H<sub>2</sub>S) a concentrazione crescente di CO<sub>2</sub> (30, 40 e 50%v/v).

E' stata effettuata una comparazione tecnico-economica di impianti di upgrading tradizionali (PSA), confrontandone le prestazioni con quelle dei processi a membrana per mezzo di un modello sviluppato nel corso dell'annualità precedente, con specifico riferimento alle condizioni operative tipiche per l'accoppiamento con impianti di DA di piccola-media taglia (produzione di biogas minori di 600 m<sup>3</sup>/ora). Si è quindi proceduto ad una validazione preliminare del modello utilizzando, per i processi a membrana, i dati sperimentali ottenuti dall'impianto di upgrading realizzato nel corso dell'annualità precedente presso il Centro della Trisaia, in grado di processare fino a circa 350 Sm<sup>3</sup>/h di biogas. In particolare, presso il Centro della Trisaia sono stati effettuati test sperimentali finalizzati alla validazione dei modelli numerici e alla valutazione del comportamento selettivo della membrana polimerica commerciale (polieterchetone PEEK) installata sull'impianto, utilizzando miscele binarie CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>.

E' stata implementata e trasferita su server ENEA la piattaforma WEB A.I.D.A. (Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants), che costituisce uno strumento 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 di biomasse e rifiuti organici di diversa natura. Il lavoro

di trasferimento della piattaforma A.I.D.A. è stato completato con successo migrando la stessa da un sistema Windows 2003 server (server di lavoro) ad un sistema più avanzato e performante quale Windows 2008 server R2 (server di pubblicazione), che ha fornito prestazioni molto soddisfacenti in fase di collaudo ed è stato quindi confermato come piattaforma ideale per l'applicativo stesso.

Per quel che riguarda i processi di gassificazione delle biomasse, è stato testato presso il Centro ENEA della Trisaia un dispositivo sperimentale di scala laboratorio, attualmente in grado di operare in condizioni semi-batch a pressioni superiore ai 300 bar e temperature fino a 350 °C, per lo sviluppo di processi idrotermici per il pretrattamento di biomasse ad elevato tenore acquoso. Parallelamente, è stato effettuato uno studio rivolto alla ricerca della migliore soluzione operativa per la produzione di catalizzatori bimetallici (cobalto/molibdeno e nichel/molibdeno su supporto di allumina) per la gassificazione di biomasse con acqua in condizioni supercritiche (SCW), che saranno oggetto di verifiche sperimentali per valutarne le prestazioni e la stabilità utilizzando allo scopo lo stesso dispositivo sperimentale dell'ENEA. Si è inoltre utilizzato un modello matematico sviluppato nel corso della precedente annualità dell'AdP, che prevedeva l'analisi di equilibrio delle reazioni di conversione del glucosio in condizioni supercritiche, implementandolo al fine di valutare gli effetti della conduzione del processo di gassificazione in condizioni supercritiche di due tipi di biomasse significative come i gusci di mandorle e i fanghi provenienti da impianti di depurazione.

Oltre allo studio sulla gassificazione con SCW, sono state condotte attività finalizzate ad investigare le potenzialità della produzione di gas naturale sintetico (SNG) da biomasse tramite processi termochimici di gassificazione che hanno permesso di individuare le condizioni ottimali di esercizio per incrementare la concentrazione del metano nel syngas ed il successivo upgrading a SNG. Sulla base dei risultati degli studi e ricerche effettuati nel corso della precedente annualità, che avevano portato alla definizione della configurazione ottimale e dalla progettazione di un impianto scala laboratorio (impianto BIOSNG), utilizzabile sia in condizioni isoterme che adiabatiche, in grado di produrre SNG mediante la reazione in fase eterogenea tra miscele di gas e di un catalizzatore commerciale a base di nichel all'interno di un'apposita camera di reazione. Il sistema sarà esercito alimentandolo in una prima fase con una miscela di gas simulanti la composizione del syngas, per valutare le prestazioni dei diversi catalizzatori, fissando la portata di alimentazione e studiando le cinetiche di reazione al variare delle condizioni operative, verificandone il comportamento e la durabilità (shelf life) degli stessi catalizzatori in presenza di impurezze che saranno aggiunte al syngas simulato per avvicinarsi maggiormente alle caratteristiche chimiche di un syngas reale.

Per quanto riguarda la linea di attività sui sistemi catalitici per il trattamento dei fumi provenienti dalla combustione di biomasse lignocellulosiche in impianti cogenerativi di piccola-media taglia, avviate nel corso dell'ultima annualità dell'AdP, è stata realizzata presso la hall tecnologica Thexas del Centro ENEA di Saluggia una linea sperimentale dedicata, costituita da una caldaia da 20 kW alimentata con pellet di legno, da una linea di derivazione e prelievo dei suddetti fumi, equipaggiata con un apposito dispositivo riscaldato per l'inserimento dei supporti ceramici per le prove preliminari di termofluidodinamica, e dalla strumentazione analitica (da implementare nel prossimo futuro) necessaria per la caratterizzazione dei fumi a monte e a valle del suddetto dispositivo.

Parallelamente, sono stati prodotti da FN alcuni campioni di supporti ceramici, da testare sulla linea sperimentale sopra descritta, ed effettuato uno studio sullo stato dell'arte dei dispositivi filtranti e catalitici disponibili in commercio per l'applicazione su impianti cogenerativi di combustione a biomasse lignocellulosiche, utilizzabili a valle di sistemi di abbattimento tradizionali, finalizzato all'individuazione catalizzatori commerciali idonei per la verifica e la sperimentazione sull'impianto di prova installato presso la hall tecnologica Thexas, previa deposizione sui campioni dei supporti filtranti preparati da FN.

E' stata quindi predisposta una matrice informativa in grado di fornire una mappa di materiali di supporto e di principi attivi idonei a trattare le emissioni di particolato e di inquinanti organici in base ai parametri di funzionamento degli impianti in esame (impianti di combustione di biomasse lignocellulosiche con potenze termiche al focolare di almeno 1 MW), quali la temperatura e portata dei fumi, la concentrazione di particolato e la presenza e concentrazione di sostanze che potrebbero danneggiare il catalizzatore.

Sono state inserite inoltre nel programma alcune attività a supporto della Pubblica Amministrazione per la definizione di un quadro nazionale di riferimento nel settore della produzione di energia da fonti rinnovabili, con particolare riferimento alle biomasse, insieme a quelle connesse con la presenza dell'ENEA



nei principali organismi internazionali, come l'European Energy Research Alliance (EERA) e il Bioenergy Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), con l'obiettivo di favorire il rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali sul tema specifico della bioenergia.

### **Obiettivo finale dell'attività**

L'obiettivo finale dell'attività è di contribuire, nei tre anni di durata complessiva del programma, alla messa a punto e dimostrazione su scala pilota di sistemi per la valorizzazione energetica delle biomasse, sia mediante la produzione di biogas, da utilizzare per la co-generazione di elettricità e calore in sistemi decentralizzati di piccola-media taglia o, previo un opportuno trattamento di clean up e upgrading, per l'immissione come biometano nella rete nazionale di distribuzione del gas, sia attraverso lo sviluppo di sistemi di cogenerazione ad elevato rendimento basati sulla tecnologia della gassificazione (utilizzabili anche per la produzione di biocombustibili liquidi di sintesi) o della combustione in dispositivi innovativi per disporre di vettori energetici ad alta temperatura (caldaie a sali fusi), in grado di superare i 450 °C, anche associati con impianti solari termodinamici.

Molte attività in questo campo sono iniziate nel primo triennio dell'AdP con un'enfasi maggiore sulla ricerca e sviluppo per l'impiego di biogas e syngas in celle a combustibile, ma, negli anni successivi, vi è stato un graduale spostamento dell'attenzione sulla produzione, clean up ed upgrading dei gas derivanti da biomasse o rifiuti organici in sistemi avanzati, sia per migliorare il livello di affidabilità e di compatibilità ambientale di sistemi di conversione esistenti, sia per ampliare e diversificare gli usi finali (sistemi di generazione avanzati, nuovi biocombustibili liquidi e gassosi).

Al fine di contribuire a ridurre l'impatto ambientale della produzione di elettricità da biomasse solide, si vuole inoltre cercare di ridurre i livelli di emissioni gassose relative a particolati fini e di altri inquinanti organici prodotte da impianti di combustione di biomasse solide di piccola-media taglia, sia ottimizzando i processi di combustione, sia individuando nuovi sistemi di abbattimento basati su processi di rimozione catalitici, come pure di migliorare l'impatto ambientale delle filiere di produzione del biogas, con particolare riferimento agli impianti operanti in un contesto agricolo.

Per quel che riguarda il triennio 2012-2014, sulla base dei risultati ottenuti in precedenza e di quanto reso disponibile presso l'ENEA anche nell'ambito di altri programmi di ricerca svolti negli ultimi anni, le attività saranno indirizzate a:

- Sviluppare sistemi innovativi di produzione di biocombustibili ottimizzando:
  - i processi di digestione anaerobica alimentati con mix di biomasse a maggior contenuto lignocellulosico e da colture algali, anche per incrementarne la produzione in idrogeno e metano;
  - i processi di produzione di microalghe con il trattamento ed il condizionamento della frazione liquida del digestato;
  - le prestazioni e l'affidabilità dei sistemi di gassificazione delle biomasse per la produzione di syngas da impiegare in sistemi cogenerativi ad alta efficienza e limitato impatto ambientale.
- Sviluppare sistemi e metodologie efficaci per l'abbattimento dei contaminanti e l'upgrading dei biocombustibili, mettendo a punto tecnologie innovative per:
  - il clean-up del biogas ed il suo arricchimento in metano fino a livelli tali da consentirne l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale, escludendo quelle tecniche che richiedono l'impiego di sistemi a temperature superiori a 150 °C;
  - lo sviluppo del processo di purificazione e di metanazione del syngas prodotto da un impianto di gassificazione;
  - la rimozione degli inquinanti organici dalle emissioni gassose della combustione delle biomasse solide.
- Sviluppare nuovi sistemi di produzione di energia, mediante:
  - lo studio di caldaie a sali fusi ad alta temperatura (> 450 °C) alimentate con biomassa lignocellulosica per impianti di produzione di energia elettrica e co/trigenerazione di piccola-media

taglia basati su cicli termici operanti con vapor d'acqua o con nuovi fluidi organici operanti ad un livello termico superiore a quelli attualmente in uso.

### **Descrizione dell'attività a termine**

Si riporta di seguito un elenco dettagliato delle attività di ricerca previste per il triennio 2012-2014, articolate su tre diverse linee in accordo con quanto specificato al punto precedente:

#### Sviluppo dei sistemi di produzione dei biocombustibili:

- Potenziamento della piattaforma WEB A.I.D.A. già realizzata, con l'aggiornamento dei database e del sistema di consultazione.
- Sperimentazione sull'impianto pilota DMM6000 realizzato nell'ambito del precedente Piano Triennale, di processi di digestione anaerobica innovativi, già sviluppati a livello di laboratorio nelle precedenti annualità, di differenti matrici organiche anche contenenti materiale lignocellulosico o algale, con studio di pretrattamenti chimico fisici e/o biologici che favoriscano la successiva fase di degradazione microbica.
- Studio e sperimentazione di processi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di DA, al fine di ridurre il contenuto in nutrienti degli effluenti liquidi e massimizzare la produzione di biomassa algale da riciclare nei reattori di DA, anche mediante la valorizzazione delle correnti di CO<sub>2</sub> provenienti dalla combustione del biogas e/o dal suo upgrading a biometano.
- Progettazione, realizzazione e sperimentazione di un impianto pilota di gassificazione con acqua supercritica (SCW) di biomassa ad elevato contenuto idrico non o difficilmente utilizzabile in processi di DA, con validazione dei dati di processo.

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

- Scale-up dei processi di abbattimento o di inibizione per via chimica/biologica della formazione dei solfuri, con sperimentazione sull'impianto pilota DMM6000.
- Sviluppo di processi per la pulizia e l'arricchimento del syngas, con sperimentazione di dispositivi per l'adsorbimento della CO<sub>2</sub> e per la conversione catalitica su supporti ceramici mediante processo di Water Gas Shift (WGS), che saranno testati anche con l'impianto pilota di gassificazione a letto fluido ricircolante di piccola taglia, al fine di incrementare i livelli qualitativi del syngas e migliorare il successivo stadio di metanazione.
- Sperimentazione con l'impianto BIOSNG alimentato a syngas simulato di composizione pari a quello proveniente dall'impianto di gassificazione a letto fluido finalizzato allo sviluppo di un processo per la produzione di biometano per l'immissione in rete.
- Studio di sistemi di separazione della CO<sub>2</sub> per l'upgrading del biogas a biometano con soluzioni amminiche in fase organica o con la formazione di idrati di CO<sub>2</sub>, con validazione dei dati di processo e analisi comparativa delle performance energetiche ed ambientali.
- Sviluppo, realizzazione e sperimentazione su impianto pilota di dispositivi per la rimozione di inquinanti da emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida, mediante sistemi di filtrazione ceramici attivati.

#### Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica:

- Sviluppo di caldaie a sali fusi ad alta temperatura (> 450 °C) alimentate con biomassa lignocellulosica per impianti di produzione di energia elettrica e co/trigenerazione di piccola-media taglia (200-1.000 kWe).
- Definizione e studio di fluidi organici o loro miscele in grado di operare a temperature massime superiori a quelle attualmente in uso, con analisi e valutazioni comparative di cicli termodinamici operanti con vapore d'acqua o con fluidi organici.

Una quarta linea di attività, a carattere orizzontale rispetto alle precedenti, riguarda le azioni di supporto ai Ministeri e le collaborazioni internazionali, descritte con maggiore dettaglio in un successivo paragrafo del presente documento.

## ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

### *Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili*

- ✓ Piattaforma sperimentale integrata per la produzione di biomassa microalgale e la dimostrazione di processi avanzati di digestione anaerobica su impianto pilota
- ✓ Impianto pilota di gassificazione di biomasse ad elevato contenuto idrico con acqua in condizioni supercritiche (SWG)
- ✓ Portale WEB per la valutazione di prefattibilità di sistemi per la produzione di elettricità da biomasse mediante DA o gassificazione

### *Sistemi di abbattimento dei contaminanti e upgrading di biocombustibili*

- ✓ Apparato sperimentale, accoppiato con un gassificatore a letto fluido, per la produzione di bio-SNG mediante l'impiego di dispositivi catalitici per la purificazione del syngas e la successiva reazione di biometanazione
- ✓ Realizzazione di dispositivi sperimentali per la dimostrazione di processi di upgrading del biogas a biometano (con ammine in fase organica e/o formazione di idrati), alimentati con biogas prodotto dall'impianto pilota di DA

### *Sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi*

- ✓ Prototipo di caldaia a biomassa con fluido termovettore costituito da sali fusi ad elevata temperatura

## ***Coordinamento con attività di CNR e RSE***

Nell'ambito del Progetto B.1.1 "Energia elettrica da biomasse: sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica e l'upgrading dei biocombustibili" esistono attività condotte sia presso il CNR che presso RSE.

Per quel che riguarda le attività svolte dal CNR, queste hanno riguardato in particolare l'utilizzazione di biocombustibili ottenuti da residui o scarti agricoli di scarso valore intrinseco e da colture algali per l'applicazione in impianti di cogenerazione basati su microturbine, concentrandosi sugli aspetti legati alle prestazioni ed emissioni di microturbine a gas alimentate con biocombustibili liquidi (etanolo, metanolo ecc.) e/o gassosi (syngas), lo sviluppo di un ciclo integrato di produzione e combustione mild di biocombustibili, lo sviluppo di catalizzatori e di combustione catalitica di biocombustibili e lo screening esplorativo di biocombustibili di terza generazione da biomassa algale.

Per tutte queste attività non esistono sovrapposizioni con quanto realizzato e/o in programma da parte di ENEA, mentre qualche punto di contatto - con l'opportunità di dar luogo a possibili sinergie - si potrebbe riscontrare con una nuova linea di ricerca recentemente avviata, relativa allo studio di un ciclo Sabatier modificato per la generazione di syngas ottimizzato per combustione in MGT, che presenta analogie con le attività previste presso il C.R. Trisaia sulla produzione di biometano per conversione catalitica del syngas.

Saranno stabiliti contatti diretti fra i responsabili scientifici ENEA e CNR delle suddette attività in modo da garantire uno scambio efficace di informazioni. Le attività condotte da RSE nel campo della bioenergia sono sostanzialmente finalizzate all'analisi tecnico-economica dei sistemi relativi alla catena "Waste to Energy" e allo sviluppo delle relative tecnologie.

Per quel che riguarda le tecnologie per la produzione di energia elettrica dalla combustione di rifiuti e combustibili solidi secondari e dalla loro co-combustione con carbone, rivolta in particolare al monitoraggio e controllo della corrosione dei materiali utilizzati negli impianti, non si evidenziano punti di contatto, mentre saranno approfondite le possibili collaborazioni sul tema del biogas.

Infatti, ENEA ed RSE lavorano entrambi sulla digestione anaerobica dei rifiuti fermentescibili, anche se l'attenzione di RSE è rivolta essenzialmente alla frazione organica dei rifiuti urbani, mentre quella di ENEA si concentra sugli scarti e residui delle attività agricole, zootecniche ed agroindustriali, eventualmente

integrati da biomassa proveniente da coltivazioni dedicate (topinambur) e/o, in prospettiva, colture di microalghe, per cui le attività sono sicuramente complementari e non sovrapposte.

Un'attività dove esistono sicuramente punti di contatto e opportunità di collaborazione fra ENEA e RSE riguarda la rimozione della CO<sub>2</sub> dal biogas (upgrading) con l'intento di ottenere biometano per la generazione di energia elettrica con co-generatori commerciali a metano o da immettere, una volta soddisfatti gli standard qualitativi richiesti, nella rete di distribuzione del gas naturale.

Sia da parte di ENEA che di RSE sono state condotte e sono in programma attività di ricerca sulla separazione della CO<sub>2</sub> dal metano con tecnologie di membrana, ma, mentre in ENEA si lavora sulle membrane polimeriche, RSE è interessato a valutare le prestazioni di membrane metalliche. Inoltre, in ENEA è previsto per il prossimo triennio dell'AdP l'avvio di una nuova linea di ricerca sulla rimozione selettiva della CO<sub>2</sub> per lavaggio del biogas con ammine in fase organica, mentre presso RSE vengono condotte ricerche per la cattura della CO<sub>2</sub> presente nei fumi di combustione con ammine supportate su sorbenti solidi (ossidi metallici porosi granulari), che saranno ulteriormente sviluppate nel corso delle prossime annualità anche ai fini del trattamento del biogas per la produzione di biometano, che comporta la rimozione della CO<sub>2</sub> presente nel mezzo gassoso in concentrazioni molto più elevate rispetto ai fumi di combustione.

Saranno organizzati specifici incontri fra i ricercatori e gli esperti ENEA e RSE impegnati nelle suddette attività allo scopo di scambiare informazioni, procedere ad un confronto delle diverse tecnologie di upgrading del biogas oggetto di studio e sperimentazione.

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

La valorizzazione energetica di biomasse, rifiuti e scarti di diversa origine può dare un contributo importante sia alla soluzione di problematiche ambientali che ad una maggiore sostenibilità del sistema energetico nazionale (diversificazione delle fonti, con maggiore utilizzo di rinnovabili, e riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>), oltre a rappresentare una concreta opportunità di sviluppo economico e ampliamento dell'offerta di "prodotti" per il sistema agricolo ed agroindustriale nazionale.

I processi e le tecnologie che saranno sviluppati e messi a punto nell'ambito del Piano Triennale 2012-2014 riguarderanno i sistemi di piccola e media taglia per la generazione distribuita di elettricità con la maggiore possibilità di valorizzare il calore disponibile sia per il riscaldamento degli ambienti e altri usi termici, che per la produzione di freddo.

Le attività previste hanno la finalità generale di promuovere lo sviluppo di conoscenze, tecnologie e sistemi che consentano di cogliere al meglio tali opportunità, sia attraverso lo sviluppo di sistemi di conversione per la produzione di biocombustibili liquidi di sintesi (BTL) in impianti di taglia elevata e il loro successivo impiego per la generazione distribuita di energia in motori di piccola e piccolissima scala (qualche chilowatt) o per la produzione di biometano adatto ad essere immesso nella rete nazionale di distribuzione del gas naturale.

## ***PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ***

### ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

Si riportano di seguito le attività che si prevedono di svolgere nell'ambito del Piano Annuale di Realizzazione 2012 dell'AdP, articolate su tre diverse linee di ricerca e una linea specifica per le attività di supporto ai Ministeri e collaborazioni internazionali.

#### **a. Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili**

**a.1** Sviluppo, verifica e potenziamento di funzionalità degli strumenti software disponibili e/o di nuova realizzazione per l'aggiornamento della piattaforma WEB A.I.D.A.

- a.2 Sperimentazione sull'impianto pilota DMM6000® realizzato nell'ambito del precedente Piano Triennale, di processi di codigestione anaerobica di differenti miscele di matrici organiche, incluse alcune tipologie di rifiuti e biomasse prodotte da colture dedicate, al fine di valutare la velocità e l'efficienza di trasformazione dei diversi substrati.
- a.3 Sviluppo e sperimentazione su reattori da laboratorio di processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano e/o miscele di metano e idrogeno mediante l'ottimizzazione delle condizioni di reazione sia della fase idrolitica/acidogenesi che della metanogenesi e/o produzione di idrogeno.
- a.4 Prove sperimentali di pretrattamenti chimico-fisici o biologici di substrati con elevato contenuto di lignocellulosico o con biomasse algali, con valutazione dell'effetto di tali pretrattamenti sulla successiva fase di degradazione microbica per la produzione di biogas.
- a.5 Studio e valutazioni comparative di sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di DA, al fine di ridurre il contenuto in nutrienti degli effluenti liquidi e massimizzare la produzione di biomassa algale da riciclare nei reattori di DA, anche mediante la valorizzazione delle correnti di CO<sub>2</sub> provenienti dalla combustione del biogas e/o dal suo upgrading a biometano.
- a.6 Prove sperimentali di gassificazione in condizioni supercritiche di biomasse ad elevato tenore di umidità con un dispositivo sperimentale in scala laboratorio (SCW) realizzato e opportunamente modificato per poter operare a temperature superiori ai 500 °C.

Risultati/deliverable:

- Rapporto tecnico sul software sviluppato, aggiornato e sottoposto a verifica preliminare di funzionalità.
- Rapporto tecnico sui risultati delle prove sperimentali sull'impianto pilota DMM6000® per l'identificazione delle condizioni operative ottimali di processi di co-digestione di matrici organiche di diversa natura.
- Rapporto tecnico sulla validazione in scala laboratorio di processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano e/o miscele di metano e idrogeno.
- Rapporto tecnico sui risultati delle prove sperimentali per la valutazione dell'effetto di pretrattamenti chimico-fisici e/o biologici sulla produzione di biogas da substrati lignocellulosici.
- Rapporto tecnico sullo stato dell'arte e valutazioni comparative di sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di DA.
- Rapporto tecnico contenente i risultati delle prove sperimentali di differenti matrici sottoposte a gassificazione con acqua supercritica e la comparazione di tali risultati con quelli ricavati dal modello matematico predittivo messo a punto nella precedente annualità.

Principali collaborazioni: Sapienza Università di Roma, Università di Viterbo, Università della Calabria.

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**b. Sviluppo di sistemi di clean-up e di upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale**

- b.1 Ottimizzazione dei parametri di funzionamento del reattore di desolfurazione realizzato nel corso del precedente AdP con il biogas reale prodotto dall'impianto pilota DMM6000®, previo allestimento di una stazione di prova costituita da un sistema di deumidificazione del biogas a valle del digestore e da un set adeguato di sistemi di misura e di analisi.
- b.2 Verifica del processo per l'abbattimento dell'acido solfidrico presente nel biogas mediante la fotosintesi anossigenica con l'esecuzione di prove sperimentali sul prototipo di fotobioreattore realizzato nel corso del precedente AdP.
- b.3 Verifica di sistemi di separazione della CO<sub>2</sub> per l'upgrading del biogas a biometano mediante membrane polimeriche commerciali.
- b.4 Studio e sperimentazione di laboratorio di nuovi sistemi per la rimozione selettiva della CO<sub>2</sub> dal biogas basati sull'impiego di ammine in fase organica e sulla formazione di idrati di CO<sub>2</sub>, con

valutazione del possibile impiego di questi ultimi come fonte di carbonio per colture di micro alghe.

- b.5 Sperimentazione sull'impianto pilota di gassificazione a letto per la separazione della CO<sub>2</sub> dal syngas mediante adsorbimento con sorbenti innovativi.
- b.6 Sperimentazione con l'impianto scala laboratorio di catalizzatori su supporti in materiale ceramico per l'upgrading del syngas via *Water Gas Shift* e ottimizzazione del processo di produzione di biometano a partire da syngas sull'impianto pilota di metanazione BIOSNG.
- b.7 Sviluppo, realizzazione e verifiche di funzionalità dei prototipi da laboratorio di sistemi di filtrazione ceramici attivati con per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) presente nelle emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida, mediante la caratterizzazione dei fumi a monte e a valle del dispositivo di trattamento.

Risultati/deliverable:

- Rapporto tecnico sulle prove sperimentali di clean up del biogas condotte sul reattore prototipo di desolfurazione abbinato all'impianto pilota DMM6000®.
- Rapporto tecnico sui risultati delle prove sperimentali di abbattimento dell'H<sub>2</sub>S presente in miscele simulanti il biogas e nel biogas prodotto dal DMM6000® mediante il processo di fotosintesi anoossigenica ad opera delle colonie microbiche operanti all'interno del fotobioreattore prototipo.
- Rapporto tecnico contenente i risultati delle prove di laboratorio sui processi innovativi di rimozione della CO<sub>2</sub> dal biogas mediante l'impiego di ammine in fase organica.
- Rapporti tecnici contenente i risultati delle prove di laboratorio sui processi innovativi di rimozione della CO<sub>2</sub> dal biogas mediante la formazione di idrati di anidride carbonica.
- Rapporti tecnici inerenti i risultati sperimentali ottenuti dall'upgrading del syngas attraverso reazione di WGS mediante l'utilizzo dell'impianto BIOSNG.
- Rapporto tecnico inerente le prove di metanazione del syngas, con valutazione delle condizioni di processo ottimali, mediante l'utilizzo dell'impianto BIOSNG.
- Rapporto tecnico sulle prestazioni e la durata dei prototipi in scala laboratorio di dispositivi ceramici attivati per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) presente nelle emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida a seguito delle prove effettuate sulla linea sperimentale.

Principali collaborazioni: Università di Salerno, FN, Sapienza Università di Roma, Università di Bologna, Università di Firenze, Università dell'Aquila.

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi**

- c.1 Studio e caratterizzazione termo-fluidodinamica di miscele di sali fusi in funzione del loro utilizzo in caldaie alimentate con biomassa lignocellulosica da associare ad impianti a fluidi secondari organici o acqua per la produzione di energia elettrica e co/trigenerazione di piccola-media taglia.
- c.2 Definizione e studio di fluidi organici o loro miscele in grado di operare a temperature massime superiori a quelle attualmente in uso, per impieghi in ORC, valutazione dei cicli termodinamici più performanti ai fini energetici, con scelta e analisi di una turbina azionata dalle soluzioni di fluido organico individuate, finalizzata alla definizione delle principali caratteristiche tecniche e delle performance energetiche.

Risultati/deliverable:

- Rapporto tecnico sui risultati dello studio e caratterizzazione sperimentale di miscele di sali fusi utilizzabili come fluidi termovettori in caldaie a biomasse e definizione dei parametri progettuali per la realizzazione di caldaie a sali fusi.
- Rapporto tecnico sui risultati dello studio di fluidi organici operanti ad alta temperatura (> 400 °C) e sull'analisi di una turbina operante con i fluidi organici scelti.

- Rapporto tecnico sulle potenzialità dei cicli a fluido organico per la conversione dell'energia termica dei sali fusi.

*Principali collaborazioni:* Politecnico di Milano, Università di Roma Tre.

*Durata:* ottobre 2012 - settembre 2013

#### **d. Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali**

- d.1 Azioni di supporto tecnico-scientifico ai Ministeri, sia per la definizione di un quadro nazionale di riferimento nel settore che per la partecipazione alle collaborazioni internazionali che coinvolgono i Ministeri stessi.
- d.2 Prosecuzione delle attività connesse con la presenza dell'Agenzia sulle tematiche del presente progetto nella European Energy Research Alliance (EERA) e nell'Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) sulla Bioenergia.

*Risultati/deliverable:*

- Partecipazione a riunioni e gruppi di lavoro nell'ambito EERA. Partecipazione alle attività dell'IEA Bioenergy Implementing Agreement, con scambio di informazioni sui programmi internazionali nel settore e studi e analisi su temi di comune interesse

*Durata:* ottobre 2012 - settembre 2013

#### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

I risultati delle attività svolte nell'ambito del progetto B.1.1 "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili" saranno diffusi a diverse tipologie di utilizzatori ed in vari modi:

- alla comunità scientifica tramite pubblicazioni su riviste scientifiche e partecipazioni a convegni nazionali ed internazionali ;
- ai Ministeri competenti e all'industria nazionale tramite i documenti ufficiali prodotti e diffusi tramite il sito web ENEA;
- alle pubbliche amministrazioni e gli industriali del settore tramite comunicazioni dirette a sensibilizzarli sulla tematica e a promuovere l'uso dell'Atlante delle biomasse e dei supporti elettronici sviluppati per l'analisi dei sistemi di generazione/cogenerazione che, utilizzando i dati dell'Atlante, potranno essere utilizzati per la messa a punto di un portale informatizzato che consentirà ai potenziali utenti di individuare le soluzioni più convenienti da utilizzare per la valorizzazione energetica delle biomasse e dei rifiuti disponibili in uno specifico contesto territoriale.

**PROGETTO B.1.1 "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili"**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Sviluppo di sistemi per la produzione dei biocombustibili	5291	291	52	30	0	12	115	500
b	Sviluppo di sistemi di clean-up e di upgrading di biocombustibili	9473	521	141	44	20	21	365	1112
c	Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi	2509	138	3	10	0	4	120	275
d	Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali	1236	68	0	35	0	10	0	113
<b>TOTALE</b>		<b>18509</b>	<b>1018</b>	<b>196</b>	<b>119</b>	<b>20</b>	<b>47</b>	<b>600</b>	<b>2000</b>

\* in base al documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili", deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie (per 400 k€) e con FN spa (per 200 k€)



In linea con le prescrizioni del Piano Triennale 2012-2014, si intende proseguire lo sviluppo della ricerca sulla produzione di energia elettrica da fonte solare, affiancando alle precedenti attività sulle celle fotovoltaiche innovative alcune mirate azioni di ricerca sulla tecnologia del solare termodinamico.

Pertanto, il progetto è stato articolato in due differenti e distinte linee progettuali.

## **LINEA PROGETTUALE 1: RICERCA SU CELLE FOTOVOLTAICHE INNOVATIVE**

### **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

#### **Descrizione del prodotto dell'attività**

L'attività di ricerca che si propone, punta ad innovare alcune delle attuali tecnologie fotovoltaiche per ottenere dei prodotti che abbiano caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi. Negli ultimi anni i prezzi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie soprattutto all'incremento della produzione, con la creazione di grandi unità produttive in Asia che ha determinato una diminuzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia l'abbassamento di tali costi a valori inferiori a 0,5 €/Wp potrà favorire l'affermarsi di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti adottati.

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

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

Sempre nell'ottica di utilizzare piccole quantità di materiale semiconduttore e processi a bassa temperatura, appare interessante indagare la possibilità di studiare dispositivi a eterogiunzione (a-Si/c-Si) che utilizzino wafer sottili di silicio cristallino. Anche in questo caso l'architettura del dispositivo è determinante per ottenere un buon assorbimento della radiazione solare.

L'attività sui film sottili policristallini di  $Cu_2-II-IV-VI_4$  parte dall'idea di valutare la possibilità di sostituire l'indio nel  $CuInSe_2$  (CIS) con coppie di elementi II-IV della tavola periodica, conservando alti valori di efficienza del dispositivo. Questo favorirebbe un'espansione di massa di tale tecnologia per il fotovoltaico a film sottile, risolvendo i potenziali problemi dovuti alla scarsità dell'indio. Nei prossimi anni, infatti, i moduli basati sul leghe CIGC (Copper Indium-Gallium Selenide) raggiungeranno costi nettamente inferiori ad 1 \$/W ed efficienza >14%, ma l'intera produzione mondiale potrebbe dare un massimo di 10 GW/anno di moduli FV in CIGS. Da ciò si può comprendere l'importanza degli studi volti alla eliminazione dell'indio. L'argomento proposto presenta però anche altre possibilità visto che la famiglia dei composti  $Cu_2-II-IV-VI_4$  è ancora poco studiata e presenta un intervallo di variabilità delle gap molto ampio. E' quindi anche possibile, in linea di principio, utilizzare questi materiali per la fabbricazione di celle a multigiunzione a basso costo. Il problema fondamentale da superare per raggiungere questo obiettivo è quello di individuare materiali

adatti per la realizzazione della giunzione tunnel necessaria a connettere le diverse celle. Si tratta quindi di una ricerca ad alto rischio ma che presenta grandi vantaggi ed alto tasso di innovazione.

Lo sviluppo di celle organiche è auspicabile per ottenere dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori. Al momento l'ingresso nel mercato della tecnologia FV organica è legato ad applicazioni di nicchia quali caricabatterie, alimentatori portatili per applicazioni militari, etc.. Per dimostrare, invece, il potenziale di tale tecnologia per la produzione di energia in applicazioni di potenza è necessario ottenere celle solari con adeguate efficienze di conversione stabili nel tempo. Le attività proposte su tale tema punteranno a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi, utilizzando nuovi materiali polimerici che assorbano la radiazione solare in modo più efficiente e modificando l'architettura di cella per ottenere un efficiente trasferimento di carica tra i materiali costituenti lo strato attivo.

### ***Situazione attuale del prodotto dell'attività***

La capacità produttiva di moduli fotovoltaici ha mostrato negli ultimi anni un notevole incremento. Tuttavia bisogna registrare che dopo anni in cui la quota di produzione di moduli a film sottile aveva guadagnato punti percentuali rispetto alla produzione dei classici moduli in silicio cristallino, nell'ultimo anno si è registrato un'inversione di tendenza. Infatti, mentre nel 2009 i moduli a film sottile costituivano il 20% della capacità produttiva totale, nel 2011 tale percentuale si è ridotta al 13%.

La causa di ciò è da ricercarsi nella pesante espansione dell'industria FV cinese dove c'è stata la disponibilità di capitali a basso costo e dove gli investitori hanno preferito puntare su una tecnologia matura, quella del c-Si, in modo da favorire la rapida creazione di industrie con alte capacità produttive. Questo ha in qualche modo condizionato l'intero assetto mondiale dell'industria FV, colpendo le aziende di media dimensione che avevano puntato su prodotti innovativi.

Nel futuro, sebbene sia difficile prevedere lo scenario, ci si aspetta che la necessità di differenziare l'offerta di tecnologia FV e le potenzialità di riduzione di costo del FV a film sottile (a valori inferiori a 0,5 €/Wp) contribuiranno ad una maggiore diffusione di questa tecnologia. Nella fabbricazione di moduli a film sottili vengono impiegati substrati a basso costo (vetro, metallo, plastica) insieme a piccolissimi spessori (qualche  $\mu\text{m}$ ) di materiale semiconduttore e processi a temperatura relativamente bassa. I moduli, di dimensioni fino ad oltre 5 m<sup>2</sup>, sono ottenuti direttamente al termine di un processo in linea e non tramite processamento di wafer ad alta temperatura e successivo assemblaggio, come accade invece nel caso del silicio mono e multi-cristallino. Inoltre i moduli a film sottile sono facilmente integrabili in edilizia con risultati ottimi dal punto di vista estetico. Infine essi mostrano buone prestazioni ad alte temperature ambientali e una ridotta sensibilità al surriscaldamento. La combinazione di potenziale riduzione di costi e possibilità di penetrazione in un mercato altamente remunerativo, come quello dell'integrazione architettonica, rendono le tecnologie a film sottile particolarmente interessanti per le prospettive di mercato.

Le tecnologie fotovoltaiche basate su materiali organici stanno ricevendo un notevole sviluppo negli ultimi anni grazie ai miglioramenti delle efficienze ottenuti nell'ambito di intensi programmi di ricerca nel settore avviati da diverse aziende. L'obiettivo per tali aziende è quello di giungere a commercializzare moduli fotovoltaici polimerici e prodotti basati su di essi mirando ad alte capacità produttive.

La tecnologia dei film sottili presenta, in generale, delle efficienze di conversione non ancora paragonabili a quella dei moduli classici in c-Si. La conseguente necessità di migliorare le prestazioni dei moduli a film sottile ha favorito il sorgere di iniziative di ricerca e sviluppo nei maggiori paesi industrializzati. Ciò ha già determinato grandi progressi in termini scientifici, con positive ripercussioni nel settore produttivo, ma la piena maturazione della tecnologia richiede sforzi ulteriori. In Italia, l'incentivazione in conto energia ha stimolato l'interesse di molteplici operatori e tutta una serie di nuove iniziative imprenditoriali nel settore fotovoltaico sono state annunciate e hanno raggiunto diversi livelli di avanzamento. Nel campo dei film sottili sono state create due importanti realtà produttive in Sicilia (3SUN e Moncada Solar Energy) per le quali però non è stata prevista un'attività di ricerca e sviluppo, necessaria per innovare il prodotto. Da qui l'esigenza di dare una forte spinta alla ricerca in questo settore in modo da aumentare le conoscenze a disposizione della comunità scientifica e imprenditoriale.

L'ENEA può vantare un'esperienza unica in Italia nella ricerca su materiali e dispositivi fotovoltaici che riguarda un ampio spettro di tecnologie. In particolare da diversi anni vengono condotte ricerche su celle a film sottile inorganico e su celle a eterogiunzione con studi volti al miglioramento delle prestazioni dei dispositivi, nonché all'individuazione di processi interessanti per l'applicazione industriale, mentre, più recentemente, è stata avviata un'attività sulle celle solari organiche.

### **Stato attuale delle tecnologie**

La giunzione tandem "micromorfa", realizzata con una cella anteriore in silicio amorfo e una posteriore in silicio microcristallino, è ritenuta una tra le strutture più promettenti nell'ambito della tecnologia a film sottile di silicio. La struttura micromorfa presenta, infatti, i vantaggi di una multigiunzione in termini di stabilità e di utilizzo dello spettro solare e al contempo una complessità non troppo elevata che la rendono di grande interesse per l'industria. La Oerlikon Solar nel corso del 2010 aveva ottenuto una cella micromorfa su TCO ad elevato *light-trapping* con un'efficienza stabilizzata di 11,9%. Negli ultimi mesi Kaneka ha riportato un'efficienza del 12,3% sempre su giunzione tandem silicio amorfo/silicio microcristallino, mentre il record di efficienza pari a 12,4% è stato ottenuto dalla Unisolar con un dispositivo a tripla giunzione, che evidentemente presenta una struttura più complessa rispetto alla cella a doppia giunzione. Si può, dunque, affermare che, sebbene rilevanti progressi siano stati ottenuti negli ultimi anni, bisogna studiare soluzioni tecnologiche che mirino a migliorare le efficienze delle celle tandem micromorfe (calcoli teorici hanno mostrato la possibilità di raggiungere efficienze massime intorno al 35% per tali dispositivi) e che risultino al contempo economicamente vantaggiose.

Le principali tematiche di ricerca nel settore dei film sottili di silicio riguardano le cosiddette strategie di intrappolamento della radiazione solare, ottenute sviluppando materiali e strutture che consentano di aumentare la quantità di luce assorbita nel dispositivo con conseguente aumento delle correnti fotogenerate, e lo sviluppo di materiali attivi innovativi e processi facilmente scalabili su larga area che mirino in varie direzioni al miglioramento di efficienza e stabilità dei dispositivi. L'obiettivo indicato in contesti internazionali è quello di definire per le celle micromorfe una roadmap che valuti le potenzialità per raggiungere efficienze del 15%. Ciò dovrebbe portare a una nuova generazione di moduli micromorfi con efficienze del 12% (rispetto agli attuali 8,5 - 9,5 % in produzione e appena superiori al 10% nelle linee pilota).

Lo strato assorbitore in silicio cristallino a film sottile (cSiTF) di un dispositivo fotovoltaico è attualmente oggetto di studio nell'ottica di una riduzione di materiale di base da utilizzare per contenere i costi di produzione.

Una strada che si sta percorrendo consiste nella crescita epitassiale di strati di cSiTF dell'ordine di 20-50  $\mu\text{m}$  di spessore, partendo da wafer sacrificali di c-Si di basso costo. Recentemente nei laboratori dell'istituto tedesco ISFH è stato realizzato un dispositivo con area di circa 4  $\text{cm}^2$  e con efficienza di conversione pari al 19,1%, utilizzando il silicio poroso per il processo di trasferimento di uno strato di 43  $\mu\text{m}$  di c-Si cresciuto per epitassia. Questa tecnologia soffre di alcune criticità, quale il processo di trasferimento di una cella su di un supporto opportuno, per il quale la probabilità di insuccesso si può tradurre nella rottura del dispositivo stesso; la crescita epitassiale, inoltre, è un processo ad elevata temperatura e quindi non a basso costo.

Una strada alternativa consiste nell'utilizzo di wafer sottili commerciali. Attualmente vi è un notevole sforzo nella ricerca industriale al fine di contenere i costi di produzione di wafer sottili di ottima qualità, dell'ordine di 50 - 100  $\mu\text{m}$  di spessore, ottenuti mediante esfoliazione da un lingotto di c-Si. Sono altresì oggi disponibili wafer sottili commerciali prodotti per assottigliamento di fette di Si utilizzate per l'industria fotovoltaica, con spessori anche minori di 50  $\mu\text{m}$ . In alternativa è possibile reperire wafer a basso costo quasi mono-cristallini, di spessore intorno a 150  $\mu\text{m}$ , prodotti con la tecnologia utilizzata per il silicio multicristallino ma con un processo di lento raffreddamento finale. L'utilizzo di wafer sottili in architetture di dispositivo ad eterogiunzione ha portato recentemente la Panasonic a realizzare nei propri laboratori una cella di spessore pari a 98  $\mu\text{m}$ , area di circa 100  $\text{cm}^2$  e con efficienza del 23%.

La linea di ricerca sui film policristallini  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) si inserisce in uno sforzo internazionale molto forte volto al superamento del problema della scarsa disponibilità di indio contenuto nei moduli in CIGS (Copper

Indium-Gallium Selenide) attualmente in produzione con buoni risultati (efficienza su moduli industriali del 13% ed efficienza su celle di piccola area intorno al 20%). Il CZTS è, infatti, un materiale simile al CIS in cui l'indio è sostituito da una coppia di metalli II-IV. Se i metalli sono zinco e stagno si ottiene il materiale  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  con la struttura cristallografica della Kesterite. L'efficienza massima delle celle in CZTS cresciute per coevaporazione è pari a 8,4%. Esistono anche già dei minimoduli in CZTS prodotti dalla compagnia giapponese Solar Frontier con efficienza del 7,2% su aree di  $15\text{ cm}^2$  con tecnologie industriali (evaporazione + solforizzazione). Usando un materiale con una gap minore ottenuto sostituendo parte dello zolfo con il selenio [ $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$  con  $E_g=1.12\text{ eV}$ ] la IBM è riuscita nel 2012 ad arrivare ad una efficienza del 11,1% ( $V_{oc}=0,46\text{ V}$ ,  $J_{sc}=34,5\text{ mA/cm}^2$ ,  $FF=69,8\%$ ,  $\text{area}=0,45\text{ cm}^2$ ). In quest'ultimo caso la tecnica di deposizione è però ancora poco adatta alla produzione industriale (si usano soluzioni contenenti idrazina).

Le celle fotovoltaiche organiche hanno raggiunto un valore di efficienza certificato del 10% (Mitsubishi Chemical). Attualmente c'è una forte competizione tra un numero ristretto di aziende (di recente apertura) che riesce ad ottenere valori di efficienza intorno al 10% (Polyera, Solarmer, Konarka, Heliatek, Mitsubishi Chemical). Tali valori migliorano il record riportato nemmeno un anno fa che era di poco superiore all'8%. Se si pensa che dieci anni fa ci si attestava su valori di poco superiore all'1%, ci si rende conto dell'enorme sviluppo che tale tecnologia sta avendo. C'è da notare che questi valori record vengono ottenuti utilizzando materiali brevettati dalle aziende stesse (di cui spesso non si conosce nemmeno la formulazione) e non commercializzati: ciò rallenta enormemente lo sviluppo rapido di tale tecnologia da parte di altri "attori" che non possiedono il relativo "know-how". Fino a poco tempo fa, il miglior polimero semiconduttore da utilizzare in celle polimeriche era il P3HT con il quale si ottenevano dispositivi con efficienze del 5%. Attualmente i polimeri semiconduttori riportati in letteratura (alcuni dei quali recentemente commercializzati) che sembrano essere più promettenti per il miglioramento delle prestazioni nei dispositivi fotovoltaici sono copolimeri delle unità benzoditiofene - tienotiofene. Con tali materiali si riescono ad ottenere efficienze superiori al 7%.

I dati riportati in letteratura circa le efficienze di conversione e le stabilità di questi dispositivi e i miglioramenti che si stanno ottenendo negli ultimi anni, rendono questa tecnologia promettente per possibili applicazioni in settori particolari del mercato (elettronica di consumo).

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### **Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali**

Le attività sul fotovoltaico a film sottile di silicio sono state finalizzate al miglioramento delle prestazioni di celle tandem micromorfe. Tali celle hanno una struttura a doppia giunzione di tipo pin/pin con una cella posteriore di silicio microcristallino e una frontale di silicio amorfo. Queste sono depositate su substrati di vetro con la tecnica Very High Frequency - Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (VHF-PECVD), che permette elevate velocità di deposizione con conseguente riduzione dei tempi di lavorazione e quindi dei costi associati. All'avvio della linea di ricerca, utilizzando strati assorbitori di spessore totale pari a circa  $2,5\text{ }\mu\text{m}$ , erano stati ottenuti dispositivi con efficienze di circa l'11%. Le attività hanno riguardato lo studio di materiali assorbitori e drogati alternativi a quelli generalmente utilizzati. Inoltre è stato avviato lo sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno della cella. Sono stati sviluppati film di ossido di silicio di tipo n, da impiegare come materiali drogati alternativi per i dispositivi. Questi strati sono stati adottati con successo sia nelle singole giunzioni p-i-n amorfe che nelle giunzioni tandem micromorfe. In particolare per le celle tandem è stato dimostrato che i nuovi materiali 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. Addirittura è stato evidenziato che accoppiando lo strato n innovativo con un semplice contatto d'argento si ottiene una migliore corrente dalla cella bottom rispetto a quella che si ottiene con il classico contatto ZnO/Ag. Utilizzando quindi lo strato n innovativo, 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  $1,7\text{ }\mu\text{m}$ .

Sono state anche fabbricate celle tandem di spessore totale inferiore al micron, il che significa dimezzare i tempi di fabbricazione del dispositivo, ottenendo dei valori di efficienza iniziale superiori al 9%.

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 sugli strati trasparenti e conduttivi (TCO) 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%.

I TCO con morfologia a semplice testurizzazione piramidale, tradizionalmente utilizzati, hanno uno *scattering* della luce elevato solo alle basse lunghezze d'onda ma quasi nullo nella regione rossa dello spettro, regione dove assorbe la cella microcristallina. Per superare questo aspetto nella precedente annualità sono stati sviluppati TCO "Full Haze" a base di ZnO prodotto mediante MOCVD e modificati con l'ausilio della tecnica del *wet etching* che consente di modulare e controllare la rugosità superficiale. Questo tipo di substrato, caratterizzato da una doppia testurizzazione, ha mostrato elevate proprietà di scattering in tutto l'intervallo spettrale di interesse nella tecnologia delle celle micromorfe.

Per quanto riguarda lo sviluppo di strati assorbitori alternativi a quelli attuali, sono stati studiati film sottili microcristallini di silicio germanio ( $\mu\text{-SiGe:H}$ ) cresciuti mediante tecnica VHF-PECVD da utilizzare nella cella posteriore in sostituzione del silicio microcristallino. Dalla caratterizzazione ottica ed elettrica dei materiali depositati a vario contenuto di germanio è risultato che i film di silicio germanio microcristallino presentano alte concentrazioni di difetti, con conseguenze negative sulle prestazioni dei dispositivi. Infatti, quando questi materiali sono stati inseriti nelle celle pin come assorbitori, si è osservato un peggioramento delle prestazioni elettriche se confrontate con quelle misurate sui dispositivi in cui lo strato assorbitore è realizzato con il classico silicio microcristallino. Inoltre sono proseguite le attività sullo studio di materiali nanostrutturati da utilizzare come strati assorbitori innovativi nella cella anteriore. In particolare è stata eseguita un'approfondita caratterizzazione ottica di nanocristalli di silicio in matrice di ossido di silicio e sono stati effettuati i primi test di fabbricazione di celle pin.

Per quanto riguarda le principali apparecchiature acquisite nel corso delle precedenti annualità, è stato acquisito e installato un simulatore solare a doppia sorgente che consente di eseguire con maggiore cura le misure I-V sui dispositivi tandem che sono particolarmente sensibili alla distribuzione spettrale. E' stato, inoltre, 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 sulle celle sottili in silicio cristallino (cSiTF) è iniziata con uno studio dell'architettura inizialmente definita, basata sull'utilizzo di film di c-Si cresciuti per epitassia. In particolare ci si è soffermati sulla difficoltà del processo di trasferimento di uno strato sottile di c-Si su substrato opportuno e sul costo che comporta il processo di crescita epitassiale ad elevata temperatura. A valle di tale studio si è deciso di semplificare il processo servendosi di wafer di c-Si commerciali sottili di spessore 50 - 100  $\mu\text{m}$  e puntando su due architetture diverse, entrambe basate su materiale di tipo p: dispositivo con emitter ottenuto per diffusione termica e dispositivo ad eterogiunzione con emitter innovativo in ossido di silicio drogato ottenuto con tecnologia PECVD. Si è quindi realizzato un primo dispositivo ad eterogiunzione, basato su di un wafer quasi mono-cristallino di tipo p e spessore di 180  $\mu\text{m}$  sul quale si è depositato un emitter innovativo in SiOx drogato n con tecnologia PECVD, ottenendo un'efficienza iniziale del 15,8%. L'attività di ricerca sulle celle in cSiTF con emitter a diffusione termica è stata volta principalmente alla messa a punto dei processi di diffusione di drogante e di crescita di ossido di silicio, entrambi realizzati ad alta temperatura (> 850°C) con forno a tubo aperto. Poiché l'attività ha l'obiettivo di utilizzare strati sottili di c-Si è importante prevedere un'adeguata strategia di confinamento ottico della radiazione solare. E' stato, pertanto, condotto uno studio su riflettori di Bragg in silicio poroso, realizzando multistrati con diversi profili di riflettanza.

L'attività sui film sottili policristallini è stata incentrata sulla realizzazione di celle fotovoltaiche basate sul semiconduttore quaternario  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . Sono state allestite tutte le attrezzature sperimentali necessarie

alla sperimentazione. La crescita dei film di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  avviene a partire da 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. È stata valutata la possibilità di sostituire il forno a tubo con un forno RTP, precedentemente utilizzato per altri scopi. Il forno è stato rimesso in funzione, ma il controllo della temperatura si è rivelato abbastanza difficile, viste le proprietà altamente corrosive dei vapori di zolfo. Sono stati comunque realizzati alcuni campioni che però non hanno mostrato alcun miglioramento rispetto a quelli fatti con il forno a tubo standard. È stata poi studiata l'influenza di variazioni fini di composizione del precursore sulle proprietà optoelettroniche dei film e sull'efficienza dei dispositivi finali. Si è evidenziato che la gap del materiale aumenta sensibilmente (da 1,45 a 1,62 eV) all'aumentare del contenuto di Sn nel film. Queste variazioni di gap sono correlate con cambiamenti drastici della concentrazione di difetti dei film ed hanno perciò anche un influsso rilevante sui parametri fotovoltaici dei dispositivi. Il lavoro svolto sui vari step di processo di fabbricazione delle celle ha consentito di ottenere un'efficienza massima di conversione del 2,5%.

Sono state, inoltre, effettuate delle misure di XPS e di GDOES per la determinazione dell'omogeneità di composizione dei film di CZTS lungo tutto lo spessore dei film. Da queste misure appare evidente una tendenza alla segregazione dello Zn sul retro del materiale che probabilmente deriva dai differenti coefficienti di diffusione di Cu, Sn e Zn. L'unica soluzione a questo problema sembra essere la crescita di film in cui i metalli sono già solforizzati fin dall'inizio e per questo motivo è stato effettuato un up-grade del sistema di sputtering confocale per poter passare al co-sputtering da solfuri. Contemporaneamente si è anche acquisito un nuovo sistema di sputtering per la deposizione dei contatti di Mo e ZnO.

Nel corso delle annualità precedenti è stato predisposto un laboratorio per la realizzazione di celle fotovoltaiche polimeriche su piccola scala. Il cuore del laboratorio è costituito da un sistema glove-box con evaporatore termico integrato che consente di condurre tutti gli step di processo in atmosfera controllata e quindi permette di realizzare dispositivi evitando il degrado dei materiali. Inoltre sono state anche acquisite alcune apparecchiature di corredo (forno per annealing, sistema per la produzione di acqua deionizzata) che consentono di condurre le operazioni al contorno nelle condizioni più ottimali possibili. L'attività ha avuto l'obiettivo di migliorare le efficienze di conversione dei dispositivi ottenute utilizzando come polimero semiconduttore il poli-3-esiltiofene (largamente usato in letteratura) in modo da renderli appetibili da un punto di vista industriale.

Per ottenere questo risultato è stato necessario utilizzare altri materiali polimerici attivi che avessero una struttura elettronica più favorevole sia per incrementare la corrente di uscita delle celle (migliore assorbimento della radiazione solare), che per migliorare la tensione di circuito aperto. Pertanto sono state sviluppate celle fotovoltaiche polimeriche aventi come materiale attivo una blend di un copolimero benzoditiofene-tienotiofene e un derivato del fullerene C70. 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. I migliori dispositivi (non incapsulati) hanno raggiunto un'efficienza di conversione del 4,5%, ma si prospettano margini di miglioramento, caratterizzando gli stessi in un ambiente controllato.

Inoltre sono state investigate tecnologie di stampa (*inkjet printing*) per la deposizione dello strato attivo allo scopo di valutare se le caratteristiche di tali materiali sono idonee alla processabilità degli stessi tramite tecniche industrializzabili e che possono operare su larga area e con un'elevata velocità.

### **Obiettivo finale dell'attività**

L'obiettivo finale del programma 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 silicio e utilizzanti wafer sottili di silicio per un'applicazione industriale nel breve-medio termine;
- lo sviluppo di materiali simili al CIS che consentano di superare i problemi legati alla scarsa disponibilità di indio, limite principale della tecnologia FV a film sottile CIGS;
- lo sviluppo di nuovi materiali per celle solari innovative a base di polimeri.



## **Descrizione dell'attività a termine**

Lo sviluppo delle attività nell'arco della durata del programma e per le diverse linee è il seguente:

### Fotovoltaico avanzato a base di film sottili di silicio

- Ottimizzazione dell'assorbimento della radiazione solare mediante l'utilizzo di nuovi materiali e nuove architetture allo scopo di ridurre gli spessori di materiale attivo nelle celle micromorfe a valori inferiori a 1  $\mu\text{m}$ .
- Sviluppo di TCO ad alta efficienza di confinamento ottico su substrati di vetro flat o testurizzati.
- Sviluppo di moduli prototipali con efficienze superiori al 10% realizzati su substrati di vetro con elettrodo frontale a base di ZnO caratterizzati da alta testurizzazione.
- Sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino con efficienza superiore al 18%.

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

- Sviluppo di un processo completo per la realizzazione di un dispositivo fotovoltaico a base del materiale policristallino  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  con efficienza superiore al 6% su piccola area.
- Sviluppo di processi di deposizione da fase liquida di film sottili di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  con le migliori proprietà optoelettroniche per la costruzione di celle fotovoltaiche.
- Studio di materiali alternativi al CdS per la realizzazione del buffer layer e di strati trasparenti e conduttori (TCO) ad alta conducibilità e bassa funzione di lavoro per il contatto frontale.
- Ricerca di materiali adatti per la realizzazione di giunzioni tunnel in celle fotovoltaiche a multigiunzione basate su materiali  $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$ .

### Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici

- Ottimizzazione del processo di realizzazione di dispositivi con polimeri semiconduttori a bassa gap.
- Realizzazione di dispositivi fotovoltaici basati su materiali attivi contenenti polimeri semiconduttori di nuova formulazione.
- Realizzazione di architetture di cella che consentano un trasferimento di carica efficiente tra i materiali costituenti lo strato attivo.

## **Prodotti significativi previsti alla fine del triennio**

- ✓ Celle a film sottile di silicio cristallino con efficienza superiore al 18%
- ✓ Moduli micromorfi prototipali a film sottile di silicio con efficienze superiori al 10% realizzati su substrati di vetro di adeguata rugosità e con spessori degli strati assorbitori dell'ordine di 1  $\mu\text{m}$
- ✓ Processo completo per la realizzazione di un dispositivo fotovoltaico a base del materiale policristallino  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  con efficienza superiore al 6% su piccola area
- ✓ Nuovi materiali adatti per la realizzazione di giunzioni tunnel in celle fotovoltaiche a multigiunzione basate su materiali  $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$
- ✓ Ottimizzazione del processo di realizzazione di dispositivi con polimeri semiconduttori a bassa gap di nuova formulazione con efficienze superiori al 6%.

## **Coordinamento con attività di CNR e RSE**

Le attività nel settore del fotovoltaico innovativo sono condotte in coordinamento con RSE. In particolare ENEA si occupa del fotovoltaico a film sottile inorganico e organico, mentre l'attività RSE è principalmente incentrata sui sistemi a concentrazione.

## ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

Negli ultimi anni è diventata pressante la necessità di accelerare lo sviluppo di tecnologie avanzate per la produzione di energia elettrica cosiddetta pulita al fine di affrontare le sfide mondiali in termini di sicurezza di fornitura dell'energia, cambiamenti climatici e sviluppo sostenibile. Sono state individuate diverse tecnologie il cui sviluppo sarà sostenuto al fine di raggiungere una riduzione dell'emissione di CO<sub>2</sub> pari al 50% rispetto ai valori attuali. La conversione diretta della radiazione solare nelle celle FV è una delle principali tecnologie solari ed è a tale tecnologia che molti guardano per dare un contributo consistente alla produzione di energia elettrica. Tale tecnologia ha dimostrato negli anni un'alta affidabilità (la vita operativa degli impianti supera i 25 anni) con un significativo potenziale di crescita nel lungo termine in quasi tutte le regioni del mondo. Tra le fonti di energia rinnovabile il fotovoltaico è percepito come particolarmente pulita ed è, quindi, particolarmente gradito al pubblico. La semplicità d'uso, la modularità e i ridotti costi di esercizio e manutenzione degli impianti li rende adatti a rispondere alle esigenze di utenze sia isolate che connesse alla rete, sia di singole case che di piccole comunità o distretti industriali, sia dei Paesi industrializzati che di quelli in via di sviluppo. Il fotovoltaico è, inoltre, ideale per realizzare il nuovo modello di generazione distribuita: gli impianti producono energia elettrica vicino all'utenza, modulata sulle sue esigenze, sopperendo ai picchi di domanda e specialmente a quelli legati all'uso dell'aria condizionata durante le giornate estive, riducendo le perdite legate al trasporto e la necessità di aumentare la capacità delle linee di trasmissione.

Il fotovoltaico, dunque, è una tecnologia chiave ma la sua capacità di penetrazione è ancora limitata a causa della necessità di sviluppare prodotti con migliori prestazioni in termini di conversione della radiazione luminosa e a costi contenuti. Inoltre lo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche a film sottile permetterà di realizzare componenti specifici per l'integrazione del fotovoltaico in edilizia permettendo all'utenza la possibilità di installare sistemi di produzione di energia elettrica con buona efficienza, lunga durata e costo competitivo anche in contesti sensibili, con i conseguenti vantaggi economici. Lo scopo delle attività di ricerca e sviluppo previste è quello di mettere a disposizione del sistema Paese tecnologie fotovoltaiche avanzate che possano contribuire a rendere il sistema produttivo nazionale innovativo e competitivo in questo settore.

## ***PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ***

### ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

#### **a. Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per celle solari tandem micromorfe**

Le celle tandem micromorfe sono realizzate utilizzando nella cella top uno strato assorbitore di silicio amorfo (a-Si:H) di spessore di 200-300

nm e nella cella bottom uno strato assorbitore di silicio microcristallino ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) di spessore di 1500-3000 nm. I record di efficienza ottenuti nei laboratori di ricerca sono generalmente riferiti a dispositivi con spessori degli strati assorbitori nei limiti superiori degli intervalli citati. La possibilità di ridurre lo spessore totale degli strati assorbitori della cella avrebbe il duplice vantaggio di migliorare la stabilità del dispositivo, limitando il problema del degrado del silicio amorfo con l'illuminazione, e di ridurre i tempi di fabbricazione delle celle con conseguente calo dei costi di produzione.

La riduzione dello spessore globale della cella può ad esempio essere ottenuto riducendo le perdite associate agli strati di materiale del dispositivo che non contribuiscono al processo di fotogenerazione di coppie di cariche, oppure studiando delle geometrie opportune per il contatto frontale e il contatto posteriore che abbiano lo scopo di ottimizzare l'utilizzo della radiazione solare nel dispositivo (light trapping). Nelle scorse annualità era stato sviluppato uno strato innovativo drogato n a base di ossido di silicio (n-SiOx) caratterizzato da una migliore trasparenza rispetto al classico n di silicio microcristallino e da un indice di rifrazione più basso del n-Si che ne aveva consentito l'applicazione come strato riflettore intermedio e posteriore nelle celle tandem.



Accanto ad un lavoro ulteriore di ottimizzazione di tale strato si procederà alla definizione di nuovi processi per la fabbricazione anche dello strato p. Allo scopo verrà utilizzata la nuova camera di deposizione PECVD allestita nel corso della precedente annualità. In particolare con il nuovo generatore a radio frequenza operante a 40 MHz verranno indagati nuovi regimi di crescita al fine di incrementare la velocità di deposizione e ottenere film caratterizzati da buone proprietà elettriche. Inoltre anche per lo strato di tipo p verrà investigata la possibilità di crescere film a base di ossido di silicio in modo da cercare di ridurre le perdite per assorbimento anche in tale strato. La difficoltà nella messa a punto di tale materiale può essere legata alla più alta criticità nell'ottenere film di tipo microcristallino quando si utilizza il boro per il drogaggio rispetto al caso del drogaggio di tipo n con fosforo.

Sarà ulteriormente indagata la possibilità di progettare e realizzare strati riflettori posteriori con l'obiettivo di definire nuove architetture di dispositivo che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare. Partendo dal lavoro di simulazione svolto nella precedente annualità su strutture costituite da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici in configurazione sia periodica che quasi periodica, saranno realizzati dei dispositivi che consentano di testare il lavoro teorico. Le strutture progettate verranno realizzate mediante l'ausilio del Focused Ion Beam (FIB) che effettua delle nanostrutturazioni su piccole aree in modo da dimostrare la fattibilità e l'efficacia dell'approccio scelto in termini di prestazioni di dispositivo. Per quanto riguarda il contatto frontale saranno fabbricati dispositivi su substrati nanostrutturati mediante maschere metalliche auto-organizzate (Ion Beam Sputtering, IBS).

Infine sarà garantita la partecipazione italiana all'Implementing Agreement "Photovoltaic Power System" dell'International Energy Agency in cui è prevista la definizione di aspetti normativi relativi a sistemi fotovoltaici innovativi. Tale partecipazione contribuisce, quindi, alla finalità di rendere disponibili e pubblici i risultati degli studi condotti nell'ambito del fotovoltaico.

#### Risultati/Deliverable:

- Sviluppo di processi di deposizione con tecnica PECVD ad alta frequenza per la realizzazione di film drogati p di silicio microcristallino e a base di ossido di silicio con conducibilità idonee all'utilizzo nei dispositivi e caratterizzati da alta trasparenza ( $E_{04} > 2$  eV). Valutazione delle prestazioni dei dispositivi realizzati con tali strati drogati innovativi
- Rapporto tecnico sulle potenzialità di miglioramento delle prestazioni dei dispositivi grazie a nanostrutturazione dei substrati
- Rapporto tecnico sulla progettazione di riflettori posteriori innovativi e sul loro potenziale utilizzo nella fabbricazione dei dispositivi

Principali collaborazioni: Università del Sannio, Università di Genova

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **b. Sviluppo di TCO ad alta efficienza di confinamento ottico per celle a film sottile di silicio.**

Il confinamento ottico della radiazione solare all'interno di un dispositivo a film sottile è un elemento cruciale per ottenere alte efficienze di conversione con spessori contenuti di materiale attivo. L'intrappolamento della luce all'interno di una cella solare è ottenuto mediante lo sviluppo di tecniche che si basano sull'utilizzo di un ossido trasparente e conduttivo (TCO) con una superficie di adeguata rugosità. Lo ZnO prodotto per LP-CVD si è rivelato, in qualità di elettrodo frontale, uno dei migliori materiali per l'ottenimento di dispositivi a film sottili ad alta efficienza grazie alle sue caratteristiche di microrugosità superficiale in grado di assicurare il confinamento ottico della luce nel dispositivo. Nelle precedenti annualità sono stati sviluppati TCO "Full Haze" a base di ZnO prodotto mediante LP-CVD. Questo tipo di substrato ha mostrato elevate proprietà di scattering in tutto l'intervallo spettrale di interesse delle celle "micromorfe". Con riferimento a questa attività strategica, ulteriore lavoro di sperimentazione va ancora condotto in termini di ottimizzazione del processo di induzione di crescite macrorugose.

In alternativa al consolidato utilizzo di TCO naturalmente testurizzati, la messa a punto di un processo che operi direttamente sul substrato di vetro con la creazione di una superficie di adeguata rugosità consentirebbe due differenti approcci di elevato valore tecnologico: i) poter utilizzare strati di TCO molto sottili fabbricati con tecniche per larga area e di basso costo quali lo sputtering; ii) poter fabbricare strati di

TCO a doppia testurizzazione tramite tecnica di MOCVD. Relativamente al primo approccio, l'impiego della tecnologia sputtering per la deposizione di TCO su vetro flat non offre la possibilità di realizzare direttamente uno strato testurizzato atto a realizzare dispositivi fotovoltaici a film sottili di silicio con elevate performance. La testurizzazione con adeguata morfologia del substrato di vetro su cui viene depositato il TCO mediante sputtering risulta quindi indispensabile per diffondere la luce incidente e garantirne il massimo assorbimento nel dispositivo.

Verranno sperimentate varie soluzioni per testurizzare i substrati di vetro da utilizzare come base per ottenere elettrodi frontali con opportune proprietà di diffusione della luce. Saranno indagati e sviluppati procedimenti per incidere in modo controllato sia direttamente il vetro sia strati di adattamento realizzati su di esso in materiale inorganico e/o organico, salvaguardando tuttavia la compatibilità del substrato con un impiego alle temperature usate nei processi di deposizione di film sottili di silicio. La deposizione del TCO verrà sperimentata sia mediante sputtering (singola testurizzazione) che mediante CVD (doppia testurizzazione). L'efficacia della testurizzazione dei substrati di vetro verrà testata con la fabbricazione di dispositivi fotovoltaici a film sottili di silicio.

Verranno, inoltre, sviluppate simulazioni ottiche dello scattering sia 2-D che 3-D di superfici testurizzate utilizzando programmi di modellazione e simulazione quali Sentaurus TCAD. Verrà valutata la possibilità di modellare la rugosità superficiale, ottenuta da misure AFM, con il minimo numero di parametri geometrici in modo tale che gli spettri di luce trasmessa e riflessa, sia per la componente diretta della radiazione sia per quella indiretta, elaborati dal programma di calcolo si accordino al meglio con gli spettri sperimentali ottenuti da misure spettrofotometriche.

L'obiettivo finale è valutare l'effetto di differenti geometrie di testurizzazione sulle proprietà di scattering e sulla fotogenerazione di corrente nel dispositivo.

Nella precedente annualità sono stati inoltre sviluppati TCO a basso costo a base di ossido di zinco depositati con metodo sol-gel. Alla luce dei risultati ottenuti (elevatissima trasparenza) si ritiene opportuno proseguire nell'analisi e miglioramento delle proprietà elettriche del materiale, analizzando l'effetto di differenti tipologie di drogante sulle proprietà di trasporto elettrico dell'ossido. Verrà inoltre studiata la possibilità di testurizzazione delle superfici o del substrato.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sullo sviluppo di tecniche per il trattamento superficiale di substrati di vetro per l'ottenimento di TCO ad alta efficienza di scattering della luce. Analisi ottica delle superfici
- Rapporto tecnico sull'utilizzo di modelli ottici per la simulazione dell'effetto di differenti geometrie di testurizzazione sulle proprietà di scattering
- Rapporto tecnico sull'analisi delle proprietà ottiche ed elettriche di TCO prodotti con tecnica sol-gel. Analisi della testurizzazione

Principali collaborazioni: Università Federico II di Napoli

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **c. Sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino**

La linea di attività prevede l'utilizzo di wafer di silicio di spessore compreso fra 50 e 150  $\mu\text{m}$ . Su questo tipo di substrati verranno sviluppate celle solari ad eterogiunzione silicio amorfo/silicio cristallino, al fine di utilizzare processi a bassa temperatura tali da non indurre stress termici sui wafer sottili. Il retro delle celle verrà corredato di un riflettore di Bragg realizzabile con film sottili a diverso indice di rifrazione. Esso sarà in grado di migliorare il confinamento ottico della radiazione infrarossa all'interno della cella stessa. Il contatto elettrico posteriore sarà realizzato mediante tecnica laser. E' dimostrabile che celle fotovoltaiche basate su wafer sottili, aventi riflettore posteriore ed eterogiunzione frontale, possono raggiungere efficienze superiori alle attuali presenti in commercio con consistente riduzione di costi.

Saranno ottimizzate le proprietà dei film di n-SiO<sub>x</sub> ottenuti per PECVD da utilizzare come emitter delle celle a eterogiunzione. L'applicazione di tali film, già utilizzati per le celle tandem micromorfe, è ritenuta vantaggiosa anche in questo caso grazie alla più alta trasparenza e alle migliori proprietà elettriche rispetto

ai film di silicio amorfo drogati n generalmente utilizzati nella fabbricazione di dispositivi a eterogiunzione. Per quanto riguarda il contatto frontale saranno sviluppati strutture innovative di TCO costituite da strati multipli di ZnO/Ag e ZnO/ITO, con l'obiettivo di ottenere resistività dell'ordine di  $10^{-4}$   $\Omega$ cm, funzioni di lavoro ottimali per le celle (circa 4,1 eV) e idonee proprietà ottiche in termini di luce riflessa.

Si lavorerà, inoltre, all'ottimizzazione del riflettore posteriore in configurazione Bragg ottenuto mediante alternanza di strati in SiNx e a-Si:H cresciuti con tecnologia PECVD. Il confinamento ottico della luce all'interno della cella sarà ulteriormente implementato, ottimizzando il texturing del fronte della cella, ottenuto con attacco chimico in KOH, in modo da diffondere opportunamente la radiazione all'interno del dispositivo. Sarà, infine, messo a punto un processo di screen printing a bassa temperatura di sintering e a bassa resistività specifica di contatto sia su ITO che su ZnO.

Risultati/Deliverable:

- Screen printing a bassa temperatura di sintering e a bassa resistività specifica di contatto sia su ITO che su ZnO
- Realizzazione di eterogiunzioni a contatto frontale su wafer di tipo p con efficienze >16% ad emitter innovativo in n-SiOx e con riflettore posteriore

Principali collaborazioni: Sapienza Università di Roma

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

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

L'attività sulle celle a film sottile policristallino a base di rame ed elementi II-IV e VI avrà tra i principali obiettivi quello di ottenere film di CZTS più omogenei e con contenuto di difetti e conducibilità ben controllate. Molte speranze sono riposte nell'utilizzo dei processi di deposizione per co-sputtering che consentono di crescere film in cui i metalli sono uniformemente distribuiti e solforizzati fin dall'inizio. Parallelamente si porterà avanti la valutazione sperimentale delle possibilità connesse all'uso di tecniche di deposizione non utilizzando il vuoto come ad esempio lo spray o lo spin coating di opportune soluzioni o sospensioni (inchiostri). Nel corso della precedente annualità è iniziata una sperimentazione sia di una tecnica che utilizza delle soluzioni acquose di sali metallici e tiourea sia di una che utilizza degli inchiostri realizzati a partire da polveri di CZTS ottenute per ball milling. Entrambe le tecniche hanno però prodotto film con caratteristiche optoelettroniche non ottimali e quindi si è deciso di approfondire meglio le sperimentazioni avviate in modo da definire meglio le caratteristiche delle soluzioni e degli inchiostri. A completamento di tali attività si procederà anche all'acquisto di un apposito apparato di deposizione delle soluzioni e degli inchiostri selezionati.

L'ottimizzazione del materiale non esaurisce però le attività necessarie per ottenere celle di alta efficienza. Si continuerà perciò a lavorare anche sugli altri strati che compongono il dispositivo completo. In particolare si proseguirà lo studio dei materiali alternativi al CdS per la realizzazione del buffer layer e la ricerca di un TCO ad alta conducibilità e bassa work function per il contatto frontale.

Risultati/Deliverable:

- Sviluppo di processi di deposizione del CZTS: confronto critico delle diverse tecnologie; rapporto tecnico
- Realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  con efficienza superiore al 5%; rapporto tecnico

Principali collaborazioni: Università di Trento, Sapienza Università di Roma

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**e. Sviluppo di celle organiche**

L'intensa attività di ricerca nel campo delle celle fotovoltaiche polimeriche ha determinato notevoli miglioramenti nelle prestazioni dei dispositivi (efficienze di circa il 10%). I miglioramenti sono dovuti sia alla sintesi di nuovi materiali attivi (di cui spesso non si conosce la formulazione in quanto coperti da segreto

industriale) che assorbono la radiazione solare in modo più efficiente ed in un intervallo di lunghezze d'onda più ampio sia a modifiche dell'architettura di cella tramite introduzione di strati di interfaccia che massimizzano la raccolta delle cariche. Pertanto l'attività di ricerca verterà su questi due macro filoni e sarà svolta in stretto contatto con alcuni gruppi universitari italiani.

Si prevede di sviluppare dispositivi che utilizzino nuovi polimeri semiconduttori sia disponibili di recente in commercio ma soprattutto di nuova sintesi tramite accordi con gruppi universitari di esperienza nel campo e che già hanno collaborato negli anni precedenti sulla tematica. I polimeri semiconduttori presi in esame saranno copolimeri delle unità benzoditiofene e tienotiofene variamente funzionalizzate al fine di influenzare le caratteristiche chimico-fisiche dei corrispondenti polimeri. Per ciascun materiale, sarà necessario ottimizzare la morfologia dello strato attivo variando le condizioni di processo critiche (solventi, additivi, temperatura) che è risaputo influenzino enormemente le prestazioni finali dei dispositivi. Inoltre è importante anche lo studio della stabilità nelle condizioni operative. Il blend ottenuto utilizzando questi polimeri in miscela con un derivato del fullerene sarà ottimizzato al variare di diverse condizioni di lavorazione (rapporto tra i componenti, solventi di processo, additivi, temperature di annealing) e sarà valutato il trasferimento di carica tra donore ed accettore. Tali materiali saranno poi testati in celle fotovoltaiche per valutare le loro prestazioni. I dispositivi finali saranno caratterizzati e saranno individuati i fattori limitanti al fine di migliorare le prestazioni degli stessi.

Parallelamente l'attività di ricerca sarà indirizzata anche alla sperimentazione di architetture di celle innovative che possano migliorare le prestazioni di materiali convenzionali (e successivamente anche di quelli di recente sintesi). Pertanto si prevede la realizzazione di una matrice ordinata a base di copolimeri a blocchi in cui i diversi blocchi abbiano una selettività specifica per ciascun componente della blend (donore ed accettore) ed una dimensione ottimale per la lunghezza di diffusione dell'eccitone. Tale matrice, caratterizzata da una struttura tridimensionale con un elevato grado di ordine, può consentire un trasferimento di carica efficiente tra polimero e fullerene e quindi migliorare le prestazioni delle celle fotovoltaiche. Al fine di preservare la "semplicità" del processo di realizzazione delle celle organiche, saranno investigati solo materiali che possano strutturarsi opportunamente tramite "self-assembly". Successivamente saranno testate queste matrici ordinate, riempite selettivamente di molecole con caratteristiche di donore ed accettore, all'interno di dispositivi fotovoltaici, e saranno testate le loro prestazioni.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sulle procedure di sintesi di nuovi materiali polimerici e sulla realizzazione di celle fotovoltaiche organiche basati su essi
- Rapporto tecnico sulla realizzazione di strati attivi aventi morfologie con un elevato grado di ordine

Principali collaborazioni: Università di Modena e Reggio Emilia, Università di Napoli

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

Durante lo svolgimento delle attività sarà data massima attenzione agli aspetti legati alla comunicazione aggiornando sul sito web dedicato i principali risultati conseguiti. La diffusione dei risultati sarà anche assicurata attraverso la partecipazione ad eventi (conferenze, convegni, giornate di studio, ecc.) nazionali ed internazionali e la pubblicazione di lavori scientifici su riviste specializzate.

## LINEA PROGETTUALE 2: SOLARE TERMODINAMICO

### IL QUADRO DI RIFERIMENTO

#### Descrizione del prodotto dell'attività

Nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il solare termodinamico può dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile, sia attraverso l'impiego di impianti di diversa taglia nel sistema elettrico nazionale, sia per gli sviluppi previsti per questa tipologia di impianti in aree più favorevoli dal punto di vista della radiazione solare diretta, come il Nord Africa, con trasmissione in Europa dell'energia elettrica prodotta.

Gli impianti *solari termodinamici* o CSP (Concentrated Solar Power) o STE (Solar Thermal Electricity) utilizzano l'energia solare come unica o principale fonte di calore per la produzione di energia elettrica. Tali impianti utilizzano opportuni sistemi ottici (*concentratori*) per raccogliere la radiazione solare diretta e inviarla su un componente (*ricevitore*), dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido, può essere impiegato in un ciclo termico per la produzione di energia elettrica o in vari processi industriali. A seconda della forma dei concentratori, possiamo distinguere tre diversi tipologie di impianti: a disco parabolico, a torre centrale e a collettori parabolici lineari.

Allo stato attuale la tecnologia più diffusa è quella dei collettori parabolici lineari. In questo ambito l'ENEA ha sviluppato una propria originale linea tecnologica ad alta temperatura caratterizzata dall'utilizzo di sali fusi sia come fluido di processo che di accumulo termico. La collaborazione con l'industria nazionale ha permesso di sviluppare una filiera industriale, portando, tra l'altro, alla realizzazione, da parte di ENEL, dell'impianto "Archimede": 5 MW integrato con un ciclo combinato a gas in Sicilia (Priolo).

L'attività di ricerca sul solare termodinamico continua, con l'obiettivo di ridurre i costi e rendere questi impianti sempre più competitivi rispetto alla produzione tradizionale con combustibili fossili, e deve essere finalizzata non solo al miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi, ma anche alla semplificazione impiantistica e delle procedure di gestione e manutenzione. L'attenzione deve essere posta, oltre che ai grossi impianti di produzione di energia elettrica, anche a sistemi di piccola e media taglia per la produzione combinata di energia elettrica e termica, eventualmente integrati con un'altra fonte energetica (gas o biomassa).

L'inserimento del solare termodinamico nel programma della Ricerca di Sistema per il triennio 2012-2014 consentirà di affrontare in tale ambito alcune delle tematiche più promettenti per lo sviluppo della tecnologia. In particolare l'attività di ricerca che si propone sarà finalizzata allo studio di configurazioni impiantistiche alternative a quelle attuali, allo sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia e a migliorare le prestazioni di un componente critico, come il tubo ricevitore.

Nell'ambito degli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, sono presenti due diverse configurazioni impiantistiche in funzione del fluido utilizzato nel campo solare per la raccolta del calore. La prima, quella più diffusa, riguarda impianti che utilizzano un olio diatermico (Therminol VP1), che purtroppo è tossico e pericoloso per l'ambiente e permette una temperatura massima di esercizio di circa 390 °C. La seconda tecnologia, sviluppata dall'ENEA, prevede invece l'utilizzo di una miscela di sali fusi (nitrato di sodio e potassio), alla base dei comuni fertilizzanti per l'agricoltura, non tossica e non dannosa per l'ambiente e che permette di raggiungere temperature operative di circa 550 °C.

L'utilizzo dei sali fusi consente, date le alte temperature di esercizio, non solo un incremento del rendimento di conversione elettrica, ma anche la possibilità di realizzare sistemi di accumulo termico di tipo "diretto", in cui lo stesso fluido è utilizzato sia nel campo solare che nel sistema di accumulo. Il sistema di accumulo è in questo caso realizzato tramite due serbatoi distinti uno ad alta temperatura (550 °C) e uno a bassa temperatura (290 °C). Il sale fuso presenta però tra le sue caratteristiche un aspetto negativo rappresentato dall'alta temperatura di solidificazione (240 °C) e quindi, in ogni condizione operativa dell'impianto, il fluido deve essere mantenuto, con un adeguato margine, ad una temperatura superiore a

questo valore. Il sale deve essere continuamente mantenuto in circolazione e questo comporta l'utilizzo di parte dell'energia termica accumulata per compensare le perdite termiche e la presenza di sistemi ausiliari di riscaldamento. Per risolvere questo problema l'attività di ricerca è orientata allo studio di miscele alternative che consentono il funzionamento a temperature inferiori della miscela binaria (fino a 120-150 °C), riducendo in questo modo le perdite termiche, migliorando la gestione e manutenzione dell'impianto, con una riduzione dei costi. Un'alternativa valida ai fluidi termovettori liquidi è l'utilizzo di fluidi gassosi (CO<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>, aria), che possono semplificare il ciclo termico, migliorare le prestazioni e l'affidabilità del campo solare, e ridurre i costi.

Per quanto riguarda invece il sistema di accumulo termico, si vogliono studiare soluzioni più compatte a calore sensibile e/o latente che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte (es. cementi o materiale ceramico) e/o un materiale a cambiamento di fase (PCM). Tale sistema dovrà ridurre i costi e gli ingombri dell'accumulo termico rendendolo particolarmente adatto negli impianti di piccola/media taglia. Il concetto può essere, inoltre, estrapolabile ad impianti solari di grande taglia e con alte temperature, oltre che al settore convenzionale (recupero di calore industriale, condizionamento solare, etc.).

In funzione della tipologia di fluido e del sistema di accumulo sono possibili diverse configurazioni impiantistiche. La scelta delle configurazioni più promettenti sia dal punto di vista dell'efficienza che della riduzione dei costi verrà effettuata attraverso un'analisi tecnico economica in cui le soluzioni proposte verranno messe a confronto con le tecnologie attualmente presenti sul mercato.

Nel caso di applicazione del solare termodinamico ad impianti di piccola taglia co-generativi (< 1 MWe fino a 10 kWe o meno), la presenza dell'accumulo termico a sali fusi e l'integrazione dell'energia termica con altra fonte (biomasse o altro) permette di avere una produzione continua. In questi impianti si evidenzia in ogni caso la necessità di implementare generatori di corrente elettrica di piccole dimensioni basati sull'esclusivo uso di energia termica da prelevare dal sistema di accumulo, con le seguenti due finalità:

- unità di emergenza per la generazione di energia elettrica di mantenimento per le piccole centrali < 1 MWe da installare in siti isolati dalla rete, al posto dei consueti generatori diesel di emergenza, con potenza fino a 30 kWe;
- piccoli impianti multi-generativi di taglia da 100 a 10 kWt, con produzione di potenza elettrica da 20 a 1 kWe, per gli usi più disparati dove la richiesta prevalente è di energia termica con limitata energia elettrica di supporto.

Per questi generatori, una volta assicurata la continuità dell'accumulo termico con la fonte ibrida, oltre quella solare, non c'è più necessità di costituire scorte di altri carburanti, specialmente in zone isolate, potendo così contare sulle sole risorse del territorio. Per tali generatori inoltre non esiste sostanzialmente la necessità di avere rendimenti di conversione elettrica elevati in quanto comunque la parte di energia primaria non convertita rimane a disposizione per l'uso come energia termica di recupero. In questo modo sarà possibile la loro diffusione anche in paesi a bassa tecnologia, che passa attraverso lo sviluppo di strumenti tecnologici di supporto al sistema che siano semplici, flessibili e di rapida applicazione.

In particolare, si vuole studiare, progettare e sperimentare l'integrazione e l'adattamento di prodotti innovativi per il supporto ad impianti solari a concentrazione multi-generativi in piccola taglia. A tal fine verranno sviluppate tecnologie utili alla produzione di back-up di piccole potenze elettriche e termiche destinate a un utilizzo di emergenza negli stessi impianti principali, che potranno in tal modo essere scollegati dalla rete elettrica nazionale senza pregiudicare però la funzionalità dei loro sistemi di sicurezza, alimentati comunque da tali tecnologie. Tali prodotti innovativi potranno inoltre trovare utilizzo anche in condizioni 'stand-alone' e/o di supporto a tecnologie basate sul solare.

Negli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, il tubo ricevitore è l'elemento fondamentale che svolge la funzione di assorbimento della radiazione solare concentrata e trasferimento del calore al fluido di processo. In particolare esso deve assorbire la maggiore quantità possibile di radiazione solare su di esso concentrata e, allo stesso tempo, deve disperdere verso l'ambiente esterno la minore quantità possibile del calore immagazzinato.

I materiali più adatti a svolgere la funzione di rivestimento superficiale del tubo ricevitore sono quelli che si comportano in maniera otticamente selettiva, le cui proprietà ottiche di riflettanza, assorbanza ed

emissività emisferica si modificano apprezzabilmente con la lunghezza d'onda della radiazione passando dalla zona d'irradianza dello spettro solare alla zona dell'infrarosso termico.

Nell'ottica di una ricerca volta ad ottenere prestazioni sempre più spinte del tubo ricevitore, grandi sforzi vengono condotti per ottenere un miglioramento dei parametri foto-termici del coating solare (incremento dell'assorbanza solare e diminuzione delle perdite termiche per irraggiamento). Passare dai valori attuali di assorbanza solare (95.5 %) e di emissività termica (9% a 400 °C) a valori di eccellenza (97 % e 7 % rispettivamente) costituirebbe, per il tubo ricevitore, un traguardo tecnologico di grande impatto sull'efficienza complessiva del campo solare e sulle prospettive future dell'intera tecnologia solare termodinamica. Uno degli approcci più promettenti per il perseguimento di questo importante risultato è rappresentato dall'impiego di coating solari a base di strati ceramici e metallici ad alta compattezza e densità, ottenibili mediante modifiche significative della tecnica di deposizione del tipo sputtering. Tale approccio verrà seguito nell'ambito del presente progetto.

### *Situazione attuale del prodotto dell'attività*

Nella maggior parte degli attuali impianti solari termodinamici con tecnologia a collettori parabolici lineari, viene utilizzato, come fluido termovettore per l'asportazione del calore solare nel tubo ricevitore, olio diatermico. L'unica eccezione è rappresentata dall'impianto Archimede dove viene utilizzata invece una miscela binaria di sali fusi (nitrato di sodio e potassio), che rappresenta una delle principali innovazioni della tecnologia sviluppata dall'ENEA. I sali fusi consentono, come detto in precedenza, di incrementare la temperatura massima operativa dell'impianto fino a 550 °C rispetto ai 390 °C dell'olio. Rispetto all'utilizzo dell'olio, i sali fusi presentano una caratteristica sfavorevole rappresentata da una elevata temperatura di solidificazione che penalizza alcuni aspetti relativi alla gestione e manutenzione dell'impianto e impone maggiore attenzione nella fase di progettazione. Per mitigare questi aspetti si stanno studiando miscele alternative di sali fusi che presentano temperature di solidificazione notevolmente inferiori. Per risolvere completamente questi problemi è necessario ricorrere a fluidi alternativi come acqua o gas. Gli impianti a concentrazione con fluido gassoso sono interessanti per i potenziali vantaggi che questa tecnologia può dare specialmente dal punto di vista della semplificazione impiantistica e facilità di gestione e controllo.

Negli attuali impianti solari è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico che consente di migliorarne il funzionamento ed aumentarne la capacità operativa. Il mezzo migliore e meno costoso sino ad oggi individuato per accumulare calore sensibile ad alta temperatura è quello di utilizzare i sali fusi. Tale tecnologia è stata adottata anche da ENEA all'interno del Progetto Solare Termodinamico e sviluppata negli ultimi dieci anni. L'accumulo termico a sali fusi ha trovato applicazione nell'impianto dimostrativo "Archimede" realizzato da ENEA presso Priolo Gargallo (SR). In genere tali mezzi di accumulo hanno una capacità termica piuttosto limitata e necessitano di grandi volumi. Le elevate dimensioni dei contenitori necessari ad ospitare i mezzi di accumulo e le elevate superfici di scambio degli stessi incrementano inevitabilmente sia il costo che le perdite del sistema.

I sistemi integrati di generazione elettrica a supporto di impianti solari a concentrazione di piccola taglia dovrebbero sostituire, per quanto riguarda i generatori di emergenza, i gruppi di continuità (UPS) che forniscono alimentazione elettrica quando l'alimentazione di rete viene a mancare. In commercio ne esistono moltissimi tipi basati sull'utilizzo di batterie. L'autonomia delle batterie è relativamente breve, ma sufficiente per avviare una diversa fonte di energia in stand-by (es. gruppo motore diesel) o per spegnere correttamente l'attrezzatura protetta. La possibilità di alimentare i sistemi elettrici di emergenza e di sopravvivenza di un impianto con l'enorme quantità di energia del sistema di accumulo termico, rende questi sistemi particolarmente affidabili e idonei anche a consentire l'installazione stand alone degli impianti solari termodinamici.

Per quanto riguarda invece i piccoli impianti multi-generativi, questi sono associati normalmente a serbatoi di accumulo termico di piccole dimensioni, proporzionati all'effettiva potenza termica richiesta dagli utilizzatori. I dispositivi di produzione della potenza elettrica devono essere molto affidabili e richiedere poca manutenzione. I macchinari ai quali si guarda sono molto innovativi per la tipologia di applicazione scelta:

- gruppo di continuità termoelettrico, che genera direttamente la potenza elettrica;
- motore alternativo a vapore alimentato da un generatore di vapore innovativo immerso nel serbatoio di accumulo;
- motore Stirling con interfaccia calda affacciata ai sali fusi del serbatoio di accumulo termico.

L'uso di questi macchinari nel contesto degli impianti solari a concentrazione è l'elemento di originalità della ricerca, e trova situazioni simili nell'ambito di progetti di ricerca europei.

Per quanto riguarda il rivestimento del tubo ricevitore, la tecnologia attualmente utilizzata per consentire al tubo di assorbire la maggiore quantità possibile di radiazione solare, disperdendone meno possibile verso l'ambiente, è quella del coating a base di strati "cermet" (nano-compositi ceramico-metallici) del tipo "graded" (contenuto metallico a decrescere con lo spessore). La maggior parte dei tubi ricevitori attualmente sul mercato è per impiego a media temperatura, fino a 400 °C, per applicazioni su impianti ad olio. L'utilizzo dell'olio nel tempo determina il danneggiamento dei legami molecolari, con sviluppo di Idrogeno. Il gas diffondendo attraverso lo spessore del tubo d'acciaio, si accumula nella cavità sotto vuoto del tubo ricevitore, aumentando lo scambio termico tra i tubi d'acciaio e di vetro, con conseguente riduzione dell'efficienza di raccolta dell'energia termica. Questo effetto non si presenta nel caso di utilizzo di sali fusi, per i quali l'ENEA ha sviluppato una soluzione originale, in grado di garantire buone prestazioni nelle condizioni di funzionamento ad alta temperatura, fino a 550° C. I suoi brevetti sono attualmente utilizzati (concessione di licenza) per la produzione del tubo ricevitore della società Archimede Solar Energy (gruppo Angelantoni).

### **Stato attuale delle tecnologie**

Nel settore del solare termodinamico nel 2011 sono entrati in esercizio 545 MW di nuovi impianti, portando la potenza elettrica cumulata a circa 1,7 GW. Altri 20 GW sono in costruzione o previsti a breve termine. I paesi guida di questa tecnologia sono gli Stati Uniti e soprattutto la Spagna, che detiene il primato della potenza installata con oltre 1 GW. Vi è un crescente interesse anche di alcuni Paesi del Nord Africa (Algeria, Marocco, Egitto) e soprattutto della Cina che prevede l'installazione di impianti per una potenza elettrica di 1 GW entro il 2015. Per quanto riguarda l'Italia, l'unico in esercizio è l'impianto "Archimede" dell'ENEL da circa 5 MW a Priolo Gargallo (Sicilia), integrato in una centrale a ciclo combinato, che utilizza sali fusi secondo la tecnologia ENEA. Nel corso del 2011 e del 2012 diverse sono state le richieste di autorizzazione per la costruzione di impianti termodinamici di piccola e media taglia, da parte sia di aziende e consorzi nazionali che di operatori europei, ma per nessuna di queste è iniziata la fase realizzativa. Tra questi ricordiamo l'impianto da 30 MW (Archetipe 30+) a sali fusi, proposto da ENEL Green Power con ENEA in Sicilia nell'ambito di un progetto europeo avviato nel 2012. Oltre il 90% degli impianti solari termodinamici in esercizio utilizza la tecnologia a collettori parabolici lineari con olio diatermico come fluido termico.

L'attuale configurazione impiantistica di riferimento prevede impianti da 50 MW con doppio fluido termico: olio nel campo solare e sali fusi nel sistema di accumulo (es. impianti spagnoli tipo ANDASOL). La capacità del sistema di accumulo è in grado di garantire il funzionamento dell'impianto per circa 7,5 h in condizioni nominali anche in assenza di radiazione solare. Il sistema di accumulo è di tipo indiretto ed è presente uno scambiatore di calore olio/sali per il trasferimento del calore dall'olio ai sali. Tale soluzione non consente di sfruttare tutte le potenzialità dei sali in quanto la temperatura massima dell'accumulo, 380 °C, è condizionata dalle caratteristiche dell'olio.

La tecnologia a sali fusi sviluppata da ENEA, oltre a migliorare il rendimento di conversione elettrica, consente di realizzare sistemi diretti di accumulo termico, in cui lo stesso fluido è utilizzato sia nel campo solare che nel sistema di accumulo. La più elevata temperatura (550 °C invece di 380 °C) permette di ottenere una capacità di accumulo sensibilmente più elevata, passando da 70 kWh/m<sup>3</sup> nel caso di utilizzo dell'olio a 190 kWh/m<sup>3</sup> con i sali fusi. E quindi a pari energia termica accumulata in un impianto ad olio la dimensione dell'accumulo aumenta del 175% (il volume dei serbatoi aumenta da circa 5200 m<sup>3</sup> a circa 14400 m<sup>3</sup>).



Per ridurre il costo e le dimensioni del sistema sono state proposte diverse soluzioni, alternative all'accumulo a calore sensibile. Quelle che sembrano essere le più appetibili sono connesse all'uso di materiali solidi a basso costo, come ad esempio cementi speciali, materiali inerti, oppure sfruttando il calore latente (materiali a cambiamento di fase). Le principali problematiche connesse a queste soluzioni, e che sino ad oggi ne hanno ridotto le potenzialità, sono spesso correlate alla ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica). La possibilità dell'uso di materiali a cambiamento di fase, miscelati con una opportuna quantità di nano particelle sembrerebbe, sulla base di alcuni recenti studi, poter incrementare sia la capacità termica del mezzo che la sua diffusività.

Una ulteriore semplificazione con riduzione dei costi degli impianti potrebbe essere realizzata con la sostituzione dei fluidi liquidi con gas. Attività di ricerca industriale, realizzazione di prototipi, sperimentazione, sono in corso nelle più importanti organizzazioni di ricerca internazionali, in Europa e negli Stati Uniti.

Nell'ambito delle applicazioni del solare termodinamico a sistemi co-generativi di piccola e media taglia, l'ENEA ha sviluppato una tecnologia modulare TREBIOS (TRigenerazione con Energie rinnovabili: BIOmasse e Solare termodinamico), con integrazione di biomasse e di altre componenti rinnovabili. Questa filiera si basa sempre sull'utilizzo di una miscela di sali fusi sia come fluido di trasporto del calore prodotto dall'impianto solare a concentrazione, che come fluido di immagazzinamento dell'energia termica, in un unico serbatoio di accumulo. Il cuore del sistema è il serbatoio di accumulo ad alta temperatura dell'energia termica, prodotta dal campo solare e anche, a seconda delle esigenze, da un riscaldatore di back-up alimentato a biomasse. In ogni caso, è l'energia termica immagazzinata ad alta temperatura che viene utilizzata con continuità, anche in assenza di radiazione solare, dai processi principali di produzione cui il sistema è asservito (energia elettrica, termica, produzione di freddo, sistemi di condizionamento, dissalazione, ecc.).

Nella ricerca che si propone, si utilizza il calore del serbatoio di accumulo termico a sali fusi già presente e disponibile nell'impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) sito nell'area Capanna del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, nelle vicinanze di Roma. Tale serbatoio di accumulo e le connesse attrezzature di servizio presentano le caratteristiche sufficienti e necessarie per la sperimentazione proposta. Per le apparecchiature di produzione della potenza elettrica si useranno prodotti commerciali o in fase di sperimentazione con finalità diverse, ma adatti allo scopo.

Per quanto riguarda il tubo ricevitore, è noto che, al fine di ottenere una sempre maggiore efficienza degli impianti solari termodinamici, il materiale di rivestimento deve presentare un comportamento quanto più prossimo a quello ideale cioè: riflettanza nulla (assorbanza unitaria) nella regione spettrale della radiazione solare (0,3-2,0  $\mu\text{m}$ ), e riflettanza unitaria (assorbanza ed emissività nulla) nella regione dell'infrarosso termico (2,0-40  $\mu\text{m}$ ), con un passaggio a gradino tra le due regioni.

Per ottenere un simile comportamento ottico, i materiali di rivestimento presentano generalmente strutture complesse che prevedono più strati sottili opportunamente selezionati di materiali diversi ciascuno con proprietà ottiche differenti. Tali strutture multistrato tipicamente comprendono:

- uno strato metallico con alta riflettività nella regione dell'infrarosso atto ad assicurare un basso valore di emittanza;
- uno strato "Cermet" a profilo variabile, cioè con contenuto metallico decrescente al crescere dello spessore, per assorbire al meglio la radiazione solare incidente sul tubo ricevitore;
- uno strato anti-riflesso per minimizzare le perdite causate dalla riflessione della radiazione solare.

Questa tipologia di materiale di rivestimento a struttura multistrato si è dimostrata efficace in termini di buone prestazioni, cioè alta assorbanza solare accoppiata a bassa emissività. La tecnologia utilizzata è un particolare metodo di deposizione in vuoto dei materiali che va sotto il nome di sputtering. Le tecniche di sputtering sono molteplici dal punto di vista dei target e dei gas utilizzati (processo non reattivo e processo reattivo) sia dal punto di vista dei generatori utilizzati (DC, RF, MF). Tutte queste diverse tecniche di sputtering sono state sperimentate presso il C.R. ENEA di Portici per la messa a punto di film sottili per impiego nel campo dei coating solari.

La soluzione finora sviluppata, e trasferita all'industria, consente buone prestazioni del tubo ricevitore (95,5% di assorbanza solare e 9% di emissività termica a 400 °C). L'aumento di tali prestazioni può avere un impatto significativo sull'efficienza complessiva del campo solare e può essere perseguito mediante l'impiego di coating solari a base di strati ceramici e metallici ad alta compattezza e densità, strati ottenibili mediante modifiche significative della tecnica di deposizione del tipo sputtering.

La tecnica ritenuta più idonea alla realizzazione di tali strati compatti è quella dello sputtering assistito da una cannone ionico ad alta energia (Ion Beam Assisted Deposition, IBAD).

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### **Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali**

Le attività di ricerca sul solare termodinamico vengono avviate con il Piano Triennale 2012-2014, quindi non sono disponibili risultati dei piani triennali precedenti.

### **Obiettivo finale dell'attività**

Nell'ambito del solare termodinamico l'obiettivo finale dell'attività riguarderà:

- lo studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di nuove **configurazioni impiantistiche** alternative a quelle attuali, per individuare quelle più promettenti sia dal punto di vista dell'efficienza e produttività che dei costi di realizzazione e di esercizio. Le soluzioni impiantistiche saranno valutate attraverso analisi tecnico-economiche e attività sperimentali, e metteranno a confronto in particolare l'utilizzo di fluidi termici diversi (miscele binarie/ternarie di sali fusi, fluidi gassosi e acqua) e tipologie diverse di accumulo termico (a calore sensibile o a cambiamento di fase), in funzione della taglia dell'impianto e delle temperature operative;
- lo **sviluppo di sistemi integrati** per applicazioni in impianti solari termodinamici di piccola e media taglia. In particolare verranno sviluppati sistemi innovativi multi-generativi sfruttando l'accoppiamento diretto con il sistema di accumulo termico a sali fusi ad alta temperatura. Questi sistemi possono essere utilizzati anche come emergenza in impianti di grossa taglia;
- lo **sviluppo di nuovi coating solari del tubo ricevitore** caratterizzati da una migliore efficienza di conversione foto-termica (alta assorbanza solare e bassa di emissività termica) con la sostituzione della consolidata tecnologia del coating a base di strati "cermet" (nano-compositi ceramico-metallici) del tipo "graded" (contenuto metallico a decrescere con lo spessore) con la più innovativa tecnologia di filtri ottici del tipo interferenziali a partire da stratificazioni di film sottili ceramici e metallici.

### **Descrizione dell'attività a termine**

Per il raggiungimento dell'obiettivo finale, nell'arco della durata del programma, saranno sviluppate, per le diverse linee, le seguenti attività:

#### Configurazioni impiantistiche alternative

- Analisi tecnico-economica delle attuali configurazioni impiantistiche con tecnologia parabolica lineare. Verrà effettuato il confronto tra le soluzioni con olio e sali fusi. Nell'ambito di questi ultimi, verranno prese in esame oltre alla attuale miscela binaria, miscele alternative caratterizzate da una minore temperatura di solidificazione.
- Valutazione della possibilità di utilizzo di gas come fluido termico nel campo solare:
  - scelta del tipo di gas e delle condizioni operative (pressione e temperatura);
  - individuazione della configurazione ottimale del campo solare e dimensionamento dello stesso;
  - definizione del ciclo termodinamico di conversione dell'energia termica;

- analisi di diverse soluzioni per il sistema di accumulo termico, dimensionamento dello stesso e definizione delle procedure di gestione.

La ricerca stabilirà qual è il fluido gassoso e la configurazione impiantistica più adatta alla produzione di energia elettrica.

- Sviluppo di sistemi di accumulo diversi:
  - studio, sviluppo e caratterizzazione di un mezzo di accumulo a calore sensibile utilizzando una miscela di materiali a cambiamento di fase (PCM) e nano particelle; tale miscela deve poter portare ad un incremento del calore specifico e della conducibilità del mezzo di base (il PCM);
  - studio di sistemi di accumulo a calore sensibile e/o latente che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte (es- cementi o materiale ceramico) e/o un materiale a cambiamento di fase; tale sistema dovrà ridurre i costi e gli ingombri dell'accumulo termico rendendolo particolarmente adatto negli impianti di piccola/media taglia;
  - studio, progettazione e sperimentazione di un elemento base di accumulo verificando il suo comportamento termodinamico e la congruenza dei tempi di carico e scarico con le dinamiche impiantistiche;
  - studio di fattibilità di un accumulo termico per impianti di piccola/media taglia a media temperatura basato sull'utilizzo degli elementi base realizzati in precedenza. Analisi della sua integrazione nell'impianto solare. Stima dei costi del sistema di accumulo.

#### Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia

- Caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo a sali fusi dell'Impianto Sperimentale PCS, al fine di dimensionare e provare i sistemi cogenerativi che verranno sviluppati.
- Progetto di sistemi cogenerativi innovativi, che utilizzano il calore ad alta temperatura disponibile nei serbatoi di accumulo a sali fusi.
- Realizzazione dei sistemi cogenerativi innovativi.  
Sulla base dei progetti dei vari sistemi cogenerativi, verranno fabbricate e realizzate le relative sezioni di prova, con potenze proporzionate al serbatoio di accumulo esistente. Sarà inoltre elaborata la matrice sperimentale delle prove proposte, per la completa caratterizzazione dei sistemi realizzati.
- Esecuzione delle prove sperimentali e caratterizzazione dei sistemi innovativi.  
Utilizzando le sezioni di prova e la matrice sperimentale, verranno effettuate, sull'Impianto PCS, le prove necessarie, volte alla completa caratterizzazione e determinazione dell'efficienza di tutti i sistemi innovativi proposti.  
Tutti i dati sperimentali prodotti e raccolti dai sistemi verranno confrontati tra loro per evidenziare il sistema innovativo più adatto, sia dal punto di vista tecnologico, che di affidabilità di servizio, di semplicità di impiego e manutenzione, di economicità.  
Sarà inoltre elaborata un'accurata analisi tecnico-economica dei risultati ottenuti per valutare la potenzialità di diffusione sul mercato dei sistemi studiati in confronto a prodotti similari.

#### Tubo ricevitore

- Ideazione e progettazione di opportune modifiche da apportare su un preesistente impianto di sputtering per rendere disponibile ed efficace il processo di "Ion Beam Assisted Deposition" (IBAD).
- Acquisizione, installazione e messa a punto della tecnica di sputtering denominata IBAD per la fabbricazione di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità.
- Fabbricazione e caratterizzazione ottica di strati metallici molto sottili prodotti con tecnica IBAD.
- Caratterizzazioni strutturali, ottiche ed elettriche degli strati metallici prodotti. Ottimizzazione dei materiali in termini di compattazione e di indici ottici appropriati. Comparazione tra le proprietà ottico-strutturali degli strati sottili metallici prodotti con tecnica IBAD e quelle degli stessi materiali prodotti con tecnica di sputtering standard.

- Fabbricazione di strati ceramici molto sottili prodotti con tecnica IBAD. Caratterizzazioni dei materiali prodotti ed ottimizzazione delle proprietà di barriera rispetto agli agenti ossidanti.
- Messa a punto di programmi di simulazione ottica per l'elaborazione e l'ottimizzazione di filtri interferenziali del tipo a stratificazione metallo/ossido.
- Ottimizzazione, fabbricazione e caratterizzazione di filtri interferenziali del tipo a stratificazione metallo/ossido prodotti con tecnica IBAD.
- Ideazione e progettazione di opportune modifiche ed implementazioni da apportare su un preesistente impianto di sputtering per rendere disponibile ed efficace il processo del tipo MetaMode per la fabbricazione di ossidi ad alta velocità di crescita.
- Acquisizione, installazione e messa a punto della tecnica di sputtering denominata MetaMode per la fabbricazione di strati sottili di ossidi.
- Fabbricazione e caratterizzazione di strati di ossidi molto sottili prodotti con tecnica MetaMode.

### ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

I principali risultati attesi sono:

- ✓ Sviluppo di coating del tubo ricevitore che rendano lo stesso più efficiente e che sarà possibile trasferire all'industria nazionale, migliorandone la competitività
- ✓ Nuove soluzioni per il fluido termico e il sistema di accumulo, che semplifichino la gestione del sistema e portino ad una sensibile riduzione dei costi
- ✓ Sviluppo di un sistema che utilizzi parte dell'energia disponibile nel sistema di accumulo per fornire energia elettrica e/o termica di backup all'impianto solare

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

Gli impianti solari termodinamici possono dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile attraverso l'ampliamento dell'utilizzo delle fonti rinnovabili e la riduzione dell'uso dei combustibili fossili importati e delle emissioni relative.

La realizzazione di un impianto da 30 MWe (tipo Archetype 30+), nel sud dell'Italia, oltre all'immissione in rete di circa 85 GWhe, consente di ridurre di circa 19000 TEP l'impiego di energia primaria e di evitare l'immissione in atmosfera di circa 58000 t di CO<sub>2</sub>. La capacità di accumulo di questi sistemi contribuisce alla riduzione dei problemi connessi con l'inserimento in rete della produzione da rinnovabili intermittenti.

Lo sviluppo di questa tecnologia comporta inoltre il consolidamento di una capacità produttiva nazionale dei principali componenti solari (quali tubo ricevitore, collettori, pannelli riflettenti) che possono quindi essere in grado di accedere al più ampio mercato europeo e mondiale.

Per quanto riguarda lo sviluppo di sistemi cogenerativi i benefici attesi consistono nelle proposte sul mercato di sistemi innovativi, a costi contenuti, basati principalmente sulla componente solare ma integrati con una componente ibrida (in genere caratteristica del territorio di insediamento, per esempio biomasse), che garantiscono l'assoluta continuità di esercizio anche in situazioni off-grid e con manutenzione ridotta.

Nel caso dei generatori di emergenza le soluzioni proposte influiranno grandemente sulla semplificazione e sulla riduzione dei costi dei servizi di emergenza delle centrali solari CSP, aumentandone al contempo l'affidabilità di esercizio e la capacità di diffusione anche in situazioni stand-alone e off-grid.

## PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ

### Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012

#### a. Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità

Filtri ottici selettivi, a base di stratificazioni di film alternati dielettrici e metallici, funzionano prevalentemente sui fenomeni interferenziali. Nel nostro caso specifico, il comportamento desiderato è quello di un filtro che assorba la quasi totalità della radiazione solare e si comporti da specchio riflettente nell'infrarosso, specificamente mostri un'alta riflettività a partire dalla lunghezza d'onda di circa 1,5  $\mu\text{m}$ . Al fine di ottenere un comportamento del filtro ad alta selettività è necessario che la riflettività del coating salga il più ripidamente possibile all'approssimarsi della lunghezza d'onda di cut-off e raggiunga valori molto alti (> 95%) già nel vicino-medio infrarosso ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ). E' ovvio che un'alta selettività del filtro è fortemente legata alla bontà della progettazione del filtro stesso. Tuttavia, in stratificazioni alternate dielettrico-metallo, grande importanza sull'efficacia della selettività può assumere la qualità ottica del film metallico. Generalmente, film molto sottili di metallo mostrano proprietà ottiche abbastanza diverse da quelle dello stesso metallo in forma di bulk. In particolare, i film metallici sottili mostrano valori spettrali dell'indice di rifrazione e dell'indice di assorbimento più bassi di quelli relativi al materiale di bulk. Va sottolineato che questo discostamento può essere maggiore o minore a seconda della tecnica utilizzata per la fabbricazione del suddetto film metallico, tecnica che può determinare maggiore o minore compattamento (densità) e/o inclusione di difetti del materiale.

In definitiva, quello che si vuole ottenere è un film metallico sottile con la più alta densità possibile e con la minore quantità di difetti (ad esempio, bassa densità di bordo di grano). Partendo dal presupposto che la nostra tecnica principe per la fabbricazione dei coating selettivi è la tecnica di sputtering, è noto che alcuni accorgimenti tecnologici possono migliorare la qualità del metallo in forma di film sottile. Per questo motivo, l'obiettivo realizzativo sarà dedicato allo studio, ideazione e sviluppo di modifiche alla tecnica di sputtering per l'ottenimento di film metallici molto sottili con proprietà ottiche molto prossime a quelle del materiale di bulk.

L'attività prevalente riguarderà, quindi, l'ideazione e la progettazione di opportune modifiche ed implementazioni da apportare su un preesistente impianto di sputtering per rendere disponibile ed efficace il processo di "Ion Beam Assisted Deposition" (IBAD). Si procederà all'acquisizione ed installazione dei componenti necessari all'implementazione di tale tecnica. Successivamente, un'attività di messa a punto della tecnica IBAD sarà necessaria al fine di verificare sperimentalmente in che modo i parametri di processo (pressione in camera, potenza erogata al cannone ionico, sequenza temporale deposizione/compattamento, etc.) possono influenzare le caratteristiche strutturali del materiale fabbricato.

Proprietà strutturali, ottiche ed elettriche dei materiali metallici prodotti con tecnica IBAD in forma di film molto sottili saranno comparate con quelle di materiali prodotti con tecnica standard sputtering. Poiché le tecniche di caratterizzazione ottica per strati molto sottili (< 10 nm) risultano altamente complesse, sarà condotto un accurato studio per la risoluzione delle problematiche relative alla caratterizzazione ottica dei suddetti strati. In particolare, l'opportuno accoppiamento della tecnica ellissometrica e di quella spettrofotometrica dovrà essere in grado di fornire indici ottici con la massima accuratezza.

Infine, sarà condotta un'attività di simulazione ottica per valutare l'efficacia di filtri ottici interferenziali in qualità di coating solari.

#### Risultati/Deliverable:

- Studio e definizione dei componenti da acquisire e delle modifiche da apportare per l'implementazione della tecnica IBAD su di un preesistente impianto di sputtering multi-catodo
- Acquisizione, installazione e messa a punto della tecnica IBAD
- Simulazione ottica di strutture interferenziali a film sottili a partire da indici ottici di materiali bulk

- Prove di fabbricazione di strati metallici molto sottili ottenuti mediante tecnica IBAD. Comparazione dei risultati con quelli ottenuti mediante tecnica standard sputtering e valutazione prospettica delle potenzialità della nuova tecnica

*Durata:* ottobre 2012 - settembre 2013

#### **b. Studio di configurazioni impiantistiche alternative**

Verranno effettuate valutazioni tecnico-economiche su diverse configurazioni di impianti solari termodinamici con tecnologia parabolica lineare. Verrà effettuato il confronto tra le soluzioni con diverso fluido termico: olio e sali fusi. Nell'ambito di questi ultimi, verranno prese in esame oltre alla attuale miscela binaria, miscele alternative caratterizzate da una minore temperatura di solidificazione.

Sarà effettuato uno studio sulla possibilità di utilizzo di gas come fluido termico nel campo solare. Verrà definito il tipo di gas e le condizioni operative ottimali (pressione e temperatura), per massimizzare l'efficienza. Verranno studiate diverse soluzioni per il ciclo termodinamico di conversione dell'energia termica ed analizzate differenti tipologie di accumulo termico. Sulla base dei risultati delle analisi precedenti, verrà definita la configurazione ottimale del campo solare: lunghezza dei collettori, numero di collettori in serie che costituiscono una singola stringa. Quindi verrà effettuato uno studio del comportamento termomeccanico in esercizio della stringa di collettori. Definita la taglia dell'impianto verrà effettuato il dimensionamento del campo solare, della rete di distribuzione e del sistema di accumulo.

Nell'ambito dello sviluppo di sistemi alternativi di accumulo termico verranno sviluppati e caratterizzati nuovi mezzi di accumulo che utilizzano una miscela di materiali a cambiamento di fase con aggiunta di nano particelle. In particolare, verranno individuati e caratterizzati sia PCM con temperature di fusione/solidificazione negli intervalli di temperatura richiesti che nano particelle compatibili con gli stessi PCM e potenzialmente in grado di incrementarne le caratteristiche di capacità e diffusività termiche; verranno poi studiate le caratteristiche delle miscele e valutata l'influenza delle nano particelle sulle loro proprietà.

#### Risultati/Deliverable:

- Analisi tecnico-economica di impianti solari termodinamici a collettori parabolici lineari
- Valutazione dell'utilizzo di fluidi gassosi in impianti solari termodinamici, con studio del comportamento termomeccanico dei collettori, definizione della configurazione del campo solare e del sistema di accumulo per impianti di grossa taglia
- Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nano particelle, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico

*Principali collaborazioni:* Università di Perugia, Sapienza Università di Roma

*Durata:* ottobre 2012 - settembre 2013

#### **c. Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia**

- Caratterizzazione del serbatoio di accumulo a sali fusi dell'Impianto Sperimentale PCS.

Tale azione è necessaria per caratterizzare il comportamento termico del serbatoio utilizzato per le prove sperimentali dei sistemi cogenerativi proposti.

Verranno raccolti i dati necessari: temperature di parete del serbatoio, temperature di stratificazione dei sali fusi all'interno, calore disperso nel tempo attraverso la coibentazione, potenza elettrica necessaria al mantenimento della temperatura, misura del livello dei sali fusi, ecc., che saranno utilizzati per il dimensionamento e la progettazione dei sistemi proposti.

- Progetto preliminare di sistemi cogenerativi innovativi

Sulla base della caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo del PCS, saranno elaborati i progetti preliminari di:

- un innovativo sistema di conversione termoelettrica che sfrutta il calore disperso dalle pareti del serbatoio di accumulo a sali fusi;

- un innovativo generatore di vapore integrato e immerso nei sali fusi del serbatoio di accumulo, per la generazione di vapore ad alta pressione asservito a un motore a vapore di tipo convenzionale per la produzione di energia elettrica tramite generatore elettrico;
- un motore Stirling per la generazione di energia elettrica tramite sfruttamento, come sorgente calda, del calore del serbatoio di accumulo a sali fusi.

Risultati/Deliverable:

- Caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo a sali fusi dell’Impianto Sperimentale PCS del C.R. Casaccia dell’ENEA
- Progetto preliminare dei tre sistemi innovativi proposti

Principali collaborazioni: Università Roma Tre

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**d. Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali**

ENEA svolgerà azioni di supporto tecnico-scientifico ai Ministeri per la definizione di un quadro nazionale di riferimento, che guidi gli operatori coinvolti nel settore del solare termodinamico, in linea con quanto previsto dalla Strategia Energetica Nazionale, che individua questa tecnologia come una delle più promettenti per sviluppi industriali nel medio termine.

ENEA parteciperà inoltre alle collaborazioni in corso nel settore, sia a livello europeo che internazionale, essenziali per indirizzare le attività di ricerca, stabilire sinergie con i principali attori non nazionali e acquisire risorse nell’ambito dei progetti europei. In particolare, tale partecipazione riguarderà i gruppi di lavoro dell’European Energy Research Alliance (EERA), l’Implementing Agreement dell’IEA SolarPACES e la European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA).

Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulle attività svolte

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**Comunicazione e diffusione dei risultati**

I risultati delle attività svolte nell’ambito del progetto saranno diffusi a diverse tipologie di utilizzatori e con modalità diverse:

- alla comunità scientifica tramite pubblicazioni su riviste scientifiche e partecipazioni a convegni nazionali ed internazionali; questo canale consentirà di confrontarsi con altri esperti del settore e di tenersi aggiornati sugli sviluppi più recenti delle tecnologie considerate;
- ai Ministeri competenti, alle pubbliche amministrazioni e all’industria nazionale tramite i documenti ufficiali prodotti e resi disponibili sul sito web ENEA.

Si valuterà inoltre la possibilità di produrre specifici strumenti di comunicazione (brochure e rapporti tecnici sintetici, video ecc.) e di realizzare workshop sui temi specifici in collaborazione con gli altri partecipanti alla Ricerca di Sistema Elettrico.

## PROGETTO B.1.3 "Energia elettrica da fonte solare"

### Obiettivi e relativi preventivi economici

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
LP1 a	Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per celle solari tandem micromorfe	4109	226	4	20	0	10	125	385
LP1 b	Sviluppo di TCO ad alta efficienza di confinamento ottico per celle a film sottile di silicio	5091	280	5	20	0	5	90	400
LP1 c	Sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino	4745	261	4	10	0	5	30	310
LP1 d	Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI	4891	269	6	15	0	5	90	385
LP1 e	Sviluppo di celle organiche	4709	259	6	35	0	10	110	420
<b>LP1 "Ricerca su celle fotovoltaiche innovative"</b>		<b>23545</b>	<b>1295</b>	<b>25</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>445</b>	<b>1900</b>
LP2 a	Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità	3691	203	10	27	0	5	0	245
LP2 b	Studio di configurazioni impiantistiche alternative	1945	107	0	20	0	0	40	167
LP2 c	Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia	1891	104	2	14	0	10	20	150
LP2 d	Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali	382	21	0	12	0	5	0	38
<b>LP2 "Solare termodinamico"</b>		<b>7909</b>	<b>435</b>	<b>12</b>	<b>73</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>600</b>
<b>TOTALE</b>		<b>31454</b>	<b>1730</b>	<b>37</b>	<b>173</b>	<b>0</b>	<b>55</b>	<b>505</b>	<b>2500</b>

\* in base al documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili", deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie



<b>AREA</b>	<b>PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE</b>
<b>Tema di Ricerca</b>	<b>STUDI E SPERIMENTAZIONI SUI POTENZIALI SVILUPPI DELLE ENERGIE RINNOVABILI – ENERGIA ELETTRICA DAL MARE</b>
<b>Progetto B.1.4</b>	<b>STUDI E VALUTAZIONI SULLA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DALLE CORRENTI MARINE E DAL MOTO ONDOSI</b>

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

Negli ultimi anni l'ENEA ha maturato una notevole esperienza sia nel campo della fisica dell'atmosfera e dell'oceanografia teorica-numerica che nello sviluppo di tecnologie energetiche rinnovabili di tipo innovativo. In ambito energetico marino l'ENEA può fornire quindi un importante contributo attraverso attività di ricerca volta sia a valutare e prevedere la risorsa energetica marina, sia a valutare e ottimizzare l'efficienza dei diversi dispositivi di conversione elettromeccanici sviluppati da aziende e/o istituti di ricerca italiani.

L'attività di ricerca di nuova impostazione che si intende portare avanti nel presente progetto integra il programma di lavoro già in corso nell'ambito degli studi di valutazione sul potenziale energetico delle correnti marine e del moto ondoso. L'attività è finalizzata all'individuazione e alla caratterizzazione delle località più interessanti per lo studio, alla sperimentazione e in seguito installazione di sistemi di conversione, e infine all'analisi dell'efficienza dei diversi sistemi di conversione, da svolgere in collaborazione con aziende nazionali e altre organizzazioni di ricerca.

L'obiettivo finale dell'attività di ricerca è quello di valutare e prevedere il potenziale energetico marino a disposizione, favorire l'applicazione di queste tecnologie, accelerare lo sviluppo commerciale dei sistemi, e qualificare le aziende italiane nei confronti di un futuro mercato internazionale, attraverso un programma di attività articolato sui seguenti punti principali:

- valutazione del clima d'onda presente nelle regioni di massimo interesse ad una risoluzione spaziale di poche decine di metri. La valutazione sarà condotta per mezzo di strumenti numerici allo stato dell'arte;
- messa a punto di un sistema di previsione del moto ondoso e delle correnti per le aree di interesse. La previsione dello stato del mare e delle correnti è necessaria per valutare in anticipo la quantità di energia elettrica che si potrà produrre. Inoltre, alcuni dispositivi di conversione necessitano di conoscere con un certo margine di anticipo le caratteristiche del moto ondoso per potersi riconfigurare in modo da massimizzare l'energia elettrica generata;
- valutazione degli eventi estremi del moto ondoso nelle regioni di interesse. La conoscenza degli eventi estremi è di fondamentale importanza durante la fase di progettazione e dimensionamento dei dispositivi di conversione;
- individuazione e caratterizzazione delle località più interessanti per lo studio, la sperimentazione e successivamente l'installazione di sistemi di conversione;
- individuazione del corretto posizionamento di una matrice di sistemi di conversione off-shore al fine di sfruttare al meglio il potenziale energetico a disposizione;
- analisi delle tecnologie disponibili o in fase di sviluppo, al fine di selezionare le più promettenti per le diverse applicazioni, individuare gli elementi di criticità, le possibili soluzioni e le azioni necessarie per favorire la diffusione delle applicazioni e lo sviluppo delle aziende del settore; tra le tecnologie in fase di sviluppo potrà essere presa in considerazione il recupero di energia dai gradienti di concentrazione salina;

- svolgimento di studi sul comportamento fluidodinamico e strutturale di sistemi e componenti critici mediante simulazioni numeriche e analisi di dati sperimentali in collaborazione con le principali aziende, spin-off universitari o organizzazioni di ricerca del settore;
- analisi di sistemi di connessione alla rete elettrica a terra a basso costo e bassa dissipazione;
- progettazione, allestimento ed esercizio dimostrativo di apparati sperimentali o di impianti prototipali attraverso una rete di collaborazioni industriali.

### *Situazione attuale del prodotto dell'attività*

La ricerca in ambito italiano nel campo dell'energia dal mare è attiva da circa dieci anni con progetti mirati allo sviluppo di dispositivi atti a funzionare nel Mar Mediterraneo in particolare e in zone oceaniche in genere. Molti dei sistemi in fase di studio in Italia hanno raggiunto maturità scientifica e possono passare alla fase di sviluppo e commercializzazione. Tale fase al momento è demandata agli spin-off universitari nati nel corso dell'attività di ricerca, sebbene l'attenzione e l'interesse da parte degli investitori siano crescenti nel tempo lasciando prevedere interessanti possibilità per il futuro.

L'idea di convertire in energia elettrica l'energia associata al moto ondoso, alle correnti di marea non è recente, e nel tempo sono stati sviluppati diversi progetti finalizzati alla realizzazione di dispositivi per la generazione di energia elettrica dal mare. Diversi dispositivi sono attualmente in attività (si trova un'esauritiva lista nel sito del progetto Equimar: <http://www.equimar.org/equimar-project-deliverables.html>) ed hanno dimostrato di poter essere operativi anche in difficili condizioni operative, come mareggiate oceaniche. La loro distribuzione è internazionale essendo installati, sia in paesi europei che in altri continenti, come ad esempio Australia ed Asia.

Dal 1986 la Commissione Europea (CE) sostiene l'attività di ricerca e sviluppo sulla conversione dell'energia dal mare, anche se in maniera effettiva i primi sostegni risalgono al 1993, quando la CE ha finanziato una serie di conferenze internazionali sull'energia dal mare, come ad esempio quella che si è tenuta ad Edimburgo (UK), e poi a seguire le conferenze tenutesi a Lisbona (PT) nel 1995, a Patrasso (GR) nel 1998 e ad Aalborg (DK) nel 2000.

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

La ricerca nel settore marino presenta diverse attività che possono essere suddivise in sei grandi categorie: caratterizzazione della risorsa, dispositivi e tecnologie, varo e operatività, impatto ambientale, infrastrutture di ricerca e formazione, ed infine impatto socio-economico.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della risorsa bisogna intanto ricordare che l'energia può essere estratta dal mare attraverso tecnologie che utilizzano l'acqua di mare come forza motrice o che sfruttano il suo potenziale chimico o termico. In particolare possono essere individuate le seguenti fonti: onde, correnti di marea, correnti marine, gradienti di temperatura e salinità. Ognuna di queste fonti di energia richiede una specifica tecnologia per la conversione in energia elettrica. Numerosi progetti di ricerca sono stati indirizzati soprattutto alla conversione di energia dalle onde e dalle correnti di marea e taluni hanno ormai raggiunto la fase di prototipo dimostrativo.

Il Mediterraneo è un bacino semichiuso e come tale è caratterizzato da una circolazione marina con associati gradienti di temperatura ed escursioni di marea sensibilmente più deboli rispetto a quelli oceanici.

Queste caratteristiche limitano le fonti energetiche disponibili nel Mediterraneo alle correnti di marea e alle onde. Al fine di valutare correttamente l'opportunità di installare dispositivi di conversione ondosa o corrente di marea sono necessari due livelli di dettaglio:

- mappatura/previsione della densità di potenza media del moto ondoso/corrente, su larga scala (ad esempio per tutte le coste del Mar Mediterraneo) per poter identificare le possibili aree d'azione;
- mappatura delle caratteristiche del moto ondoso/corrente nel singolo sito di installazione, per poter progettare e collocare il singolo dispositivo/impianto, valutando anche la produttività del sistema.

Nell'ambito dei progetti dedicati all'energia dal mare nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico,, l'ENEA ha prodotto una mappatura dell'energia media climatologica presente nell'intero bacino Mediterraneo con un dettaglio spaziale di 7 km, e di circa 1 km per alcune regioni, quali ad esempio la Sardegna occidentale e il canale di Sicilia. Per alcune località si è provveduto poi ad incrementare ulteriormente la risoluzione spaziale spingendola fino a poche centinaia di metri. In aggiunta alle informazioni climatologiche sulla quantità di energia disponibile è necessario conoscere la previsione dello stato del mare e dell'energia disponibile nella località in cui è stato installato il dispositivo di conversione. Allo stato attuale non esistono sistemi di previsione ad un livello di dettaglio spaziale sufficiente agli scopi dell'estrazione di energia dal mare. Le attuali previsioni sono fornite, infatti, ad un dettaglio spaziale di circa 7-10 km. Al fine di ottimizzare i dispositivi di conversione è necessario integrare i dati meteo-marino con quelli idro-fluidodinamici relativi al funzionamento del dispositivo. Allo stato attuale molti dei prototipi sono stati progettati e calibrati utilizzando dati oceanografici a bassa risoluzione e quindi non ottimizzati per sfruttare al meglio il potenziale naturale a disposizione in un determinato punto.

Scopo ultimo del seguente progetto è di mettere a sistema le diverse competenze presenti in ENEA e in ambito universitario per arrivare all'ottimizzazione di prototipi per la conversione dell'energia dal mare.

### **Stato attuale delle tecnologie**

Le attività di ricerca rivolte allo sfruttamento del moto ondoso e correnti di marea vedono primeggiare i centri di ricerca del nord Europa, particolarmente la Scozia, quindi i sistemi la cui fase di sviluppo è più avanzata sono stati progettati per operare con condizioni oceaniche, dove l'altezza delle onde è decisamente elevata. Nel caso dell'Italia, le sue coste sono bagnate da onde di piccola altezza e minor periodo. E' quindi necessario cercare di sviluppare dispositivi che siano in grado di sfruttare caratteristiche differenti dall'altezza delle onde stesse.

A livello nazionale attualmente si possono evidenziare le seguenti realtà:

- presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria è stato sviluppato un dispositivo di conversione del tipo U-OWC (*Oscillating Water Column*) denominato REWEC3 (*REsonant Wave Energy Converter*) per la conversione di energia ondosa in energia elettrica. Il REWEC3 è costruttivamente molto simile ad una tradizionale diga portuale a cassoni cellulari, in cui la parte lato mare è opportunamente modificata per consentire lo sfruttamento dell'energia associata al moto ondoso incidente.

Il cassone modificato è costituito da un condotto verticale interagente con il moto ondoso incidente mediante un'imboccatura superiore. Tale condotto è, poi, collegato ad una camera di assorbimento attraverso una luce di fondo. La camera di assorbimento è posta in contatto con l'atmosfera mediante un condotto nel quale è alloggiata una turbina *self-rectifying*. Perciò, la camera di assorbimento contiene massa d'acqua nella parte inferiore e una sacca d'aria nella parte superiore. Per effetto del campo di moto ondoso interagente con la struttura, si generano sull'imboccatura del condotto verticale delle fluttuazioni di pressione, le quali determinano delle oscillazioni all'interno della massa d'acqua contenuta nel condotto e nella camera di assorbimento, corrispondenti alle fasi di cresta e di cavo d'onda. Conseguentemente la sacca d'aria all'interno della camera di assorbimento è alternativamente compressa ed espansa, generando una corrente alterna all'interno del condotto che collega la camera con l'atmosfera, capace di mettere in funzione la turbina *self-rectifying*. Rispetto ai tradizionali sistemi OWC (*Oscillating Water Column*) di conversione di energia ondosa, i REWEC sono delle vere e proprie dighe portuali con un tubo ad U (costituito dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento) nella parte anteriore della diga lato mare; pertanto possono essere considerati degli U-

OWC nei quali, però, le onde non entrano all'interno della struttura ma agiscono da forzante per instaurare il moto di compressione e decompressione della sacca d'aria all'interno dell'impianto. Tali impianti innovativi, rispetto ai classici OWC, risultano essere molto più convenienti in termini sia di fattibilità che di produzione di energia.

Un confronto tra i tradizionali OWC e gli U-OWC ha mostrato, inoltre, come gli ultimi consentono di assorbire una quantità di energia ondosa molto maggiore di quella dei classici OWC sia per gli stati di mare più intensi interagenti con la struttura che per quelli più deboli.

Inoltre, da un punto di vista tecnologico tali impianti U-OWC non presentano addizionali e significative complessità costruttive rispetto a quelle di una classica diga foranea a parete verticale. La struttura dell'impianto, infatti, è essenzialmente quella di classica diga a cassoni cellulari in c.a., con le celle che possono essere riempite di inerti o di calcestruzzo ed il muro paraonde che si porta alla stessa altezza di una diga (si consideri che i cassoni cellulari sono strutture largamente utilizzate per la realizzazione dei porti, e nello specifico per le opere esterne dei porti). L'innovazione è costituita dal tubo ad U in c.a., costituito dal condotto verticale e dalla camera di assorbimento, che ha un polmone d'aria collegato all'atmosfera per mezzo di un condotto.

- Presso il Politecnico di Torino è stato sviluppato un dispositivo di conversione del tipo *point absorber* (attenuatore d'onda) chiamato ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter). Il sistema ISWEC è un sistema giroscopico di conversione dell'energia da moto ondoso. La peculiarità di ISWEC risiede nel fatto che il convertitore non presenta parti meccaniche in moto immerse in acqua. Il sistema principale di conversione dell'energia quindi è completamente protetto dallo scafo permettendo al sistema di operare in condizioni di ridotta manutenzione ed elevata affidabilità. ISWEC è composto principalmente da un disco (volano) rotante. Questo disco è posto all'interno di una campana. Il disco è quindi montato su di una piattaforma che ne permette la rotazione di precessione. In questo dispositivo la precessione nasce indotta dalla combinazione della velocità di rotazione del volano con quella di beccheggio dello scafo ed è usata per mettere in moto l'albero del generatore. In sintesi quindi le onde perturbano il moto del volano, che reagisce con la precessione, mette in rotazione l'albero del generatore e si ha la produzione di elettricità. Il sistema è regolato da un controllo che agisce sulla velocità del volano e sulla potenza estratta dal generatore e garantisce istante per istante un assorbimento ottimale di energia dal mare. Si può migliorare l'efficienza di tale sistema fornendo le informazioni di previsione a breve termine (ore) dell'onda in arrivo sul sito. Un'ultima considerazione va fatta sulla potenza spesa per mantenere il volano in rotazione. Se il volano ruota immerso nell'atmosfera le perdite per attrito aerodinamico sono rilevanti, corrispondenti a una frazione importante della potenza prodotta. La campana oltre a proteggere il volano dagli agenti esterni, serve anche a mantenere un grado di vuoto tale da minimizzare le perdite per attrito aerodinamico. Da esperimenti condotti in laboratorio, si è notato come con gradi di vuoto semplici da ottenere (dell'ordine dei 1000 Pa assoluti), la potenza spesa per mantenere in rotazione il volano diminuisca a pochi punti percentuali della potenza prodotta. Inoltre la potenza spesa per creare il vuoto è trascurabile, in quanto con guarnizioni commerciali standard è possibile ottenere una durata del grado di vuoto dell'ordine delle settimane. I supporti del volano sono altresì un punto strategico, in quanto sono responsabili di circa la metà delle perdite per rotazione del volano e possono essere realizzati con tecnologia ceramica normalmente a disposizione in commercio.

Le attività fino ad ora condotte hanno riguardato lo sviluppo di prototipi in scala 1:45 (testato presso la vasca navale dell'Università di Napoli "Federico II") ed uno in scala 1:8 che è stato testato presso la vasca navale dell'INSEAN (CNR). Lo stesso prototipo, opportunamente integrato, sarà installato nei prossimi mesi presso l'unità operativa di Capo Granitola dell'IAMC del CNR. Lo sviluppo successivo delle attività di ricerca riguardano la progettazione di un sistema in scala reale di taglia pari a circa 60 kW che sarà condotta in sinergia con ENEA all'interno del presente progetto di ricerca.

Per quanto riguarda l'energia da correnti di marea, la tecnica di produzione si concentra sull'utilizzo di rotor sotomarinati concettualmente simili a quelli utilizzati nella generazione eolica. Questi rotor sono orientati nel verso in cui normalmente scorre la corrente, e sono ancorati al fondo marino o ad apposite piattaforme galleggianti. La potenza estraibile è funzione della velocità della corrente stessa e del diametro del rotore. Ci sono due tipi di rotor normalmente usati, il primo è un rotore ad asse orizzontale, mentre il

secondo ad asse verticale. Il rotore ad asse orizzontale è di tipo orientabile in modo da variare la posizione a seconda del flusso e viene normalmente usato in acque poco profonde (circa 20-30 metri) mentre le piattaforme sono costruite solo per siti a profondità maggiore (più di 50 metri). La prima generazione di questi generatori è basata su componenti ingegneristiche convenzionali, in particolare una turbina di medie dimensioni, con diametro di 10-15 metri e potenza di 200-700 kW, deposta in fondali bassi. La generazione successiva vedrà la probabile introduzione di nuovi componenti creati ad hoc, come per esempio generatori a più poli adatti alle basse velocità e sistemi di trasmissione idraulica. I rotori ad asse verticale non richiedono sistemi di orientamento; possono essere collocati su bassi fondali con pali di fondazione oppure disposti al di sotto di piattaforme galleggianti, opportunamente ancorate in modo da bilanciare la coppia motrice applicata al rotore. Alcuni brevetti italiani sono stati progettati e realizzati in forma di prototipo dal Dipartimento di Ingegneria Aereospaziale dell'Università Federico II di Napoli. Tra questi ricordiamo la turbina KOBOLD che è stata installata nello Stretto di Messina nella primavera del 2001. KOBOLD essenzialmente è costituito da una turbina marina ad asse verticale con pale diritte e parzialmente libere di oscillare brevettata nell'ambito del progetto ENERMAR. La turbina KOBOLD è stata sviluppata dalla società Ponte di Archimede S.p.A., proprietaria del brevetto internazionale, in collaborazione con il Dipartimento di Progettazione Aeronautica (DPA) dell'Università "Federico II" di Napoli con lo scopo di dimostrare che lo sfruttamento dell'energia rinnovabile contenuta nelle correnti di marea è un modo conveniente per produrre energia se confrontato con lo sfruttamento di altre fonti di energia alternativa. Questo impianto è servito anche per dimostrare sul campo il limitato impatto ambientale che tale tipo di sfruttamento dell'energia comporta. Una turbina Kobold a 3 pale è montata in chiglia ad un galleggiante cilindrico di 10 m di diametro ancorato al fondo mediante 4 linee d'ormeggio.

Le caratteristiche della turbina Kobold sono le seguenti: direzione di rotazione indipendente dalla direzione della corrente marina; elevato valore della coppia all'avvio, che rende la turbina capace di avviarsi spontaneamente; anche sotto carico, senza la necessità di qualsiasi sistema di avvio; ottima efficienza, semplicità di funzionamento e bassa manutenzione. L'impianto Enermar è a mare dal 2001 ed è uno dei primi impianti per lo sfruttamento delle correnti marine in scala reale mai varati. In questo tempo è stato possibile provare l'affidabilità di vari componenti e la validità delle scelte progettuali fatte.

La turbina KOBOLD II può essere considerata come la naturale evoluzione della turbina KOBOLD I, è infatti basata sulle esperienze acquisite progettando e gestendo l'impianto KOBOLD I di Messina. L'impianto sarà installato sulla costa orientale dell'isola di Lombok (Indonesia), dove sono presenti correnti simili a quelle dello Stretto di Messina. Alla massima corrente di 3 m/s l'impianto sarà capace di circa 150 kW.

La turbina GEM è un dispositivo di conversione delle correnti marine progettato nell'ambito di un progetto di ricerca congiunto tra il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale dell'Università Federico II di Napoli e il Parco Scientifico e Tecnologico del Molise. Il dispositivo GEM consiste in una turbina da 300 kW per la produzione di energia dalle correnti di marea da installare a circa 20 m di profondità. La turbina marina è ad asse orizzontale e per le sue caratteristiche tecniche (ancoraggio ad una catenaria) è definito "l'aquilone del mare". Una specifica caratteristica tecnica sviluppata in GEM è un particolare tipo di diffusore che permette di raddoppiare la potenza prodotta a parità di diametro della turbina. GEM è stato installato per verificarne il funzionamento nella laguna di Venezia (Malamocco) alla fine del 2011. GEM è rimasto operativo e positivamente testato per circa due mesi.

Infine, è di interesse riportare una panoramica sulle infrastrutture di ricerca che contribuiscono alla crescita della ricerca nel settore dell'estrazione di energia del mare in Italia. Se alcuni problemi, come lo studio delle correnti e del moto ondoso, oppure la dinamica dei corpi galleggianti e ormeggiati, presentano aspetti comuni con altri settori di interesse nell'ingegneria, l'analisi dell'interazione tra i principali sottosistemi, nelle condizioni di utilizzo, richiede sia elevate risorse di calcolo (cluster) per la sua simulazione, che laboratori complessi (vasche navali e bacini oceanici) sul versante sperimentale.

Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante: la possibilità di ricreare in modo controllato un ambiente marino realistico consente di studiare il funzionamento, le prestazioni e l'interazione del convertitore con l'ambiente circostante. Risulta poi necessario disporre di impianti sperimentali di grandi dimensioni, che possono ridurre il più possibile gli effetti di una scala eccessivamente ridotta.

Successivamente, la necessaria fase di messa a punto del prototipo nelle condizioni reali può essere effettuata mediante la sua installazione in particolari siti che presentano caratteristiche di sicurezza e significatività delle condizioni meteomarine. In quest'ultimo caso, diventa possibile anche studiare alcuni aspetti complementari, come la logistica e la manutenzione, che altrimenti non avrebbe senso considerare.

Le infrastrutture di ricerca attualmente presenti in Italia riguardano:

- Vasca navale del CNR-INSEAN
- Vasca navale dell'Università Federico II
- Banchi per prove a secco (per convertitori di energia da moto ondoso) presso il Politecnico di Torino
- IAMC del CNR, sezione di Capo Granitola
- Banco prova per turbine auto rettificanti (tipo Wells ed ad impulso) presso il Politecnico di Bari
- Noel (Natura Ocean Engineering Laboratory) presso l'Università di Reggio Calabria.

Infine nello Stretto di Messina è già in corso la procedura autorizzativa per la realizzazione di un laboratorio a cielo aperto per la sperimentazione, sul campo, di vari sistemi per la produzione di energia dalle correnti marine. Tale autorizzazione è stata richiesta dal consorzio pubblico-privato Seapower Scarl costituito dall'Università degli Studi di Napoli "Federico II" e la società altoatesina Fri-El Seapower Srl controllata dalla holding Fri-El Green Power Spa. L'idea è quella di offrire ai centri di ricerca, alle aziende ed agli enti pubblici di tutto il mondo, interessati a progetti per lo sfruttamento dell'energia delle correnti di marea, un campo idoneo a portare a termine campagne di prova e di analisi dei dati sperimentali ottenuti sia su sistemi in scala ridotta sia su prototipi a scala reale, fasi entrambi indispensabili per ogni iter progettuale.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### ***Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali***

Il tema dell'energia dal mare è stato trattato nei PAR 2008-09 e PAR 2011. L'attuale progetto si basa sui risultati raggiunti nei PAR precedenti, sviluppando ulteriormente gli aspetti che riguardano lo studio e la previsione del potenziale naturale a nostra disposizione e l'integrazione di questo con gli aspetti tecnologici associati ai dispositivi di conversione.

Nel PAR 2008-09 le attività si sono concentrate principalmente sullo sviluppo di modelli atmosferico-oceanografici per la valutazione del potenziale energetico a scala di bacino mediterraneo. Sono stati analizzati sia il potenziale energetico associato alle correnti marine che alle onde. Nello specifico le attività hanno riguardato lo sviluppo di un modello numerico per la simulazione della circolazione marina e del moto ondoso per il Mediterraneo a circa 7 km di risoluzione. Le necessarie condizioni al contorno superficiali, ossia le variabili atmosferiche, sono state ottenute attraverso lo sviluppo e l'esecuzione di modelli atmosferici.

In particolare è stata prodotta una simulazione atmosferica ad alta risoluzione utilizzando un modello di circolazione regionale per l'area europea centrato sul bacino del mediterraneo. I risultati del modello, in termini di velocità del vento al suolo, flussi di calore e acqua sono stati utilizzati come condizioni al contorno superficiali da applicare al modello delle onde e di circolazione del Mediterraneo. E' stato quindi implementato il modello di circolazione del Mar Mediterraneo che include le correnti di marea. Attraverso l'analisi della simulazione sono state prodotte mappe climatologiche dell'intensità e direzione delle correnti marine tridimensionali per l'intera area mediterranea. Successivamente è stato sviluppato un modello numerico di simulazione del moto ondoso nel bacino mediterraneo. L'implementazione ha previsto la generazione di una griglia computazionale che ha coperto l'intero bacino mediterraneo con una risoluzione orizzontale di circa 7 km. Il modello è stato forzato in superficie dai dati di vento ottenuti dal modello RegCM e ECMWF per il clima presente e futuro. Dall'analisi dei risultati è stata prodotta la mappa del potenziale energetico climatologico presente lungo la fascia costiera italiana e in generale per tutto il mar Mediterraneo. Infine è stato sviluppato un modello numerico di simulazione delle correnti marine per la regione delle Bocche di Bonifacio. Il modello utilizzato è stato il POM e la risoluzione adottata è stata di

poche centinaia di metri. Dall'analisi dei risultati è stata prodotta la mappa del potenziale energetico climatologico in termini di intensità e direzione delle correnti marine.

I potenziali energetici elaborati per le diverse simulazioni numeriche prodotte, sia per il moto ondoso sia per le correnti marine sono stati integrati in un sistema di visualizzazione GIS che rende la consultazione dei risultati semplice e immediata. Il GIS sviluppato sovrappone ai dati di potenziale anche quelli relativi alle aree marine protette.

Sempre nell'ambito del PAR 2008-09 è stato organizzato un workshop sul tema "Prospettive di sviluppo dell'energia dal mare per la produzione elettrica in Italia", tenuto in ENEA il 16 e 17 giugno 2011. Il workshop può essere considerato il primo momento di incontro a livello nazionale dedicato al tema dell'energia dal mare. La presenza di relatori del mondo universitario, della ricerca e del settore delle piccole e medie imprese ha messo in rilievo l'importanza di un confronto di idee sui temi di più stringente rilievo e le prospettive di una maggiore utile collaborazione con questi ultimi in vista di proficue sinergie.

Nel PAR 2011 le attività sono proseguite nel solco tracciato dalle attività realizzate nel PAR precedente. Le attività hanno riguardato lo studio del potenziale energetico presente nello Stretto di Messina, la valutazione delle caratteristiche fisiche del potenziale ondoso per alcune regioni campione della costa italiana e la valutazione del potenziale elettrico erogabile in rete da sistemi di conversione del moto ondoso e correnti di marea. Per quanto riguarda lo Stretto di Messina è stato implementato il modello MITgcm ad alta risoluzione (poche decine di metri) in configurazione non idrostatica. I risultati ottenuti dalla simulazione di controllo sono stati validati confrontandoli con tutti i dati sperimentali a nostra disposizione. Al termine della positiva fase di confronto, i dati di corrente marina sono stati analizzati in termini di flusso di energia secondo sezioni trasversali dello stretto. In questo modo è stato possibile individuare con estrema precisione i punti dello stretto interessati dal massimo potenziale energetico. I dati energetici sono stati successivamente integrati all'interno di un sistema di visualizzazione multistrato GIS. Per quanto riguarda il potenziale associato al moto ondoso, nel corso del PAR 2011 sono stati sviluppati diversi modelli ad altissima risoluzione (< 1 Km) per diverse regioni della costa italiana. I modelli in questione hanno fornito la quantità di energia disponibile lungo la costa occidentale della Sardegna e Sicilia, dell'isola di Pantelleria e di Civitavecchia ad un dettaglio spaziale mai raggiunto in precedenza. L'analisi è stata finalizzata sia a determinare il clima ondoso e l'energia associata, sia a determinare gli eventi estremi.

L'ultima linea di attività del PAR 2011 è stata dedicata alla valutazione delle prestazioni di alcuni dispositivi di conversione del moto ondoso e delle correnti marine sviluppati in Italia. I convertitori del moto ondoso presi in esame sono stati il REWEC3 e ISWEC.

Per quanto riguarda REWEC3, la prima fase delle attività ha riguardato lo studio del dimensionamento del dispositivo. Lo studio è stato condotto considerando sia i dati climatologici del moto ondoso sia gli eventi estremi. Al termine di questa fase è stata stimata la produzione di energia ondosa media annua dell'impianto ipoteticamente applicato in alcuni punti della costa italiana.

Per ISWEC l'analisi di produttività del convertitore ha seguito un'altra procedura. Durante la prima fase sono stati raffinati i modelli idrodinamici ed elettro-meccanici che simulano il funzionamento di ISWEC sulla base dei dati ondometrici ad alta frequenza spazio-temporale generati nel corso del progetto stesso. Sulla base dei risultati ottenuti, è stata valutata la quantità di energia elettrica erogabile da ISWEC nel sito costiero dell'isola di Pantelleria.

Relativamente ai dispositivi di conversione delle correnti di marea, sono state verificate le prestazioni di diversi dispositivi sia ad asse orizzontale che verticale. Le prestazioni dei dispositivi sono state valutate mediante simulazioni numeriche dell'idrodinamica che si stabilisce tra convertitori di energia ed il potenziale marino. I dispositivi analizzati sono stati:

1. Kobold - struttura galleggiante con turbina semi-sommersa ad asse verticale
2. Fri-El - pontone con filari-semi sommersi basate su turbine ad asse orizzontale
3. GEM - struttura sommersa e basata su turbina ad asse orizzontale
4. MCT (Marine Current Turbine) struttura su pilone fissato sul fondo - turbina ad asse orizzontale
5. Verdant Power - Struttura poggiata sul fondo del mare e basata su turbina ad asse orizzontale.

L'analisi di produttività e costo dell'energia prodotta da questi convertitori è stata calcolata per lo stretto di Messina sulla base dei dati provenienti dalle simulazioni numeriche delle correnti di marea.

Durante il PAR 2011 le attività riguardanti l'energia dal mare sono state presentate in diversi convegni nazionali e internazionali, quali ad esempio, i diversi workshop organizzati nell'ambito del progetto congiunto EERA sul tema dell'energia marina.

### **Obiettivo finale dell'attività**

L'obiettivo finale dell'attività di ricerca è quello di favorire l'applicazione di queste tecnologie, accelerare lo sviluppo commerciale dei sistemi, e qualificare le aziende italiane nei confronti di un futuro mercato internazionale, attraverso un programma di attività articolato sui diversi aspetti, sia oceanografici che ingegneristici, della produzione di energia elettrica dal mare. Tra questi aspetti ricordiamo la valutazione del clima d'onda presente nelle regioni di massimo interesse ad una risoluzione spaziale di poche decine di metri, lo sviluppo di sistemi di previsione dell'energia associata ai diversi stati del mare, la valutazione degli estremi climatici, la progettazione e ottimizzazione di dispositivi di conversione e di sistemi di connessione alla rete elettrica a terra a basso costo e bassa dissipazione.

La prospettiva di più lungo periodo potrebbe riguardare lo sviluppo di una filiera tecnologica innovativa, come punto di raccordo tra le numerose attività in corso a livello industriale e accademico, in analogia con l'esperienza del solare termodinamico, in cui l'ENEA, attraverso lo sviluppo di una filiera tecnologica innovativa, ha favorito la crescita di aziende nazionali specializzate nel settore e la loro proiezione a livello internazionale.

### **Descrizione dell'attività a termine**

Lo sviluppo dell'attività nell'arco della durata del programma triennale 2012-2014 è il seguente:

1. Messa a punto di un sistema di previsione del moto ondoso per le aree di interesse. La previsione dello stato del mare e delle correnti è necessaria per valutare in anticipo la quantità di energia elettrica che si potrà produrre. Inoltre, alcuni dispositivi di conversione richiedono la conoscenza in anticipo del moto ondoso per potersi riconfigurare.
2. Valutazione degli eventi estremi del moto ondoso nelle regioni di interesse. La conoscenza degli eventi estremi è di fondamentale importanza durante la fase di progettazione dei dispositivi di conversione.
3. Analisi delle tecnologie disponibili o in fase di sviluppo, al fine di selezionare le più promettenti per le diverse applicazioni, individuare gli elementi di criticità, le possibili soluzioni e le azioni necessarie per favorire la diffusione delle applicazioni e lo sviluppo delle aziende del settore; tra le tecnologie in fase di sviluppo potrà essere presa in considerazione il recupero di energia dai gradienti di concentrazione salina.
4. Individuazione del corretto posizionamento di una matrice di sistemi di conversione off-shore al fine di sfruttare al meglio il potenziale energetico a disposizione.
5. Svolgimento di studi sul comportamento fluidodinamico e strutturale di sistemi e componenti critici mediante simulazioni numeriche e analisi di dati sperimentali in collaborazione con le principali aziende o organizzazioni di ricerca del settore.
6. Misure oceanografiche in situ per la validazione dei modelli numerici e la caratterizzazione dei siti prescelti.
7. Analisi di sistemi di connessione alla rete elettrica a terra a basso costo e bassa dissipazione.
8. Progettazione, allestimento ed esercizio dimostrativo di apparati sperimentali o di impianti prototipali attraverso una rete di collaborazioni industriali.
9. Divulgazione dei risultati (sito web ENEA dedicato, Organizzazione workshop, rapporti tecnici e articoli su riviste nazionali e/o internazionali).



10. Agire come punto di sintesi e di aggregazione per le varie esperienze italiane verso la European Energy Research Alliance (EERA).

### ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

- ✓ Messa a punto di un sistema di previsione del moto ondoso per le aree di interesse
- ✓ Selezione delle tecnologie più promettenti per le diverse applicazioni e individuazione degli elementi di criticità, delle possibili soluzioni e delle azioni necessarie per favorire la loro diffusione; tra le tecnologie in fase di sviluppo potrà essere presa in considerazione il recupero di energia dai gradienti di concentrazione salina
- ✓ Progettazione, allestimento ed esercizio dimostrativo di apparati sperimentali o di impianti prototipali attraverso una rete di collaborazioni industriali e organizzazioni di ricerca del settore.

### ***Coordinamento con attività di CNR e RSE***

Il CNR non svolge attività sul presente tema nell'ambito nazionale della Ricerca di Sistema Elettrico. Tuttavia l'INSEAN, l'Istituto di ricerca nel settore dell'ingegneria navale e marittima, afferente al dipartimento Energia e Trasporti del CNR, è coinvolto, insieme ad ENEA, nel programma congiunto EERA sull'energia dal mare. Presso INSEAN si sviluppano codici numerici per studiare l'interazione delle strutture galleggianti e la dinamica dei sistemi di ormeggio. La disponibilità della vasca navale presso l'infrastruttura INSEAN rende inoltre possibile la validazione dei modelli numerici su prototipi in scala. Da quanto sopra descritto, si evince che le attività CNR non si sovrappongono alle attività ENEA.

Al fine di garantire la massima sinergia all'interno del programma e la migliore distribuzione delle risorse, ENEA e RSE hanno operato in maniera coordinata al fine di assicurare lo scambio di dati prodotti e pianificare le rispettive attività in modo organico. Sulla base dell'incontro tecnico che si è tenuto in ENEA nel luglio 2012, si ritiene che le attività condotte da entrambi possano bene integrarsi fornendo una valutazione esauriente e di dettaglio sul tema dell'energia dal mare. In particolare, nel corso dell'incontro è stato fatto il punto sulle attività già svolte da RSE ed ENEA nell'ambito dei rispettivi piani, e si sono analizzate le attività programmate, come di seguito riassunte. Le attività previste nel triennio da RSE prevedono la predisposizione di prototipi di macchine per la conversione del moto ondoso diverse da quelle proposte da ENEA. RSE prevede inoltre di fornire un'analisi di dettaglio del potenziale ondoso nel porto di Civitavecchia. Su questo tema l'ENEA svilupperà invece una metodologia capace di fornire le previsioni del moto ondoso, e dell'energia realmente estraibile, in qualunque punto della costa italiana.

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

Le attività relative ai sistemi di produzione di energia dal mare sono particolarmente interessanti per le numerose isole presenti in Italia: in molte di queste l'approvvigionamento energetico, realizzato comunemente da centrali termoelettriche a gasolio, risulta oneroso dal punto di vista economico. Il combustibile viene accumulato in serbatoi e portato via mare da barche: in caso di mare agitato molte volte le isole non vengono raggiunte. Per tali realtà la possibilità di utilizzare sistemi che convertono l'energia del mare appare particolarmente interessante. A livello sociale si avrebbe il vantaggio della sicurezza della continuità della produzione di energia ed il coinvolgimento nella manutenzione dei sistemi.

Lo sviluppo dei sistemi di assorbimento e conversione energetica di tipo costiero, sia galleggianti sia di tipo a barriere sommerse poggiate su bassi fondali, può avere una valenza di significativo interesse nel nostro Paese, per la riduzione dei fenomeni di erosione costiera.

Per quanto riguarda viceversa l'impatto economico, lo sviluppo di tecnologie innovative quali quelle relative ai sistemi di conversione dell'energia del mare possono fare crescere delle realtà produttive che potrebbero agevolmente svilupparsi in un mercato ancora inesplorato.

## PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ

### Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012

#### a. Sviluppo di modelli meteo-marini

##### **a.1 Sviluppo e verifica di modelli meteo-marini per la simulazione del moto ondoso per aree portuali italiane di interesse**

I sistemi di conversione U-OWC sono particolarmente sensibili alle caratteristiche delle onde incidenti. La risposta dell'impianto, infatti, è influenzata dalle caratteristiche delle onde che trasmettono l'energia incidente e che possono essere onde di vento pure, o di mare lungo, oppure una sovrapposizione di entrambe. In funzione delle tipologie di onde che convogliano la maggiore quantità di energia nella località assegnata, gli impianti sono dimensionati in maniera opportuna al fine di garantire la massima efficienza in termini di assorbimento di energia ondosa. Allo scopo di raggiungere elevati livelli di accuratezza nella previsione del moto ondoso incidente, e di conseguenza dell'energia ondosa associata, saranno implementati modelli numerici per la previsione del moto ondoso per alcune regioni portuali italiane di interesse.

Questa fase progettuale si avvarrà inizialmente dell'esperienza maturata nel corso dei precedenti PAR. Nello specifico, partendo dai modelli numerici già sviluppati, sarà valutato nel corso del seguente obiettivo l'effetto combinato dell'aumento di risoluzione spaziale sia dei campi di vento utilizzati per forzare i modelli sia della griglia computazionale. Il presente obiettivo mira in definitiva a sviluppare una metodologia che sia in grado di stabilire la massima risoluzione possibile da adottare, una volta definita la risoluzione spaziale dei dati atmosferici a disposizione. Infine l'obiettivo è indirizzato alla produzione di mappe energetiche di alcune aree portuali italiane di interesse per una possibile applicazione di dispositivi tipo REWEC3.

##### **a.2 Sviluppo di un sistema per la previsione del moto ondoso a scala di bacino mediterraneo**

La conoscenza del clima d'onda presente in un determinato punto della costa o del mare in generale è di fondamentale importanza nel campo dell'energia dal mare. Il dimensionamento dei dispositivi, la scelta dei power take-off e soprattutto la loro efficienza e sicurezza dipendono in maniera significativa da questi dati. Tuttavia la conoscenza dello stato del mare futuro, inteso come previsione a breve termine (da poche ore a 7 giorni), rappresenta un ulteriore vantaggio per i dispositivi di conversione del moto ondoso. Conoscere con sufficiente anticipo lo stato del mare significa poter mettere in sicurezza i dispositivi nel caso di previste mareggiate. Inoltre la conoscenza dei dettagli di funzionamento del dispositivo unito alla conoscenza dello stato del mare futuro contribuisce alla previsione della quantità di energia elettrica che potrà essere prodotta e quindi immessa in rete. Infine per alcuni dispositivi di conversione, quali ad esempio quelli definiti *point absorber* (es. ISWEC), la conoscenza dello stato del mare con alcune ore di anticipo è di fondamentale importanza in quanto il sistema è regolato da un controllo che agisce sulla velocità del volano e sulla potenza estratta dal generatore che garantisce istante per istante un assorbimento ottimale di energia dal mare. Si intuisce quindi che si può migliorare l'efficienza di tale sistema fornendo le informazioni di previsione a breve termine (ore) dell'onda in arrivo sul sito di installazione.

Le attività proposte nel seguente obiettivo prevedono la creazione di un sistema di previsione del moto ondoso e dell'energia ad esso associato a una risoluzione spaziale di circa  $1/32^\circ$  corrispondente a circa 3-4 km di risoluzione. La scelta del modello e le caratteristiche della sua implementazione saranno valutate sulla base dei risultati ottenuti nei PAR precedenti e da quelli ottenuti nell'obiettivo B del presente progetto. Particolare attenzione sarà posta sulla scelta dei forzanti meteorologici, valutando, tra tutte le fonti disponibili, quelle che garantiranno il risultato migliore in termini di affidabilità e attendibilità.

#### Risultati/Deliverable:

- Valutazione dei forzanti atmosferici disponibili in termini di affidabilità e attendibilità
- Sviluppo del modello di previsione del moto ondoso
- Implementazione di modelli numerici per la simulazione del moto ondoso caratterizzati da risoluzione spaziale diversa (da poche centinaia di metri a poche decine di metri) e diversi forzanti atmosferici.

- Verifica del rapporto massimo possibile tra risoluzione del forzante atmosferico e griglia computazionale
- Produzione di mappe di energia per le aree portuali di interesse
- Rapporti tecnici di sintesi dei risultati ottenuti

Principali collaborazioni: Università Mediterranea di Reggio Calabria

Durata: ottobre 2012 - aprile 2013

## **b. Ottimizzazione di dispositivi U-OWC (*Oscillating Water Column*) e progettazione di test sperimentali**

### ***b.1. Approfondimento delle caratteristiche dei sistemi U-OWC (*Oscillating Water Column*) e dei power take-off a loro applicabili***

Durante questa fase progettuale saranno descritte in dettaglio le caratteristiche costruttive dei sistemi U-OWC. Uno spazio particolare sarà dedicato allo studio dei diversi sistemi di power take-off attualmente disponibili per gli impianti di conversione del moto ondoso in energia elettrica. Questo studio è propedeutico per le analisi di cui ai punti successivi.

### ***b.2 Ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione dello stato del mare***

La conoscenza del clima ondoso, in termini di tipologia di onde, di frequenza e di direzioni ad esse associate, per un'assegnata località di realizzazione di un dispositivo U-OWC diventa fondamentale non solo in fase di definizione della configurazione dell'opera civile del sistema stesso ma anche per ciò che compete l'interazione della parte attiva dell'opera (condotto verticale e camera di assorbimento) con le parti elettromeccaniche (sistemi di turbine e generatori) atte a convertire l'energia ondosa in energia elettrica.

I dati di clima d'onda prodotti nel corso del precedente obiettivo *b.1* saranno utilizzati per definire e ottimizzare il dimensionamento e le caratteristiche idro-dinamiche del prototipo per alcuni porti italiani di interesse. Al fine di verificare le prestazioni di un dispositivo U-OWC ottimizzato per diversi regimi d'onda saranno implementate cinque serie di analisi/verifiche:

1. Verifica idraulica dell'impianto sotto l'azione delle onde estreme
2. Stima della produzione di energia elettrica per un assegnato stato di mare attraverso simulazioni numeriche delle fluttuazioni di pressioni prodotte dalle onde irregolari generate dal vento
3. Stabilità globale del sistema U-OWC
4. Stabilità dei cassoni in fase di trasporto e rimorchio
5. Predimensionamento delle pareti che delimitano la camera di assorbimento e il condotto verticale.

### ***b.3 Sviluppo di modellistica fluidodinamica per l'ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione del dispositivo di power take-off applicato***

L'attività prevista nel presente obiettivo è dedicata allo studio fluidodinamico della colonna d'aria all'interno del cassone di un dispositivo U-OWC. Sulla base dei dati di input derivati dallo studio idrodinamico svolto nel precedente obiettivo sarà selezionato il codice di calcolo più idoneo allo studio (ad esempio Fluent o altro), sarà applicata la geometria di un U-OWC e saranno simulate le condizioni di funzionamento del volume d'aria a monte del dispositivo di power take-off.

L'obiettivo di queste simulazioni è di individuare soluzioni alternative per il dimensionamento ottimale dal punto di vista energetico del dispositivo. L'attività sarà condotta in stretta collaborazione con l'Università di Reggio Calabria mediante continuo scambio di dati e integrazione dei risultati teorici e sperimentali ottenuti al fine di individuare configurazioni ottimali per l'ambiente mediterraneo. Saranno svolti test di laboratorio per validare preliminarmente il modello di simulazione in attesa della validazione finale sul prototipo in scala.

### ***b.4 Progettazione di test sperimentali da realizzare su modelli in scala di dispositivi U-OWC ottimizzato per la validazione degli esperimenti numerici eseguiti***

Il presente obiettivo è dedicato alla progettazione di un'attività sperimentale volta a verificare i risultati ottenuti nell'ambito dell'obiettivo precedente. La progettazione delle attività sperimentali sarà finalizzata

ad esperimenti da eseguirsi nel Laboratorio Naturale di Ingegneria Marittima NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Tali esperimenti di campo a piccola scala nel mare di Reggio Calabria saranno finalizzati a valutare le prestazioni di un modello in scala di REWEC3 (un tipico dispositivo U-OWC), e verificare allo stesso tempo i risultati numerici ottenuti.

Più in dettaglio, l'attività sperimentale sarà finalizzata a verificare il modello fluidodinamico del REWEC3; tali verifiche andranno condotte sia in condizioni 'ordinarie', con mari frequenti nel paraggio in esame e significativi dal punto di vista energetico, sia in condizioni estreme, al fine di determinare il comportamento dell'impianto REWEC in condizioni ondose estreme. Tali verifiche sperimentali saranno indispensabili per verificare la bontà dei modelli adottati nelle due distinte condizioni nelle quali l'impianto REWEC3 può operare. Le onde estreme sono indispensabili per inquadrare il comportamento dell'impianto e per garantirne il funzionamento in condizioni di sicurezza. Il progetto delle attività sperimentali dovrà poi essere eseguito considerando differenti configurazioni di interesse per la realizzazione di cassoni REWEC3, modificando le dimensioni, la profondità del fondale.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sulle caratteristiche costruttive degli U-OWC, compresi i power take-off
- Definizione degli stati di mare climatici per alcuni porti di interesse
- Rapporto tecnico sull'ottimizzazione di un dispositivo U-OWC in funzione degli stati del mare
- Sviluppo del modello fluidodinamico
- Rapporto sui test di laboratorio condotti
- Rapporto tecnico sull'ottimizzazione di un dispositivo U-OWC in funzione del dispositivo di power take-off considerato
- Progetto esecutivo di test sperimentali da realizzare su modelli in scala del REWEC3

Principali collaborazioni: Università Mediterranea di Reggio Calabria

Durata: dicembre 2012- settembre 2013

#### **c. Misure di corrente nello Stretto di Messina**

Nell'ambito dell'analisi delle potenzialità della fonte energetica rinnovabile marina, l'individuazione e la caratterizzazione delle località più interessanti per lo studio, la sperimentazione e successivamente l'installazione di sistemi per lo sfruttamento di tale energia è sicuramente una fase di fondamentale importanza. In questo contesto, al fine di caratterizzare al meglio il sito dello Stretto di Messina, la cui importanza è dunque chiara anche dalle analisi numeriche prodotte da ENEA nel corso del precedente PAR, è necessario eseguire una serie di analisi fondamentali per la caratterizzazione specifica del sito individuato per una possibile installazione di uno strumento di conversione delle correnti di marea.

Nello specifico, le tre linee di approfondimento da affrontare sono:

- analisi del fondale per valutare la massima area disponibile ad essere sfruttata e per caratterizzare la tipologia geologica;
- campagna di misura di correnti e onde sia per validare le stime ENEA sia per conoscere i reali limiti di installazione relativi alle differenti tipologie di sistemi (installati in superficie, a mezz'acqua, sul fondo, etc.);
- studio tecniche di ancoraggio per vagliare le migliori modalità di sfruttamento dell'area.

In particolare nel corso della seguente fase progettuale sarà condotta una campagna di misura che avrà un doppio vantaggio. Il primo è quello di caratterizzare la corrente e le onde che interessano l'area e quindi valutare la potenzialità dei diversi sistemi di sfruttamento energetico da poter installare, per prediligere una tecnologia su altre o per canalizzare le risorse di sviluppo su particolari aspetti di alcune tecnologie. In secondo luogo, sarà possibile validare l'ampia mole di dati stimati numericamente dall'ENEA e dunque certificare la bontà del sistema di calcolo utilizzato per poter estendere la stima, di qualità ormai nota e misurata, anche alle aree in cui non sarà possibile installare un sistema di misura.

Risultati e deliverable:

- Campagna di misura delle correnti di marea in un punto specifico dello stretto di Messina
- Validazione del modello di circolazione dello stretto di Messina
- Rapporto tecnico

Principali collaborazioni: Università degli Studi di Napoli "Federico II"

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**d. Studi per la progettazione di un sistema *point absorber* in scala reale da 60 kW**

Partendo dai risultati ottenuti dalle verifiche sperimentali condotte sul sistema prototipale dal Politecnico di Torino, nel corso di questa fase progettuale saranno analizzati alcuni aspetti della progettazione di un sistema di conversione di tipo *point absorber* denominato ISWEC a scala 1:1 da 60 kW. Nello specifico durante la fase progettuale saranno considerati i seguenti punti:

- definizione del punto di progetto in funzione delle caratteristiche del moto ondoso del sito di installazione presunto (Pantelleria);
- adattabilità del sistema di conversione dell'energia a diverse lunghezze d'onda;
- minimizzazione dei consumi del sistema giroscopico. L'utilizzo di un'architettura giroscopica particolare con cuscinetti a basso attrito e tecnologia del vuoto unita a una logica di gestione della velocità angolare permette un'ottimizzazione dei consumi energetici;
- realizzazione di generatori elettrici dedicati;
- sviluppo di logiche di controllo idonee all'applicazione. Le logiche devono essere adattabili con logica "wave by wave" in modo da massimizzare la potenza prodotta;
- analisi di strutture galleggianti risonanti con la frequenza dell'onda, in grado di massimizzare il moto di beccheggio indotto dall'interazione con il moto ondoso.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sugli studi preliminari per la progettazione di un sistema ISWEC a scala 1:1

Principali collaborazioni: Politecnico di Torino

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**Comunicazione e diffusione dei risultati**

Saranno descritti in dettaglio i risultati ottenuti, che saranno resi disponibili sul sito web ENEA dedicato al progetto. Le attività saranno integrate con quelle svolte a livello europeo all'interno del progetto congiunto EERA "Marine Energy". In particolare, nel corso del progetto ENEA parteciperà ai diversi workshop internazionali che saranno di volta in volta predisposti in ambito EERA. ENEA continuerà inoltre ad agire come coordinatore a livello nazionale delle attività dei diversi centri di ricerca e Università che intenderanno partecipare al "Joint Programme" EERA sull'energia dal mare. Infine sarà organizzato un workshop sul tema dell'energia dal mare che vedrà la partecipazione dei principali esperti italiani del mondo universitario e della ricerca e di società di sviluppo con interessi nel settore.

**PROGETTO B.1.4 “Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso”**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficari (U)	
a	Sviluppo di modelli meteo-marini	1582	87	10	8	0	2	0	107
b	Ottimizzazione di dispositivi U-OWC ( <i>Oscillating Water Column</i> ) e progettazione di test sperimentali	709	39	0	35	0	2	30	106
c	Misure di corrente nello Stretto di Messina	273	15	0	0	0	1	20	36
d	Studi per la progettazione di un sistema <i>point absorber</i> in scala reale da 60 kW	364	20	0	0	0	1	30	51
<b>TOTALE</b>		<b>2928</b>	<b>161</b>	<b>10</b>	<b>43</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>80</b>	<b>300</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie

## IL QUADRO DI RIFERIMENTO

### Descrizione del prodotto dell'attività

Il passaggio ad un sistema energetico low-carbon basato su una massiccia penetrazione delle fonti rinnovabili sarà un processo graduale che vedrà ancora, nel breve termine, l'utilizzo di combustibili fossili, principalmente gas naturale e carbone, che rappresentano al momento le fonti energetiche più economiche. E' necessario quindi un grande sforzo di ricerca sui sistemi di cattura e sequestro dell'anidride carbonica, per evitare di incidere negativamente sulle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera. Il programma, che tiene conto dello stato dell'arte e delle prospettive per il nostro Paese, è articolato in linee progettuali che riguardano principalmente: l'efficienza energetica nello sfruttamento del combustibile (sia esso gas naturale o syngas prodotto da processi di gassificazione, che direttamente carbone), lo sviluppo di tecnologie CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) in scala di laboratorio e pilota, l'integrazione di processi e il supporto ad attività di dimostrazione.

Il presente progetto ha per finalità lo sviluppo, la validazione teorica e sperimentale e la dimostrazione su scala significativa di un ventaglio di tecnologie innovative per l'impiego sostenibile di combustibili fossili, sia per la produzione di elettricità con ridotte emissioni di gas serra, sia per la produzione di combustibili liquidi o gassosi (nel caso di carbone). Elemento comune per la sostenibilità ambientale di tali combustibili, è rappresentato, dall'incremento di efficienza dalla contestuale separazione della CO<sub>2</sub> e il suo successivo stoccaggio o riutilizzo (tecnologie CCUS: Carbon Capture Utilization and Storage).

Il Progetto comprende sia attività di nuova impostazione sia attività a prosecuzione e completamento di quelle condotte nelle precedenti annualità.

Il "panel" di tecnologie proposte è caratterizzato da un diverso grado di maturità, pertanto alcune di queste, con un orizzonte applicativo nel breve-medio termine, vengono applicate e studiate su facility di prova di pre-industriale, per altre, caratterizzate da soluzioni tecniche più avanzate e innovative, sia in termini di prestazioni energetiche che ambientali, si punta alla loro dimostrazione in scala di laboratorio, essendo infatti indirizzate a soluzioni nel medio-lungo periodo.

Vista la complessa articolazione del progetto, il risultato di esso è rappresentato da un ventaglio di prodotti, riassumibili in:

- sperimentazione di tecnologie di cattura più mature (tipicamente post-combustione) su impianti sperimentali avanzati, presenti in ENEA, volte in particolare alla riduzione dei costi delle stesse ed alla loro controllabilità;
- sviluppo e dimostrazione di una innovativa tecnica di pirolisi e separata gassificazione, per il trattamento di carboni di basso rango;
- dimostrazione di una tecnologia innovativa di sequestro della CO<sub>2</sub> basata sull'impiego di sorbenti solidi ad alta temperatura, con contemporaneo gas-cleaning del syngas e produzione di idrogeno per applicazioni energetiche;
- sviluppo di solventi liquidi e di sorbenti solidi della CO<sub>2</sub>, caratterizzati da una maggior efficienza di cattura, ciclabilità e minor tossicità;
- sviluppo di metodologie innovative per il trattamento dei combustibili gassosi (syngas da carbone o di opportunità) e la loro purificazione da inquinanti (composti dello zolfo, tar);
- ampliamento dello spettro di utilizzo di carboni di basso rango, con particolare riferimento al carbone Sulcis;

- messa a punto di tecnologie alternative al sequestro geologico, per il riuso della CO<sub>2</sub> separata, con produzione di combustibili e chemicals, e per la cattura in forma chimica;
- sviluppo di modelli descrittivi di fenomenologie complesse, che hanno come destinazione, oltre all'ovvia acquisizione di competenze, lo sviluppo di metodi di progettazione di componenti avanzati (gassificatori, reattori di carbonatazione, bruciatori, dispositivi di separazione della CO<sub>2</sub>, ecc.);
- sviluppo di bruciatori innovativi per turbine a gas, il cui impiego è comunque intimamente connesso alle tecnologie CCS, caratterizzati da tecniche di combustione più avanzate, a più alta efficienza e stabilità, e meno inquinati;
- studio delle problematiche di instabilità legate all'impiego energetico di syngas a basso potere calorifico volumetrico perché ricchi di idrogeno, prodotti in processi di gassificazione;
- sviluppo di diagnostica e di sistemi di controllo principalmente per le fasi di gassificazione e combustione;
- sviluppo e test di cicli turbogas innovativi di tipo "capture ready";
- acquisizione di competenze "sul campo" relative alla gestione di una rete di monitoraggio di un sito di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> (acquiferi salini profondi in strati carboniferi del bacino Sulcis) con metodi tradizionali, e sviluppo di metodologie innovative di monitoraggio;
- assicurare, in collaborazione con il MSE, una presenza tecnicamente qualificata in sedi internazionali quali: Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), gruppi di lavoro della IEA, European Energy Research Alliance (EERA), ecc.

Le tecnologie più innovative, volte ad una applicazione nel medio termine, saranno concentrate su due grosse piattaforme sperimentali: la Piattaforma Zecomix, finalizzata allo studio di processi più innovativi di decarbonatazione con sorbenti solidi e trattamento gas, in linea con le più avanzate ricerche internazionali, e l'impianto AGATUR per lo studio di cicli termodinamici avanzati imperniati su una microturbina a gas da 100 kWe.

Numerosi saranno gli istituti di ricerca universitari coinvolti nelle attività di ricerca, coordinati dall'ENEA.

### ***Situazione attuale del prodotto dell'attività***

E' consapevolezza unanimemente condivisa che le tecnologie CCS, stante l'ancora massiccio impiego di combustibili fossili, rappresentino lo strumento chiave per contrastare i cambiamenti climatici attualmente in atto. L'utilizzo di tecnologie CCS può ridurre dell'80-90% le emissioni di CO<sub>2</sub> causate dagli impianti di potenza, a scapito tuttavia di una penalizzazione energetica (e quindi anche economica) dell'ordine di 8-10 punti percentuali in termini di efficienza.

Nel settore della Ricerca e Sviluppo delle tecnologie 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 impianti di potenza in fase di progetto (impianti "capture ready"), dall'altra alla messa a punto di tecnologie completamente nuove che consentano di ottenere risultati prestazionali, in termini di efficienza e di costo, migliori di quelli ottenibili con tecnologie ritenute mature.

Molte delle tecnologie CCS sono già oggi disponibili ma hanno bisogno di essere integrate opportunamente con l'impiantistica di produzione per minimizzare le perdite energetiche ed i costi aggiuntivi ad esse associate. Ciò che manca è quindi una robusta attività di dimostrazione dell'esistente, per fornire indicazioni quantitative certe sui costi del sequestro, alle attuali tecnologie, che si affianchi ad una altrettanto significativa attività di ricerca di soluzioni più avanzate ed innovative, e per ciò stesso con orizzonti temporali non immediati.

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<sub>2</sub>. Sul fronte nazionale, ma in linea con gli indirizzi europei, una adeguata attività di R&S svolta dal sistema della ricerca pubblica e più in particolare dall'ENEA, consentirà di conseguire due obiettivi di interesse strategico, che si concretizzeranno nel contribuire efficacemente alla riduzione delle



emissioni italiane di CO<sub>2</sub> e nel consentire al sistema industriale nazionale di competere in campo internazionale con i principali attori tecnologici nel prossimo futuro.

## ***Stato attuale delle tecnologie***

### Cattura post-combustione

L'opzione cattura a valle della combustione implica l'utilizzo di sistemi di assorbimento chimico della CO<sub>2</sub> 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).

Dal punto di vista della maturità tecnologica, i sistemi a post-combustione sono sicuramente quelli che presentano la maggiore maturità grazie all'esperienza acquisita nei settori oil&gas e in quello del trattamento di gas esausti in piccola scala. Anche se non ottimizzati per l'impiego in impianti CCS, tutti i componenti sono al momento commercialmente disponibili. Tale tecnologia è peraltro l'unica adatta ad essere applicata ad impianti esistenti in retrofit, previa naturalmente verifica delle disponibilità di spazio, visto gli elevati volumi necessari. I principali svantaggi sono rappresentati dai costi d'impianto elevati, legati alle ingenti quantità di gas da trattare, in gran parte costituito da azoto (non presente nei gas trattati nelle configurazioni alternative), e dall'alta penalizzazione energetica dovuta alla rigenerazione dei solventi.

Ulteriori significativi miglioramenti sono però richiesti per abbattere a monte la concentrazione di SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e particolato che riducono l'efficienza di assorbimento dei solventi, generalmente a base di ammine. E' comunque necessaria una dimostrazione della tecnologia con un significativo aumento di scala dell'impianto associata ad una significativa riduzione dei costi dell'energia prodotta. L'obiettivo è quello di minimizzare i costi della cattura della CO<sub>2</sub>, attraverso lo sviluppo di una tecnologia, applicabile ad impianti già operativi e/o nuovi, con rilevante impatto sul mercato per l'attenzione posta al costo di investimento, alle prestazioni dell'impianto e quindi al costo dell'energia prodotta, con una riduzione significativa delle emissioni riferite a quelle di un gruppo termoelettrico Ultra Super Critico di taglia standard (es. 660 MWe).

Il punto cruciale, che determinerà la convenienza economica, è legato allo sviluppo di nuovi solventi che riducano significativamente il costo energetico dovuto alla rigenerazione termica. Ciò vale sia per gli impianti a carbone Super Critici e Ultra Super Critici, che per gli impianti ciclo combinato alimentati a gas naturale, dove si ha una maggiore penalizzazione a causa della minore concentrazione di CO<sub>2</sub> nei fumi.

### Cattura pre-combustione

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

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<sub>2</sub> 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).

Il componente chiave è rappresentato dalla sezione di assorbimento e rigenerazione del solvente/sorbente sul quale hanno però notevole influenza il sistema di desolforazione e quello di CO-shift.

Il risultato atteso dallo sviluppo di impianti pilota e dimostratori è la realizzazione di prodotti ad alta innovazione tecnologica, ottenuta attraverso l'incremento delle prestazioni in termini di migliore efficienza di cattura della CO<sub>2</sub>, migliore flessibilità nell'utilizzo di diversi tipi di combustibili, maggiore durata dei catalizzatori e dei "chemicals" impiegati.

Una significativa ricaduta sarà l'esperienza maturata nella progettazione, realizzazione e gestione operativa di questa tipologia di impianti, caratterizzati da un maggiore rendimento nella produzione di energia da

carbone “Zero Emissions” e da una riduzione dei costi, sia di investimento che operativi. Ulteriori applicazioni sono individuabili negli impianti IGCC alimentati con tar residui della raffinazione dei prodotti petroliferi.

### Cattura attraverso ossi-combustione

Il metodo di cattura della CO<sub>2</sub> che utilizza la combustione con ossigeno, rappresenta la terza via tra le possibili opzioni oggi più promettenti. A valle della produzione del calore di combustione utilizzato nel ciclo termodinamico, si genera un efflusso di gas molto ricco in CO<sub>2</sub> che, dopo la fase di rimozione dei principali inquinanti e la condensazione del vapor d’acqua in esso presente, può essere inviato, eventualmente già pressurizzato, allo stoccaggio.

Il componente chiave è rappresentato dal combustore a ossigeno (che gioca il ruolo di comburente) e dalla sua integrazione in un impianto a vapore di tipo supercritico o in un sistema basato su turbina a gas che operi in cicli avanzati.

La tecnologia potrà essere utilizzata per future centrali ad emissioni zero con efficiente integrazione del sistema di produzione dell’ossigeno (la riduzione dei costi impone lo sviluppo di tecnologie alternative a quella criogenica in uso), del sistema di generazione di vapore e di quello di cattura della CO<sub>2</sub>.

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

Il successo della CCS quale strumento per la lotta al cambiamento climatico è fortemente dipendente, oltretutto dalla tecnologia impiantistica di cattura, dalla capacità di modellazione dei recettori geologici e dalla sicurezza dello stoccaggio.

Al di là delle considerazioni sui costi, sull’efficienza e sull’impatto dei sistemi energetici integrati di produzione, aspetti pur fondamentali, l’impiego della CCS è vincolato, in primis, alla garanzia della gestione dei rischi ambientali della tecnologia. Il monitoraggio è la chiave di volta del possibile successo. Le tecniche di monitoraggio trovano applicazione nella fase sperimentale di ricerca e qualificazione del sito, in quella commerciale di sfruttamento, e infine nel confinamento della CO<sub>2</sub> per tempi tali da non compromettere l’efficacia di mitigazione climatica del sequestro. A questo scopo grande importanza riveste, oltre allo sviluppo e sperimentazione di metodologie di monitoraggio più efficaci, l’esperienza condotta in progetti dimostrativi a livello nazionale ed internazionale.

### Tecnologie alternative di riutilizzo della CO<sub>2</sub> prodotta

Lo sviluppo di tecnologie per la cattura della CO<sub>2</sub> ha determinato il parallelo sviluppo delle corrispondenti tecnologie per il suo stoccaggio definitivo in siti geologicamente stabili, come unico rimedio proposto per la rimozione delle enormi quantità di gas in gioco. Tralasciando di considerare i problemi connessi alla sicurezza di tale operazione, è interessante notare come il 27% della massa di CO<sub>2</sub> che viene sequestrata sia costituita da carbonio. Sembra perciò ragionevole porsi il quesito se esistano tecnologie possibili per un riutilizzo di questa enorme quantità di carbonio, e di quando le condizioni a contorno rendano tale riutilizzo conveniente.

L’utilizzo della CO<sub>2</sub> come materiale di partenza può infatti rappresentare un importante contributo al riciclo del carbonio. La CO<sub>2</sub> derivante da impianti di potenza o da processi industriali particolarmente energivori (cementifici, acciaierie, ...) può essere impiegata per la sintesi di prodotti chimici di base, la sintesi di polimeri, la sintesi di combustibili (metano, metanolo, ...). Dal punto di vista quantitativo, l’applicazione più rilevante è certamente la sintesi dei combustibili poiché sono questi i prodotti che hanno un mercato più vasto e perché rappresentano un modo di stoccare chimicamente l’energia prodotta da fonti rinnovabili o di accumulare l’energia prodotta nei periodi di minore richiesta. La sintesi di combustibile infatti richiede la riduzione della CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> che a sua volta può essere ottenuto dall’acqua per elettrolisi alimentata da fonte rinnovabile.

### Efficienza degli impianti di produzione elettrica

L’interesse a questo tema, nell’ambito del programma, è strettamente finalizzato:

- all'ottimizzazione dello sfruttamento energetico del combustibile, sia esso carbone in processi di ossi-combustione, che gas naturale o syngas prodotto da processi di gassificazione;
- allo sviluppo di cicli energetici ad alta efficienza "capture ready".

Tra le tecnologie di punta nel settore della combustione, fanno spicco la combustione MILD e l'ossi-combustione, per quanto attiene la combustione di solidi, e la combustione premiscelata e ancora MILD, per quanto riguarda la combustione di gas.

La combustione MILD, ovvero con comburente estremamente diluito (bassa concentrazione di ossigeno), a cui sono associate alta efficienza, stabilità e bassissime emissioni, è alla ricerca della dimostrazione pratica dell'applicabilità ai settori non tradizionali (caldaie e turbine a gas). Particolarmente carente risulta la disponibilità di modellistica idonea alla simulazione della particolare fenomenologia.

L'ossi-combustione, dal canto suo, eventualmente operata in condizioni MILD per contenere le emissioni, necessita pure di una modellistica adeguata per la descrizione della combustione tipicamente eterogenea (solido-gas o solido-liquido-gas).

Infine la combustione premiscelata, specie se di syngas idrogenati, derivanti non a caso dalla gassificazione di carbone, è affetta da problematiche legate alla instabilità di combustione, ed in particolare alla carenza di diagnostica adeguata per il monitoraggio ed il controllo, nonché di metodi numerici avanzati di simulazione per la progettazione.

L'impiego di syngas, con tenori elevati di idrogeno, in combustori di turbine a gas, determina infine l'esigenza di esperite nuove filosofie di combustione come la tecnologia Trapped Vortex, e lo sviluppo di omonimi bruciatori che realizzino ancora condizioni di combustione MILD.

Per quanto riguarda i Cicli energetici ad alta efficienza "capture ready", un settore di ricerca aperto riguarda lo sviluppo di cicli turbogas non convenzionali. Punto di partenza è rappresentato dai cicli "a umido", ottenuti mediante l'iniezione in turbina di vapore od acqua surriscaldata, con l'intento di incrementare l'efficienza del ciclo di potenza, ottenendo nel primo caso un ciclo Steam Injected Gas turbine (STIG), nel secondo un ciclo Evaporative Gas Turbine (EGT).

Rimanendo nell'ambito dei cicli turbogas non convenzionali, un tema di particolare interesse è costituito dallo sviluppo di cicli termodinamici basati sulla combustione in atmosfera sintetica  $CO_2/O_2$  con eventuale iniezione di vapore. In un ciclo di tal genere la  $CO_2$  è il fluido di lavoro che viene elaborato dalla macchina, con l'aggiunta dell'ossigeno necessario a sostenere la combustione. Il vantaggio principale consiste nella possibilità di estrarre agevolmente la  $CO_2$  generata con la combustione per avviarla al sequestro, agevolazione dovuta al fatto che la  $CO_2$  è praticamente pura, se si esclude l'acqua prodotta con l'ossidazione del combustibile e la completa assenza di azoto.

L'iniezione di acqua surriscaldata o vapore, rappresenta la sintesi di quanto sopra, permettendo di ottenere i vantaggi citati con riferimento ai cicli STIG o EGT con, in questo caso, le prerogative dei cicli zero emission, la  $CO_2$  sarebbe infatti facilmente separata per condensazione, con il conseguente recupero dell'acqua iniettata nel ciclo.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### **Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali**

#### **Piano triennale 2006-2008**

##### Sperimentazione e ottimizzazione della gassificazione

Sono state approfondite le fenomenologie legate a diversi processi di gassificazione del carbone (gassificazione con aria, ossigeno  $CO_2$ , idrogassificazione con  $H_2$ ) mediante la sperimentazione nelle piattaforme sperimentali di Sotacarbo ed ENEA e mediante test di laboratorio. Si è inoltre progettato e realizzato un innovativo gassificatore a letto fluido per carboni di basso rango come quello del Sulcis. Sono

stati allestiti laboratori per la caratterizzazione chimico-fisica di carboni. Sono stati condotti studi sulla cinetica chimica del processo di gassificazione e combustione di carbone.

### Trattamento del syngas

Per quanto riguarda i processi di trattamento del syngas si sono analizzati processi di cattura della CO<sub>2</sub>, di CO-shift e di desolfurazione, utilizzando sia tecnologie avanzate (ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi) sia tecnologie applicabili più a breve termine. Sono stati condotti studi e sperimentazioni sull'uso di sorbenti solidi della CO<sub>2</sub> per la contemporanea desolfurazione a caldo di syngas. Sono stati avviati studi sperimentali relativi alla cattura CO<sub>2</sub> e gas cleaning in cicli CaO-CaCO<sub>3</sub>. Sono state condotte le prime sperimentazioni su scala significativa di processi di gassificazione con produzione di idrogeno, sua combustione e generazione di energia elettrica.

### Ossi-combustione

Per quanto riguarda la tecnologia ossi-combustione, si sono sviluppati modelli sia Reynolds Average Navier Stokes (RANS) che Large Eddy Simulation (LES) per la simulazione di reattori di ossi-combustione e lo studio delle fenomenologie associate, comprese quelle legate alla produzione di inquinanti (composti dello zolfo, tar). E' stato effettuato uno studio parametrico e di sensitività relativo alla termo fluidodinamica e chimica della combustione MILD in condizioni di ossi-combustione pressurizzata. Sono stati avviati studi sulla modellazione della combustione trifase (solido-liquido-gas) con modelli e codici avanzati. Sono state condotte analisi di ciclo relative all'implementazione di dispositivi ad ossi-combustione, e cicli H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>-aria arricchita. È stata messa a punto una tecnologia innovativa per il pompaggio dello slurry di acqua e carbone. Si è proceduto alla qualificazione e l'ingegnerizzazione di dispositivi di misura non invasivi, basati sulla tecnologia ODC (Optical Diagnostic of Combustion). Sono state condotte campagne sperimentali su un banco di prova operante in condizioni di ossi-combustione pressurizzata (ISOTHERM-PWR di SOFINTER S.p.A.) per la validazione di codici e lo sviluppo di strumentazione speciale.

### Sequestro della CO<sub>2</sub>

Per quanto riguarda infine i processi di sequestro della CO<sub>2</sub>, sono state effettuate prime analisi delle potenzialità sia del confinamento geologico nel Sulcis (prevalentemente mediante tecnologia ECBM ma con attenzione anche all'acquifero salino sottostante) sia della cosiddetta "Mineral Carbonation", con possibile utilizzo di residui industriali alcalini. È stato condotto lo studio di fattibilità e la progettazione di massima di un impianto dimostrativo innovativo, alimentato a carbone, per la produzione combinata di elettricità e idrogeno, con cattura della CO<sub>2</sub> nel bacino del Sulcis.

### Attività di "advisor" per MSE

E' stato assicurato il contributo a numerose iniziative a livello internazionale volte ad intensificare la collaborazione fra i diversi Paesi per lo sviluppo e dimostrazione delle tecnologie CCS e CCT. In particolare, si è partecipato al Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), alla piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), all'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center" e al Joint Program sulle CCS in ambito European Energy Research Alliance (EERA).

## **Piano triennale 2009 - 2011**

### Sperimentazione e ottimizzazione della gassificazione

Un'importante attività sperimentali sulla gassificazione del carbone in letto fisso è stata condotta presso gli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo con il coordinamento e la partecipazione di ENEA. Tale attività, circa 800 ore di funzionamento a caldo, distribuite in oltre 40 avviamenti, è stata operata con differenti agenti gassificanti (aria, aria arricchita con ossigeno, vapore e CO<sub>2</sub>) e in differenti condizioni di funzionamento, tese alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature. Nel corso del triennio sono state effettuate una serie di migliorie degli impianti preesistenti, inserendo opportunamente nuova componentistica e modificando alcune sezioni e sistemi ausiliari in modo da poter

effettuare sperimentazioni più accurate e con funzionamento stabile ed in continuo. Importanti sperimentazioni hanno riguardato il sistema di pulizia del syngas con l'inserimento di componenti innovativi.

Per quanto riguarda il trattamento e l'utilizzo del gas prodotto si è sperimentato l'uso di diverse ammine per la cattura della CO<sub>2</sub>, e di un motogeneratore per la produzione elettrica. Sono stati inoltre effettuati test di co-gassificazione di carbone con biomasse. Il sistema di acquisizione e controllo, di tipo tradizionale, è stato grandemente potenziato inserendo misure di temperatura della griglia, del livello del letto di carbone nel gassificatore e del contenuto di particolato nel syngas. Per quanto riguarda la gestione del processo di gassificazione, si è proceduto a modificare il profilo interno del letto di carbone, con un conseguente beneficio sulla stabilità e continuità del processo di gassificazione.

Con l'ottica di migliorare il processo di gassificazione nelle sue criticità di esercizio sono stati eseguiti test sperimentali presso il mini impianto di gassificazione di Casaccia (impianto GESSYCA), ed è stato progettato e realizzato un nuovo gassificatore opportunamente predisposto all'attività di ricerca e per lo sviluppo di opportune metodologie di controllo automatico del processo.

#### Processi integrati di gassificazione/pirolisi per la pulizia di syngas da carboni di basso rango

L'attività svolta ha come fine la messa a punto di un processo innovativo di pre-trattamento e produzione di syngas pulito, di qualità migliore rispetto ai tradizionali processi di gassificazione di carbone di basso rango, e di char a basso contenuto di zolfo, basato sul fatto che durante la pirolisi del carbone possono avvenire processi di de-solforazione e de-nitrogenazione che riducono notevolmente le emissioni di SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> nell'ambiente.

L'attività sperimentale di laboratorio ha riguardato principalmente lo studio del processo di pirolisi del carbone Sulcis in due differenti atmosfere di N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> impiegando un forno a quarzo riscaldato a velocità programmata e mediante un analizzatore termo gravimetrico (TGA). I gas in uscita sono stati analizzati mediante spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR) per ottenere profili di evoluzione simultanea e dinamica dei gas liberati durante la pirolisi. Infine il residuo solido della pirolisi condotta in atmosfera inerte di azoto e in atmosfera riducente di idrogeno sono stati sottoposti al processo di idrogassificazione a pressione di 5,0 MPa di idrogeno. L'evoluzione di composti a base di zolfo e di azoto sono stati monitorati nel tempo per un miglior confronto tra i due processi di pirolisi. È stato studiato il possibile utilizzo di sorbenti a base di dolomite sia come catalizzatori delle reazioni di cracking del tar sia come assorbitori di CO<sub>2</sub> e di composti solforati (H<sub>2</sub>S). La sperimentazione è stata effettuata utilizzando le attrezzature dei laboratori chimici del C.R. Casaccia per la caratterizzazione di sorbenti e catalizzatori, e del C.R. Trisaia, con particolare riferimento ad un forno rotante da banco, per le prove di pirolisi, sul quale sono stati effettuati test di pirolisi del carbone del Sulcis variandone i parametri operativi (temperatura, pezzatura carbone, tempo di residenza, portata e tipologia gas di trasporto) e caratterizzandone sia i prodotti gassosi che il solido residuo (char e ceneri).

È stato progettato e realizzato un mini-impianto presso C.R. Casaccia (Impianto VALCHIRIA) per lo studio dell'intero ciclo integrato.

#### Produzione di combustibili liquidi (CTL) e gassosi (H<sub>2</sub>) con cattura della CO<sub>2</sub>

L'attività ha riguardato lo 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<sub>2</sub>. E' stata condotta l'analisi di sistema e la modellazione di un impianto CTL di taglia dimostrativa con l'utilizzo di codici di tipo commerciale e ne è stata valutata una possibile applicazione presso gli impianti della Piattaforma Pilota. Presso il Politecnico di Milano, è stata sviluppata la progettazione di un banco di prova sperimentale, su scala laboratorio, che ha poi condotto a diversi test sperimentali di produzione di combustibili liquidi realizzati in laboratorio operando con catalizzatori a base di ferro. Presso l'Università di Pisa è stata implementata una codicistica ad hoc di modellazione del processo Fischer-Tropsch integrata con il codice di simulazione ottimizzato del gassificatore a parametri distribuiti.

### Cattura della CO<sub>2</sub> ad alta temperatura mediante sorbenti solidi a base di ossido di calcio

È stato studiato un processo di cattura multi-ciclica della CO<sub>2</sub> e dell'H<sub>2</sub>S ad alta temperatura da correnti gassose (syngas) prodotto mediante un gassificatore di carbone a letto fluido con ossigeno attraverso l'uso di sorbenti solidi. Anche per la cattura della CO<sub>2</sub> con sorbenti solidi è stata scelta la tecnologia a "letto fluido" che garantisce l'omogeneità della temperatura nel volume del letto, un buon grado di mescolamento tra catalizzatore e sorbente della CO<sub>2</sub> e facilita la continuità del processo di cattura, favorendo la circolazione del solido verso il reattore di rigenerazione del sorbente.

Dal punto di vista teorico, il letto di particelle solide (sorbente e catalizzatore) è stato modellato secondo la teoria delle due fasi. In particolare la fase gas e la fase solida sono state differenzialmente modellate. I risultati dell'integrazione di questi modelli sono stati confrontati con dati pubblicati in letteratura ottenendo una buona sovrapposizione. Dal punto di vista sperimentale, è stato sintetizzato un materiale sorbente per la cattura della CO<sub>2</sub> per mezzo della tecnica dell'idrolisi del CaO e testato differenti catalizzatori. A tal fine è stata effettuata una prima caratterizzazione di un sorbente altamente rigenerabile a base di CaO, disperso su una matrice di alluminato di calcio si è pervenuti a 500 cicli di assorbimento-rigenerazione, con una perdita di efficienza trascurabili.

Per quanto attiene all'impianto sperimentale ZECOMIX, piattaforma per lo studio dell'intero processo integrato, è stata completata la piattaforma, per sua natura, modulare. Sono stati effettuati i collaudi preliminari e test pratici funzionali per la messa a punto dei numerosi sottosistemi (gassificatore, carbonatatore/calcinatore, scrubber, generatore di vapore, torcia, sistemi di alimentazione varia, ecc.). Sono state effettuate prove preliminari di gassificazione, ed è stata avviata la fase dei collaudi funzionali dei principali componenti installati.

Le attività del primo biennio hanno portato alla selezione di un sorbente a base di dolomite calcinata, testandone l'efficacia fino al 15° ciclo con una perdita della capacità assorbente dell'ordine del 35%. L'obiettivo è quello di selezionare un sorbente migliore, con l'aggiunta di opportuni additivi, al fine di superare i 50 cicli con una perdita di capacità inferiore al 20%.

È stato formulato e sviluppato un modello di un reattore di decarbonizzazione a letto fluido per uno studio più dettagliato del processo di cattura della CO<sub>2</sub>. Una volta implementato, il modello può essere integrato in codici di calcolo commerciali per poterne utilizzare l'ampia libreria messa a disposizione per la simulazione di impianti, o in alternativa può essere distribuito come applicazione stand-alone potendo essere utilizzato, in tal modo, indipendentemente da una piattaforma software commerciale.

### Studi modellistico/sperimentali sui processi di cattura della CO<sub>2</sub> con solventi

L'attività sperimentale sul processo di cattura della CO<sub>2</sub> con solventi liquidi è stata condotta in laboratorio presso Sotacarbo ed ENEA, sia su syngas che emulano quelli prodotti in impianti di gassificazione, sia su effluenti gassosi emulanti fumi di combustione del polverino di carbone.

In quest'ambito è stato allestito in laboratorio, presso Sotacarbo, un set-up sperimentale costituito da una colonna a riempimento in vetro e un sistema di misura delle concentrazioni dei gas effluenti. Le condizioni operative emulano quelle di pre- e di post-combustione, tipiche della cattura operata sul syngas proveniente dalla gassificazione del carbone e sui fumi provenienti dalla sua combustione. Sono stati effettuati test di assorbimento con differenti tipologie di ammine al variare dei principali parametri di processo quali la tipologia e la concentrazione di solvente, la tipologia e la composizione delle correnti gassose trattate, le portate delle correnti liquide e gassose ed il loro mutuo rapporto.

È stato ideato e testato, presso Casaccia, sulla base di attività di ricerca in laboratorio, un nuovo solvente che fa uso di resorcina in ambiente basico. Sono state studiate, in un sistema *home-made*, le condizioni sperimentali per operare tanto l'assorbimento quanto il desorbimento della CO<sub>2</sub>. Particolare attenzione è stata posta nella caratterizzazione di efficienza in assorbimento e nella successiva fase di rigenerazione. Il nuovo solvente può rappresentare un'alternativa concreta alle ammine. Sono state condotte analisi comparative e test prestazionali effettuati su diversi solventi compreso il nuovo.

In parallelo si è operata, al fine di supportare le attività sperimentali condotte sia nei laboratori che in scala più significativa sugli impianti ENEA/Sotacarbo, la modellazione del processo di cattura della CO<sub>2</sub> con

l'utilizzo di diversi tipi di solventi liquidi (MEA, DEA, TEA, MDEA, SELEXOL, RECTISOL, etc.), sia puri che in miscela, disciolti in acqua a differenti concentrazioni.

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

È stato sviluppato un nuovo bruciatore avanzato per turbogas, di tipo Trapped Vortex, per la combustione stabile, efficiente, e a basse emissioni di syngas ricchi di idrogeno, provenienti da impianti operanti in modalità "pre-combustion carbon capture". La tecnologia proposta è alternativa alle migliori tecnologie "lean-premix", ampliando il range di funzionamento stabile di esse anche in condizioni di off-design (avviamento, regolazione). Sono state condotte sperimentazioni su un modello definito di "prima generazione", effettuate sull'impianto MICOS di ENEA-Casaccia con l'ausilio di strumentazione speciale brevettata da ENEA, da cui sono state tratte informazioni utili alla progettazione di un bruciatore di disegno più avanzato, definito di "seconda generazione", installabile su turbine commerciali di Ansaldo Energia. Attraverso il ricorso a simulazioni CFD, si è giunti alla progettazione del nuovo bruciatore che è stato realizzato e installato sull'impianto MICOS. Il nuovo bruciatore è caratterizzato da una geometria completamente innovativa. Elemento qualificante del progetto è l'articolato sistema di alimentazione di aria/gas che permette di realizzare un dominio regolare di combustione, caratterizzato dal forte ricircolo di prodotti di combustione che hanno l'effetto di stabilizzare la zona reagente, diluendo i reagenti freschi e limitando grandemente i picchi di temperatura. Questa configurazione ha l'effetto di minimizzare le emissioni di NO<sub>x</sub>, assicurando inoltre la più alta efficienza di combustione (sfruttamento massimo del potere calorifico e minimizzazione di CO e incombusti). All'attività ha collaborato l'Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale, con sperimentazioni a freddo per la messa a punto della geometria finale. Sono state effettuate prime prove sperimentali di validazione del nuovo progetto.

#### Messa a punto delle migliori tecnologie per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone

L'attività è stata finalizzata allo sviluppo di strumenti numerici per la simulazione di sistemi a ossi-combustione per la cattura di CO<sub>2</sub>, operanti in condizioni sia atmosferiche che pressurizzate. Sono stati sviluppati strumenti numerici per la simulazione, stazionaria e non, di flussi multifase in dispositivi di combustione a polverino di carbone di interesse industriale. In particolare gli sviluppi fisico-numerici sono stati finalizzati all'upgrade di modelli CFD-LES per la simulazione termo-fluidodinamica della combustione, in ambiente ricco di prodotti di combustione (CO<sub>2</sub> e vapore), di polverino di carbone tal quale o di uno slurry di acqua-carbone in ambiente pressurizzato.

Simulazioni RANS e LES finalizzate a tale scopo sono state realizzate nel corso del triennio, con particolare riferimento alla tecnologia ossi-combustione pressurizzata realizzata sull'impianto ISOTHERM PWR di SOFINTER Spa e su due facility di prova di IFRF, di tipo atmosferico (gli impianti IPFR e FOSPER), gestite dall'Università di Pisa nell'ambito di un accordo di collaborazione. L'attività è stata anche rivolta allo sviluppo ed ottimizzazione di diagnostica specifica e di diagnostica non invasiva brevettata da ENEA, tesa allo sviluppo di metodologie innovative per la caratterizzazione del processo, e la determinazione di grandezze chimico-fisiche dello stesso.

L'attività del triennio ha avuto come obiettivo la messa a punto dei modelli relativi alla descrizione di particolari aspetti del processo di combustione del carbone in condizioni "oxy", con forte ricircolo di prodotti di combustione, quali la devolatizzazione, la combustione di gas e di char, la produzione di inquinanti (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Soot). Tale attività ha avuto come riflesso importante la realizzazione di uno strumento CFD ENEA (Codice HeART) orientato allo studio della combustione di miscele mono e multifase. Nel corso del triennio HeART è stato arricchito di nuovi modelli fluidodinamici e chimici per lo studio dell'ossi-combustione del carbone. Tali modelli sono stati parzialmente validati con casi test di letteratura o mediante dati sperimentali provenienti dagli impianti summenzionati.

Data la grande dimensione e complessità dei domini geometrici da simulare, accanto allo sviluppo di modelli fisici, è stato necessario affrontare lo sviluppo di tecniche numeriche che rendessero accettabili i tempi di elaborazione. Questo argomento è stato oggetto di collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale (DIMA) dell'Università di Roma Sapienza, con il quale si è proceduto allo sviluppo e all'integrazione in "HeART" di una tecnica numerica di modellazione di un dominio fisico

complesso, che consente di connettere zone del combustore ad elevata risoluzione spaziale, a zone a bassa risoluzione spaziale, evitando la nascita di elementi di discontinuità

È stata poi condotta, in collaborazione con l'Università Federico II di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Chimica, lo studio delle strutture reattive locali in un bruciatore a polverino di carbone operante in condizione "flameless", supportato da misure di concentrazione, caratteristiche chimico-fisiche e funzione di distribuzione delle dimensioni del particolato prodotto nella combustione del polverino di carbone in un impianto pilota di ossi-combustione.

È stata infine condotta, in collaborazione con il Politecnico di Milano, Dipartimento DCMIC, una attività svolta alla realizzazione di un modello cinetico dettagliato di pirolisi, gassificazione, combustione della fase volatile e del char di carbone, in grado di descrivere il comportamento di tutte le componenti organiche della matrice carboniosa, in termini di C, H, O, N e S. Il tipo di approccio seguito è stato la realizzazione uno schema cinetico, basato sulla sola composizione elementare e la cui peculiarità risulta la capacità predittiva: non necessitano informazioni sperimentali per la sua messa a punto.

#### Studi su tecnologie di utilizzo e fissaggio della CO<sub>2</sub>

L'attività ha riguardato lo sviluppo della tecnologia di metanazione (conversione di CO<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub>) attraverso lo studio cinetico e termodinamico della reazione suddetta. Per lo studio, è stato allestito un primo apparato sperimentale, e dopo le prime indagini effettuate utilizzando gas (CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> e dell'H<sub>2</sub>, nella miscela di alimentazione, sulla resa finale della reazione. Sono state inoltre effettuate valutazioni sperimentali sugli effetti di avvelenamento, da parte di composti solforati (SO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>S), del catalizzatore, necessario per ottenere rese prossime al 100%, nell'intervallo di temperatura di interesse. È stato allestito un piccolo impianto dimostrativo, su scala laboratorio, che realizza con continuità la reazione, con accumulo del metano prodotto.

E' stata inoltre affrontata la tematica relativa all'utilizzo di ceneri e rifiuti industriali alcalini come sorbenti di CO<sub>2</sub>. In particolare è stato studiato il processo che prevede l'utilizzo della CO<sub>2</sub> per la carbonatazione di ceneri (fly-ash) e rifiuti industriali alcalini provenienti dal settore siderurgico. Al fine di accelerare la fissazione della CO<sub>2</sub> è stata studiata la termodinamica e cinetica del processo, individuando, su scala laboratorio, le condizioni operative ottimali per massimizzare il processo stesso.

#### Studio preliminare di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>

E' stato effettuato uno studio di pre-fattibilità relativo alla realizzazione di un impianto dimostrativo di produzione di energia da carbone con cattura e successivo stoccaggio dell'anidride carbonica prodotta in un idoneo sito localizzato nel bacino del Sulcis. È stata condotta un'approfondita analisi tecnico-economica per valutare possibili configurazioni alternative ed individuare la miglior soluzione per la realizzazione di un dimostrativo di media scala (300-450 MWe). Sono state considerate differenti soluzioni alternative (Ultra Supercritical Pulverized Coal Combustion - USPPC, Supercritical Circulating Fluidized Bed Combustion - CFBC, Supercritical Pressurized Fluidized Bed Combustion - PFBC e infine Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC). La scelta finale è ricaduta su un impianto a tecnologia USPPC

È stata inoltre avviata una campagna sperimentale finalizzata all'ottimizzazione di una rete di monitoraggio geochimica, definendo il "baseline" cioè i termini di riferimento rispetto ai quali individuare le eventuali fughe di CO<sub>2</sub> profonda. È stata condotta la sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico costituita da una serie di centraline con misura diretta delle concentrazioni e/o di flusso della CO<sub>2</sub>, del CH<sub>4</sub> e di altri parametri di interesse (quali temperatura, umidità, pH, Eh, concentrazioni in falda, etc.) sulla superficie, in mare e all'interno di pozzi o altre vie di accesso al sottosuolo.

#### Comunicazione e diffusione dei risultati

Sono state condotte attività specifiche di comunicazione e diffusione dei risultati ottenuti nel progetto, nonché attività di supporto ai Ministeri competenti attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali. Nel triennio è stato assicurato il contributo a numerose iniziative a livello internazionale volte ad intensificare la collaborazione fra i diversi Paesi per lo sviluppo e dimostrazione delle tecnologie



CCS e CCT. In particolare si è partecipato al Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), alla piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), ai gruppi di lavoro dell'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center" e all'European Energy Research Alliance (EERA) nell'ambito del Joint Program sulle CCS.

Sono stati inoltre organizzati i seguenti convegni

1. "Processes and Technologies for a Sustainable Energy" – Ischia 27-30 Giugno 2010; organizzato in collaborazione con la Italian Section of the Combustion Institute;
2. "Cattura e Sequestro della CO<sub>2</sub>: stato dell'arte e prospettive", Roma 14- 16 Settembre 2011 presso la Nuova Fiera di Roma, in occasione della manifestazione "Zero Emission – Rome 2011". Il convegno è stato organizzato da: ENEA, CO<sub>2</sub> Club, con la partecipazione dell'Osservatorio CCS;
3. "XXXIV Meeting of Italian Section of the Combustion Institute"- Roma 24-26 Ottobre 2011;
4. Workshop "Combustion Instabilities in Gas Turbines" – a One Day Workshop within ETN Members to Organize an EU Project – Roma 7 Febbraio 2012;
5. Workshop "CO<sub>2</sub>: da problema a risorsa – l'esperienza italiana" - Roma 18 Giugno 2012.

### **Obiettivo finale dell'attività**

Il programma, che tiene conto dello stato dell'arte e delle prospettive nel nostro Paese, è articolato in linee progettuali che riguardano principalmente: l'efficienza energetica nello sfruttamento del combustibile (sia esso gas naturale o syngas prodotto da processi di gassificazione, che direttamente carbone), lo sviluppo di tecnologie Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS ) su scala laboratorio e pilota, l'integrazione di processi e il supporto ad attività di dimostrazione.

Le attività del triennio 2012-2014 saranno quindi focalizzate sullo sviluppo e messa a punto di tecnologie atte alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> nel settore termoelettrico, con importanti possibili ricadute in settori industriali che adottano processi fortemente energivori (siderurgico, petrolchimico, cementiero, vetro, ...). In questa ottica, oltre agli impianti alimentati a carbone, si considerano anche quelli alimentati a gas naturale il cui utilizzo si prevede in crescita sia in Italia che nel mondo, anche a seguito dello sfruttamento economicamente compatibile di giacimenti "non convenzionali".

### **Descrizione dell'attività a termine**

Per raggiungere gli obiettivi triennali, saranno valutate, su scala laboratorio e pilota, tecnologie innovative per la cattura, l'utilizzo e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>. Di seguito si descrivono le linee di ricerca previste.

#### Cattura della CO<sub>2</sub> in post-combustione

Ottimizzazione del processo di cattura della CO<sub>2</sub> mediante l'impiego di solventi liquidi innovativi, sia a base di ammine (tecnologia water-free) che non (soluzioni basiche di resorcinolo), in condizioni che, grazie all'utilizzo di apposite miscele di gas, simulano quelle di post-combustione, tipiche della cattura operata sui fumi provenienti dalla combustione di carbone o gas in caldaie, turbine a gas e impianti industriali fortemente energivori. Parallelamente verrà condotto lo studio e sperimentazione di sistemi di clean-up e successiva cattura della CO<sub>2</sub>, mediante sorbenti solidi, da fumi di combustione prodotti dai suddetti impianti. Una particolare attenzione sarà posta alla massimizzazione della capacità di rigenerazione, in relazione al degrado delle prestazioni del solvente/sorbente al variare del numero di cicli, ed alla quantità specifica di energia necessaria alla rigenerazione che andrà minimizzata.

#### Produzione e trattamento di combustibili gassosi e liquidi. Cattura della CO<sub>2</sub> in pre-combustione

Con questa linea di attività si intende valutare, su scala laboratorio e pilota, tecnologie innovative per la produzione di combustibili liquidi (CTL - Coal To Liquid) e gassosi (syngas, idrogeno e altri) da carbone, e per la cattura CO<sub>2</sub> con sorbenti solidi ad alta temperatura, in configurazione pre-combustione.

Quanto ai processi di gassificazione avanzata, si perseguirà lo sviluppo di sistemi di controllo e sensoristica speciale che assicurino un funzionamento stabile e continuo dei dispositivi, attraverso lo sviluppo di

componenti innovativi. Saranno sviluppati inoltre processi di clean-up del syngas per la de-solfurazione ed eliminazione del tar in relazione all'uso di carboni di basso rango (es. Sulcis). La sperimentazione sarà condotta su impianti in scala laboratorio e pilota.

Sarà inoltre affrontato lo sviluppo di tecnologie avanzate di gassificazione/pirolisi attraverso la sperimentazione su scala pilota di processi innovativi di gassificazione in letto fluido, di carboni ad alto contenuto di zolfo e tar. Verrà messo a punto un sistema integrato di pirolisi preventiva per la rimozione dello zolfo e del tar, e successiva gassificazione del char, da applicare a carboni di basso rango.

È prevista anche la qualificazione sperimentale di un innovativo ciclo di de-carbonatazione e trattamento di clean-up (da zolfo e tar) del syngas, basato sull'uso di sorbenti solidi ad alta temperatura (ciclo ZECOMIX ad alto rendimento). Caratterizzazione dei sorbenti e della loro capacità di rigenerazione al fine di massimizzare il numero di cicli. Test su scala pilota del complesso ciclo integrato, dalla gassificazione alla produzione di energia elettrica ed il parallelo sequestro della CO<sub>2</sub> per la sua definitiva rimozione. L'interesse verso processi avanzati di tale natura, basati sull'impiego di sorbenti solidi, operanti ad alta temperatura (500-700°C), risiede principalmente nella possibilità realistica di ottenere ridotti costi di rimozione per tonnellata di CO<sub>2</sub>, di gran lunga inferiori agli attuali valori per tecnologie industriali più mature. La tecnica è applicabile alla separazione della CO<sub>2</sub> dal gas combustibile (assetto pre-combustion) o dai fumi di combustione (assetto post-combustion).

#### Efficientamento del processo di combustione in aria o ossigeno. Cattura della CO<sub>2</sub> in ossi-combustione

Questa linea di attività focalizza l'attenzione sull'ottimizzazione dello sfruttamento energetico del combustibile, sia esso direttamente carbone in processi di ossi-combustione che gas naturale o syngas prodotto in processi di gassificazione.

Sarà condotto lo sviluppo di bruciatori avanzati per turbine a gas, alimentati con syngas ricchi di idrogeno, operanti in condizioni di assenza di fronte di fiamma, caratterizzati da alta stabilità e basse emissioni di NOx, e più in generale alta efficienza. Saranno messi a punto di metodi di progettazione, basati su tecnologie numeriche avanzate (LES, RANS) implementate sia sul codice proprietario ENEA "HeaRT", che su codici commerciali o open-source, per la simulazione stazionaria e dinamica di sistemi a ossi-combustione di polverino di carbone e di gas, cioè in combustione eterogenea e omogenea, operanti a pressione atmosferica o pressurizzati. Gli strumenti numerici messi a punto, saranno validati ricorrendo a dati sperimentali presenti in letteratura ovvero provenienti da facilities sperimentali. Saranno infine studiati e testati cicli energetici turbo-gas a più alta efficienza, caratterizzati dall'immissione di acqua o vapore, fino ad arrivare a cicli CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, naturalmente predisposti per la cattura della CO<sub>2</sub>.

#### Stoccaggio ed utilizzo della CO<sub>2</sub>

L'attività prevede il monitoraggio geochimico di un idoneo sito geologico, in strati carboniferi (ECBM) e acquiferi salini, nella zona del Sulcis. Verrà ampliata ed esercitata una rete di monitoraggio presso l'area del bacino minerario del Sulcis con la susseguente elaborazione e valutazione dei dati raccolti, nella prospettiva di ricavare utili informazioni circa le variazioni naturali dei valori di flusso e/o di concentrazione nei suoli della CO<sub>2</sub> prodotta da processi biologici (background o baseline), quali termini di riferimento per l'individuazione di eventuali fughe di CO<sub>2</sub> profonda. Parallelamente a metodi di indagine più tradizionali, saranno messi a punto ed utilizzati metodi di analisi isotopica del carbonio e/o del radiocarbonio.

Altre azioni riguarderanno: lo sviluppo di una serie di linee guida per la progettazione e la realizzazione di sistemi di monitoraggio geochimico del sito di interesse; il supporto ad attività di tipo dimostrativo, correlate alla progettazione di un impianto pilota CCS "Sulcis", con produzione di energia elettrica e sequestro geologico della CO<sub>2</sub> prodotta; la produzione di combustibili gassosi e chemicals da CO<sub>2</sub> attraverso il ricorso alla reazione di metanazione; lo studio dei catalizzatori ottimali, dei fenomeni di avvelenamento. Dimostrazione su scala pilota di un processo continuo di produzione integrato con fonti rinnovabili.

Continuerà la partecipazione ad organismi internazionali allo scopo di assicurare la presenza italiana negli importanti contesti, e favorire l'intensificazione delle collaborazioni a tutti i livelli. Un'attenzione particolare sarà rivolta infine al problema della "Public Acceptance", con l'obiettivo di contribuire alla corretta

informazione sulle tecnologie CCS con realizzazione di seminari, workshop, congressi, e la produzione di articoli divulgativi e documenti tecnici.

### ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

- ✓ Nuovi solventi per la cattura della CO<sub>2</sub> su fumi di combustione, caratterizzati da più alta efficienza e rigenerabilità e minor tossicità
- ✓ Prototipi di componenti innovativi (tipicamente “internals” del gassificatore) e di metodologie di gestione e controllo per l’ottimizzazione del processo di gassificazione
- ✓ Sviluppo di dispositivi testati su impianti di scala significativa per il clean-up del syngas (de-solfurazione) e la rimozione del TAR
- ✓ Determinazione di indicatori di costo relativi all’applicazione delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>
- ✓ Qualificazione sperimentale di un innovativo ciclo di de-carbonatazione e clean-up del syngas, basato sull’uso di sorbenti solidi (ossidi di calcio) operanti ad alta temperatura (Ciclo ZECOMIX – ENEA), e determinazione di indicatori di costo relativi all’applicazione di questa tecnologia a casi di interesse industriale
- ✓ Sviluppo di strumenti numerici (modelli) per la simulazione di processi dinamici di combustione, e per lo studio dei processi di instabilità in turbine a gas operanti con metano o syngas
- ✓ Realizzazione di bruciatori prototipali a basse emissioni ed alta stabilità, per la combustione di syngas in Turbo-Gas
- ✓ Realizzazione di un dimostrativo pilota del processo di utilizzo della CO<sub>2</sub> per produzione di metano, integrato con sorgente rinnovabile di energia

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall’esecuzione delle attività***

Le attività del presente progetto sono tese a dimostrare che un utilizzo pulito dei combustibili fossili (carbone ma non solo) è possibile, accrescendo le competenze su alcuni aspetti fondamentali delle tecnologie CCS e dimostrando che le tecnologie in grado di evitare l’emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera esistono e sono in prospettiva, nel breve-medio termine, applicabili.

In particolare, possono ritenersi risultati utili alla collettività degli utenti del sistema elettrico nazionale:

- la riduzione del gap di conoscenze in merito all’applicazione efficiente ed economica di tecnologie note ma non ancora mature commercialmente;
- l’acquisizione di dati utili ad una valutazione economica puntuale relativa agli effetti negativi della penalizzazione energetica e di costo introdotta da tali tecnologie;
- lo sviluppo di tecnologie che rendano possibile l’uso di combustibili attualmente solo in minima parte utilizzabili, quali in particolare carboni di basso rango (Sulcis);
- l’esplorazione di metodi innovativi e più efficienti per la cattura della CO<sub>2</sub> genericamente originata da combustibili fossili;
- la messa a punto di tecnologie di progettazione e di dispositivi (reattori, bruciatori, ecc.) per un uso efficiente e sostenibile dei combustibili fossili;
- lo sviluppo e la validazione di metodi alternativi allo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>, orientati a riconsiderare la stessa come un’opportunità e non come problema;
- la dimostrazione che è possibile garantire che la CO<sub>2</sub> possa essere geologicamente confinata in sicurezza e per lunghissimi periodi.

La riuscita delle singole azioni citate, consentirà al mondo della ricerca e dell'industria Italiana di allinearsi al trend internazionale e di giocare un ruolo non residuale in Europa, proponendosi come protagonista dell'innovazione in campo nazionale ed internazionale.

## **PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ**

In relazione agli obiettivi finali dell'attività, in precedenza descritti, la stessa è stata articolata in *Obiettivi* e *Sub-Task* relativi a specifici aspetti di ricerca.

In particolare, con riferimento alla cattura operata in post-combustione sui fumi, come riferito all'obiettivo a (Tecnologie innovative per la cattura della CO<sub>2</sub> in post-combustione), lo studio è indirizzato allo sviluppo di nuovi solventi liquidi, alternativi agli attuali, caratterizzati da più elevate efficienze e minor tossicità.

È opportuno sottolineare che i solventi possono essere, e saranno, applicati anche al "lavaggio" di syngas in configurazioni di cattura pre-combustione.

Per quanto riguarda le tecnologie di cattura pre-combustione (Obiettivo b -Tecnologie per la cattura della CO<sub>2</sub> in pre-combustione attraverso la produzione e il trattamento di combustibili gassosi e liquidi dal carbone), comportando generalmente il passaggio attraverso una fase di pre-trattamento del combustibile (gassificazione e clean-up), vedono l'attività articolarsi in tre Sub-Task:

- Sub Task b.1, relativo alla ottimizzazione della tecnologia nota di gassificazione, trattamento e conversione del syngas, e al parallelo sviluppo di un innovativo processo di pirolisi e gassificazione separate;
- Sub-Task b.2, relativo alla produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS;
- Sub-Task b.3, relativo alla cattura della CO<sub>2</sub> con sorbenti solidi basati su Ossidi di Calcio. Questi ultimi possono e saranno testati anche in configurazioni di cattura post-combustione, su fumi.

Con riferimento alla cattura in pre-combustione e in ossi-combustione, è opportuno sottolineare con un ruolo estremamente significativo sia giocato dall'ottimizzazione del processo di combustione, nel primo caso legato all'impiego di syngas molto ricchi di idrogeno in turbo-gas, nel secondo caso in relazione all'impiego di ossigeno puro in luogo di aria come comburente. A queste problematiche intende dare risposta l'obiettivo c, relativo a "Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione", ed in particolare i due Sub-Task:

- Sub-Task c.1, relativo allo sviluppo di metodologie numeriche per la simulazione e la progettazione di componenti;
- Sub-Task c.2, relativo allo sviluppo di bruciatori innovativi per turbine a gas operanti con syngas.

Sempre con riferimento alle tecnologie CCS l'Obiettivo d (Cicli energetici ad alta efficienza "capture ready") ha per oggetto lo studio di cicli turbogas non convenzionali, caratterizzati da elevata efficienza, operanti con miscele comburenti di tipo CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, quindi definiti "capture ready".

L'ultimo obiettivo (Obiettivo e - Tecnologie per la rimozione permanente della CO<sub>2</sub>) attiene al tema centrale del sequestro definitivo della CO<sub>2</sub>, di tipo geologico, chimico o connesso al suo utilizzo. L'attività è pertanto articolata nei seguenti Sub-Task:

- Sub-Task e.1, relativo allo realizzazione/sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico della CO<sub>2</sub> ed all'elaborazione di linee guida per la progettazione di una generica rete di monitoraggio;
- Sub-Task e.2, relativo all'utilizzo o alternativo fissaggio chimico della CO<sub>2</sub>;
- Sub-Task e.3, relativo ad attività di advisor nazionale per le tecnologie di cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>, ed al supporto ad attività di tipo dimostrativo con studi di tipo tecnico-economici relativi alla realizzazione di un impianto pilota con cattura e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>.

## ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

### **a. Tecnologie innovative per la cattura della CO<sub>2</sub> in post-combustione**

La finalità prevista per l'obiettivo è lo sviluppo ed il testing di nuovi solventi liquidi per la cattura della CO<sub>2</sub> in impianti alimentati a gas e carbone. Le attività sperimentali riguardano l'ottimizzazione del processo di cattura della CO<sub>2</sub> mediante l'impiego di solventi liquidi innovativi, sia a base di ammine che non, in condizioni che simulano, grazie all'utilizzo di apposite miscele di gas, quelle di pre- e di post-combustione, tipiche della cattura operata sul syngas proveniente dalla gassificazione del carbone e sui fumi provenienti dalla combustione di carbone o gas in caldaie e turbine a gas.

Nel complesso delle attività, particolare attenzione verrà ovviamente indirizzata alla valutazione dell'efficienza di cattura, della capacità di assorbimento specifico di CO<sub>2</sub> all'interno del singolo solvente, e della sua capacità di rigenerazione, del degradamento delle prestazioni del solvente utilizzato al variare del numero di cicli, della quantità specifica di energia necessaria alla rigenerazione. Tutte queste grandezze saranno determinate variando i principali parametri di processo quali la tipologia e la concentrazione di solvente, la tipologia e la composizione delle correnti gassose trattate, le portate delle correnti liquide e gassose, la temperatura di rigenerazione. In tale ambito sarà completato l'allestimento del laboratorio chimico volto alla caratterizzazione dei solventi e dei processi.

I solventi e le tecnologie oggetto di indagine, già introdotti nella precedente annualità, riguarderanno in particolare:

- tecnologie, basate su ammine diluite in liquidi organici anziché acqua (tecnologia "water free"), caratterizzate da consumi energetici inferiori in fase di rigenerazione;
- soluzioni basiche di resorcinolo, innovativo solvente a bassa tossicità, brevettato da ENEA, anch'esso caratterizzato da vantaggi energetici significativi.

Entrambi i solventi saranno caratterizzati principalmente in relazione alla fase di rigenerazione, e in termini di idoneità all'impiego ciclico, con la realizzazione di loop dimostrativi operanti "in continuo". All'uso di gas di alimentazione puri, seguirà lo studio di sensibilità del solvente alla presenza di eventuali agenti di avvelenamento, fino alla sperimentazione eseguita con syngas e fumi sulla Piattaforma Pilota ENEA-Sotacarbo.

#### ***Risultati/Deliverable:***

- Messa a punto di solventi innovativi
- Rapporti tecnici descrittivi delle risultanze sperimentali

***Principali collaborazioni:*** Università di Cagliari, Università di Firenze, Sotacarbo

***Durata:*** ottobre 2012 – settembre 2013

### **b. Tecnologie per la cattura della CO<sub>2</sub> in pre-combustione attraverso la produzione e il trattamento di combustibili gassosi e liquidi dal carbone**

#### ***b.1 Ottimizzazione del processo di gassificazione (diagnostica, controllo, gas-cleaning). Trattamento e conversione del syngas. Sviluppo di un innovativo processo di piro-gassificazione***

Prosegue l'attività di ottimizzazione del processo già affrontata nella precedente annualità. In particolare verranno sviluppate sperimentazioni sul trattamento e la conversione del syngas prodotto e sulla co-gassificazione di carbone e biomasse di varia natura. Altresì verranno testate metodologie per il miglioramento del controllo di processo in gassificatori a letto fisso (impianto GESSYCA c/o ENEA). Verranno apportate migliorie e modifiche alla componentistica dell'impianto, inserendo nuova sensoristica e modificando alcuni componenti e sistemi ausiliari, in modo da poter effettuare sperimentazioni più accurate, consentire misure di livello e di temperatura del letto, e favorire un funzionamento stabile ed in continuo. Verranno in quest'ambito effettuate sperimentazioni, sia presso ENEA che presso impianti della Piattaforma Sperimentale ENEA-Sotacarbo, relative alla gassificazione e co-gassificazione di carboni di diversa provenienza (in particolare basso rango) con diversi agenti gasificanti (aria, aria arricchita, O<sub>2</sub>,

vapore, CO<sub>2</sub>); prove di pulizia e trattamento del syngas ( desolfurazione a freddo e a caldo, cracking catalitico del tar); prove di caratterizzazione e verifica dei sistemi di misura, campionamento e analisi.

Alla luce dei risultati ottenuti nelle campagne sperimentali c/o Centro Ricerche ENEA di Trisaia della precedente annualità, sarà poi effettuata (impianto VALCHIRIA) la sperimentazione preliminare di un innovativo processo integrato di pulizia del syngas, basato su preventiva devolatilizzazione/pirolisi di carboni di basso rango (alti zolfo e tar) e successiva gassificazione del char.

La modularità dell'impianto Valchiria permetterà di utilizzare i principali componenti dello stesso (pirolizzatore e gassificatore) in modo "stand alone" e di conseguenza affrontare anche separatamente gli studi sulle diverse tematiche: pirolisi, gassificazione a letto fluido, trattamento delle due tipologie di syngas (da pirolisi e da gassificazione), abbattimento del tar e dello zolfo.

In particolare nel primo anno di attività la ricerca sarà concentrata sullo studio del processo di devolatilizzazione del carbone con abbattimento del tar mediante processo di cracking termico e catalitico. Si cercherà di ottimizzare l'intero processo, in termini di pirolisi del carbone e successiva gassificazione del char prodotto, studiando i flussi di materia ed energia in ingresso e uscita dall'impianto formulandone un bilancio. La pirolisi verrà spinta verso una produzione di carbone derivato (char) di ottima qualità al fine della sua successiva gassificazione. Verranno definiti i valori dei parametri operativi che saranno presi come riferimento, (tempo di residenza del solido, tempo di residenza del gas, temperatura) in funzione della pezzatura e della caratterizzazione del carbone oggetto di studio. Parte essenziale dell'impianto è il sistema di acquisizione e controllo la cui implementazione sarà oggetto dell'attività del primo anno. Completerà l'impianto un sistema di analisi syngas e fumi per il monitoraggio delle emissioni in atmosfera.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico "Sperimentazione del processo di gassificazione"
- Rapporto tecnico su "Sperimentazione sistemi di pulizia e trattamento gas"
- Completamento della realizzazione dell'impianto Valchiria e suo esercizio
- Implementazione del sistema di acquisizione, controllo e analisi dell'impianto
- Emissione di rapporti tecnici descrittivi degli elementi di spicco dell'impianto e dei risultati sperimentali conseguiti

Principali collaborazioni: Università di Cagliari, Sapienza Università di Roma, Sotacarbo

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **b.2 Produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS**

L'obiettivo prevede attività di studio teorico e sperimentale sui processi di produzione e sintesi di combustibili liquidi (Coal To Liquid) e gassosi (idrogeno) a partire dal carbone, analizzando il loro sviluppo e integrazione con le tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>.

In quest'ambito, verranno approfondite le attività di analisi tecnico-economica del processo eseguite nella passata annualità con l'ausilio del codice di simulazione impiantistica commerciale Aspen. A partire dall'inventario dei punti di emissione di gas e fumi contenenti CO<sub>2</sub> a diversi livelli di concertazione presenti nell'impianto verrà valutata l'integrazione di differenti sezioni di cattura della CO<sub>2</sub> effettuando un'analisi dell'impatto dell'applicazioni delle tecnologie CCS sulle prestazioni dell'impianto e sul costo specifico di produzione dei combustibili liquidi. Altri parametri di natura economica finanziaria quali VAN, TIR e TDR completano il quadro di analisi sviluppato in una prospettiva multisценario che tiene conto della sensibilità dei principali parametri tecnici..

L'attività sperimentale, di supporto alla parte di analisi di sistema, proseguirà su scala di laboratorio. Con l'obiettivo di studiare il processo Fisher Tropsch, ne verranno definite le condizioni ottimali, testando differenti tipologie di catalizzatori e differenti condizioni operative del processo a prosieguo di azioni iniziate nelle precedenti annualità.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto "Impianti Coal to Liquid integrati con tecnologie CCS. Analisi economica e di redditività"

- Rapporto "Analisi e ottimizzazione di processi FT di produzione di combustibili liquidi"

Principali collaborazioni: Politecnico di Milano

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **b.3 Cattura della CO<sub>2</sub> con sorbenti solidi**

Il sorbente solido di CO<sub>2</sub> viene sottoposto, preventivamente in laboratorio, a ripetuti cicli di cattura e rigenerazione, durante i quali si individua e caratterizza il materiale ideale che, a tale scopo, deve esibire un buon valore di assorbimento non decrescente durante i primi cicli. Nell'ambito della precedente annualità è stato sintetizzato un sorbente a base di CaO che ha mostrato un buon grado di rigenerabilità anche in condizioni particolarmente severe. Obiettivo del primo anno di questo nuovo accordo è raggiungere 1000 cicli di separazione - rigenerazione in laboratorio, al fine di verificarne la resistenza alla sinterizzazione e migliorarne le prestazioni in termini di capacità sorbente.

Verrà inoltre portata avanti la sperimentazione del processo di cattura sulla piattaforma sperimentale Zecomix. Sarà testato il processo di separazione della CO<sub>2</sub> da un syngas in grado di emulare fumi di combustione. Nel primo anno verrà provata la sezione di caricamento del carbone al fine di studiare la risposta del gassificatore, in termini di temperatura del letto fluido, alle variazioni di portata del combustibile solido. Si cercherà, inoltre, di ottimizzare il processo di avviamento del gassificatore per ridurre il consumo di metano durante la fase di start-up. In questa prima annualità dell'accordo, inoltre, verrà proposta una procedura di avviamento per il reattore di decarbonizzazione individuando i principali parametri su cui intervenire. Verrà connessa alla piattaforma e alla rete la microturbina T-100 da 100 kWt

È opportuno sottolineare che la tecnica di assorbimento con sorbenti solidi è applicabile alla separazione della CO<sub>2</sub> dal gas combustibile (assetto pre-combustion) o dai fumi di combustione (assetto post-combustion). Questo secondo assetto sarà testato, nel corso del programma, sempre sulla piattaforma ZECOMIX.

#### Risultati/Deliverable:

- Sintesi di un materiale con più elevata capacità sorbente e resistente alla sinterizzazione
- Rapporto tecnico sulla caratterizzazione della morfologia del sorbente
- Individuazione di un trattamento termico del materiale che ne migliori la capacità sorbente
- Rapporto tecnico sull'avviamento del generatore di syngas da decarbonizzare (Gassificatore)
- Rapporto tecnico sull'avviamento del Carbonatore

Principali collaborazioni: Università dell'Aquila

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

## **c. Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione**

### **c.1 Metodologie numeriche per la simulazione dei processi e la progettazione di componenti**

L'attività riguarda lo studio della combustione (in ossigeno o aria), in processi monofase e multifase (combustione omogenea ed eterogenea), rivolto alla messa a punto di tecniche e modelli numerici, per simulazioni di tipo LES, sviluppati all'interno del codice proprietario HeaRT, e, in relazione allo sviluppo dei metodi di simulazione predetti, lo studio delle fenomenologie di instabilità di combustione, l'individuazione di eventi precursori di instabilità e per la definizione di metodi di controllo di processo di tipo attivo o passivo.

Per quanto attiene allo studio delle instabilità di combustione si affronterà lo studio numerico LES di un combustore a gas naturale, progettato e realizzato nell'ambito del progetto europeo PRECCINSTA (FP5) sul quale sono state eseguite campagne sperimentali da parte dell'istituto tecnologico tedesco DLR in condizioni di stabilità ed instabilità. Si tratta di un bruciatore premiscelato dotato di opportuna palettatura per ottenere un flusso rotante (swirl), tipicamente utilizzato nelle applicazioni turbogas. Questi studi LES consentiranno anche la validazione della tecnica IVM per il trattamento di geometrie complesse sviluppata

ed implementata nel corso delle precedenti annualità. Su questo stesso combustore verranno condotti studi RANS per l'ottimizzazione della fase di premiscelamento.

Parallelamente si affronterà lo studio LES della combustione premiscelata ad alta pressione (5 bar) di syngas ed aria. In particolare oggetto delle simulazioni sarà un combustore realizzato e testato presso i laboratori del Paul Scherrer Institute di Zurigo. Questo studio permetterà di analizzare gli effetti della presenza di idrogeno sulla topologia del fronte di fiamma e di validare, inoltre, un nuovo modello di sottogriglia, in corso di sviluppo, che tiene conto della diffusione preferenziale dell'idrogeno.

Un interesse particolare sarà dedicato alla combustione con ossigeno, anche in un'ottica CCS. L'ossicombustione è una tecnologia relativamente nuova per l'applicazione energetica, che ha ancora bisogno di attività di ricerca per l'ottimizzazione dei dispositivi industriali e la Computational Fluid Dynamics (CFD) è uno degli strumenti indispensabili per la loro progettazione. L'approccio LES è il più indicato per lo studio di queste fenomenologie, sebbene ancora sia estremamente costoso dal punto di vista computazionale ed i modelli presenti nei codici commerciali abbiano ancora necessità di sviluppo. L'avanzamento in questo ambito, attraverso lo sviluppo del codice ENEA HeaRT, è quindi uno degli obiettivi che si è iniziato a perseguire sin dal precedente AdP. I modelli sviluppati ed implementati in HeaRT negli anni precedenti sono stati parzialmente validati data la carenza di dati sperimentali disponibili, il costo computazionale e, conseguentemente, i tempi estremamente lunghi di simulazione a causa delle dimensioni geometriche elevate dei combustori industriali.

Al fine di ridurre il costo computazionale di questo tipo di applicazioni, negli anni precedenti è stata sviluppata ed implementata in HeaRT una tecnica multilivello, la cui validazione proseguirà nel corso di quest'anno.

Per validare la modellistica relativa all'ossicombustione di carbone attualmente implementata nei codici disponibili, saranno utilizzati i dati sperimentali relativi ad un combustore di polverino di carbone progettato e realizzato nell'ambito del progetto europeo FLOX-COAL.

Sui temi fondamentali della cinetica chimica di ossidazione del carbone, vengono modellate le reazioni in fase gas dei prodotti rilasciati durante la volatilizzazione del carbone, e i relativi meccanismi cinetici di pirolisi e ossidazione.

#### Risultati/Deliverable:

- Validazione e miglioramento delle capacità predittive dei modelli numerici LES di HeaRT
- Studi numerici di instabilità di combustione e di ottimizzazione di processo
- Simulazioni di processi di combustione di polverino di carbone per validazione di modelli e ottimizzazione di processo
- Modellazione della cinetica di reazioni secondarie, in fase gas, dei prodotti di volatilizzazione
- Emissione di rapporti tecnici descrittivi dei risultati raggiunti

Principali collaborazioni: Sapienza Università di Roma, Politecnico di Milano

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **c.2 Sviluppo, progettazione e test di bruciatori per turbine a gas**

Questo obiettivo affronta la problematica dello sfruttamento energetico, efficiente e a basse emissioni, del syngas prodotto da gassificazione, e più in generale di NG. In particolare l'attività riguarda sia il miglioramento progettuale di bruciatori a vortice intrappolato (Trapped Vortex - TV), operanti con syngas e gas naturale, sia la progettazione e realizzazione di bruciatori sperimentali strumentati ai fini diagnostici per la validazione di modelli sviluppati nel subtask c.1.

In particolare verrà proseguita l'attività di ottimizzazione del bruciatore TV (ETVB-mod.1) progettato e realizzato durante il precedente AdP. La tecnologia Trapped Vortex è in grado di realizzare condizioni di combustione MILD, particolarmente indicate per la combustione di gas naturale e di syngas ricchi di idrogeno (assenza del fronte di fiamma, basse emissioni, alta stabilità), combustibili tipicamente di opportunità o prodotti dalla gassificazione del carbone e successivi processi di arricchimento. L'obiettivo



prevede un'ampia campagna sperimentale del nuovo bruciatore, installato sull'Impianto MICOS di ENEA, opportunamente modificato all'occorrenza.

Il nuovo bruciatore è caratterizzato da una geometria innovativa, ove l'articolato sistema di alimentazione aria/gas permette di realizzare un dominio regolare di combustione, caratterizzato dal forte ricircolo di prodotti di reazione con effetto di diluizione dei reagenti freschi, che determina riduzione della temperatura adiabatica di combustione e conseguente minimizzazione delle emissioni di NOx.

L'attività sperimentale, affiancata da studi numerici (RANS e LES) per un'analisi delle prestazioni e delle condizioni di stabilità, permetterà la messa a punto di una versione ottimizzata del progetto (ETVB-mod.2). L'attuale Trapped Vortex ha una geometria semplificata ("rettificata") rispetto ad una geometria di interesse industriale di tipo toroidale, scelta essenzialmente per motivi costruttivi e di facilità di esecuzione della sperimentazione. In base ai risultati ottenuti dalla campagna sperimentale, saranno effettuati ulteriori studi numerici di tipo RANS, sia considerando una variante geometrica di tipo toroidale, sia per affinare la modellistica, sia per definire quali condizioni operative possano realizzare una combustione di tipo MILD.

Per la verifica di prestazioni e di stabilità sarà utilizzata strumentazione diagnostica avanzata, di tipo non invasivo, brevettata da ENEA. L'attività è a prosecuzione di attività impostate e in parte svolte nel precedente triennio.

Nel corso dell'anno si procederà infine alla progettazione esecutiva di un bruciatore tipologicamente simile a quello progettato nell'ambito del progetto europeo PRECCINSTA per dotare il laboratorio di una facility sperimentale orientata agli studi di instabilità di combustione, responsabile di emissioni elevate, bassa disponibilità degli impianti e scarsa efficienza di combustione.

#### Risultati/Deliverable:

- Test del nuovo bruciatore a tipologia Trapped Vortex (TVC) per la combustione di syngas in sistemi CCS operanti in modalità "pre-combustione"
- Studi numerici RANS sul bruciatore TVC modificato
- Elaborazione del progetto definitivo di nuovo combustore TVC
- Progetto di un bruciatore a gas per test sperimentali di laboratorio e validazione di modelli di simulazione

Principali collaborazioni: Università di Roma Tre

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **d. Cicli energetici ad alta efficienza "capture ready"**

Obiettivo dell'attività è lo studio di cicli turbogas non convenzionali a scala micro. Punto di partenza è rappresentato dai cicli "a umido", ottenuti mediante l'iniezione in turbina di vapore o acqua surriscaldata, con l'intento di incrementare l'efficienza del ciclo di potenza, ottenendo nel primo caso un ciclo Steam Injected Gas turbine (STIG), nel secondo un ciclo Evaporative Gas Turbine (EGT).

Rimanendo nell'ambito dei cicli turbogas non convenzionali, saranno valutati, prima teoricamente poi sperimentalmente, cicli termodinamici basati sulla combustione in atmosfera sintetica CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> con eventuale iniezione di vapore. In un ciclo di tal genere la CO<sub>2</sub> è il fluido di lavoro che viene elaborato dalla macchina, con l'aggiunta dell'ossigeno necessario a sostenere la combustione. Il vantaggio principale consiste nella possibilità di estrarre agevolmente la CO<sub>2</sub> generata con la combustione per avviarla al sequestro, agevolazione dovuta al fatto che la CO<sub>2</sub> è praticamente pura se si esclude l'acqua prodotta con l'ossidazione del combustibile. Altro vantaggio non trascurabile è la completa assenza di NOx dai fumi di combustione.

L'iniezione di acqua surriscaldata o vapore, rappresenta la sintesi di quanto sopra, permettendo di ottenere i vantaggi citati con riferimento ai cicli STIG o EGT con, in questo caso, le prerogative dei cicli zero emission; la CO<sub>2</sub> sarebbe infatti facilmente separata per condensazione, con il conseguente recupero dell'acqua iniettata nel ciclo.

Nella prima annualità verrà installata e resa operativa sull'impianto Advanced Gas Turbine Rising (AGATUR) una microturbina TURBEC T-100 da 100kWe. Parallelamente sarà condotta un'attività teorica volta alla realizzazione di un modello dinamico della microturbina. Il modello sarà validato mediante il monitoraggio real time della macchina. Sarà condotto uno studio relativo al funzionamento della macchina con fluidi diversi dall'ordinario (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, vapore). Saranno avviate simulazioni CFD di ossi-combustione e simulazioni di processo. L'attuazione di prove sperimentali di un ciclo CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> è prevista a partire dall'annualità 2013-2014, previa modifiche all'impianto per renderlo "capture ready".

Risultati/Deliverable:

- Studio teorico relativo a cicli turbo-gas avanzati CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>
- Sviluppo di un modello dinamico della microturbina
- Definizione degli interventi di adeguamento all'impianto AGATUR
- Simulazioni CFD di ossi-combustione CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> in turbina a gas

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**e. Tecnologie per la rimozione permanente della CO<sub>2</sub>**

**e.1 Stoccaggio della CO<sub>2</sub>: realizzazione e sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico della CO<sub>2</sub>. Elaborazione di linee guida per la progettazione e realizzazione di una rete di monitoraggio**

L'obiettivo prevede l'approfondimento degli aspetti di storage geologico di CO<sub>2</sub> con particolare riferimento alla ottimizzazione e successiva sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimica nell'area del bacino minerario del Sulcis.

Saranno sviluppate e predisposte una serie di linee guida per la progettazione e realizzazione di sistemi di monitoraggio geochimico in siti di interesse per lo storage geologico della anidride carbonica.

Verrà dato corso all'ampliamento e all'esercizio sperimentale di una rete di monitoraggio geo-chimico installata presso l'area del bacino minerario del Sulcis con la susseguente elaborazione e valutazione dei dati raccolti nella prospettiva di ricavare utili informazioni circa la capacità di storage indefinito e la valutazione del rischio ad esso associato. Tale rete garantirà l'integrità del serbatoio di stoccaggio e dimostrerà, attraverso il monitoraggio prima, dopo e durante la fase di iniezione, che è sempre garantita la sicurezza dell'uomo e dell'ecosistema.

La rete consentirà la misura diretta al suolo e all'interno di pozzi, delle concentrazioni e del flusso di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e di altri parametri di interesse (quali temperatura, umidità, pH, Eh, concentrazioni in falda, etc). La finalità è quella di definire le variazioni naturali dei valori di flusso e/o di concentrazione nei suoli della CO<sub>2</sub> prodotta da processi biologici (background o baseline) quali termini di riferimento per l'individuazione di eventuali fughe di CO<sub>2</sub> profonda. Parallelamente a metodi di indagine più tradizionali, saranno messi a punto ed utilizzati metodi di analisi isotopica del carbonio e/o del radiocarbonio, tipicamente di tipo off-line, per la caratterizzazione delle condizioni baseline e post iniezione.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico "Linee guida per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> e loro applicazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis"
- Rapporto tecnico descrittivo della rete di monitoraggio geochimico installata e dei risultati di un anno di esercizio

Principali collaborazioni: Sapienza Università di Roma

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

**e.2 Utilizzo e fissaggio chimico della CO<sub>2</sub>**

L'obiettivo intende, in primo luogo, dimostrare la fattibilità tecnica e valutare la sostenibilità economica di tecnologie per la produzione di gas naturale sintetico (SNG) o di "chemicals", attraverso processi di ricombinazione di CO<sub>2</sub> con Idrogeno prodotto da fonti rinnovabili.

La possibilità di ottenere metano dalla riduzione della CO<sub>2</sub> è già stata discussa e dimostrata nel corso delle precedenti annualità. Le esperienze hanno dimostrato la necessità di intervenire con opportune rigenerazioni sul catalizzatore che nel tempo tende a ridurre la sua attività.

La prima parte della presente annualità sarà pertanto dedicata allo sviluppo di una procedura che preservi il catalizzatore dalla de-attivazione. In seguito, l'interesse sarà rivolto al completamento di un piccolo impianto dimostrativo che realizza la "metanazione" utilizzando un generatore di energia da fonte rinnovabile (generatore eolico o solare fotovoltaico) per la produzione di idrogeno in un apposito dissociatore elettrochimico.

L'attività sarà completata da una valutazione tecnico/economica dell'intero processo per una ipotesi di ampliamento di scala ed applicata ad impianto industriale energivoro.

La seconda parte dell'obiettivo riguarda invece lo sviluppo e messa a punto di metodi chimici per il fissaggio della CO<sub>2</sub>. In particolare, verrà studiato il processo che prevede l'utilizzo della CO<sub>2</sub> per la carbonatazione di ceneri (fly-ash) e rifiuti industriali alcalini provenienti dal settore siderurgico e quello di ceneri provenienti da gassificatori (in primis la piattaforma Zecomix), con l'obiettivo di migliorarne le proprietà ambientali e di ottenere un materiale utilizzabile, ad esempio, nel settore delle costruzioni. Al fine di accelerare la fissazione della CO<sub>2</sub> verrà studiata la termodinamica e cinetica del processo, individuando, su scala laboratorio, le condizioni operative ottimali per massimizzare il processo stesso.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sulla attività sperimentale condotta per la messa a punto della tecnologia di metanazione
- Impianto completo di metanazione in scala laboratorio
- Rapporto tecnico descrittivo dei risultati raggiunti in merito al processo di cattura della CO<sub>2</sub> con metodi chimici

Principali collaborazioni: Università di Roma Tor Vergata, Politecnico di Milano

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **e.3 Supporto ad attività dimostrative e di advisor nazionale per le tecnologie CCS**

L'obiettivo prevede attività specifiche di supporto ai Ministeri competenti, attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali. Attraverso queste azioni, viene assicurato il contributo a numerose iniziative a livello internazionale volte ad intensificare la collaborazione fra i diversi Paesi per lo sviluppo e dimostrazione delle tecnologie CCS e CCT. Si allude in particolare alla partecipazione al Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), alla piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), ai gruppi di lavoro dell'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center", all'European Energy Research Alliance (EERA) nell'ambito del Joint Program sulle CCS, nonché la partecipazione allo European Turbine Network (ETN), ove ENEA è particolarmente attivo avendo proposto e coordinato la stesura di un *Position Paper* sulle "Instabilità di combustione in turbine a gas alimentate a syngas".

In questo ambito sarà organizzata in primavera, da ENEA a Roma, l'annuale riunione del Technical Group del CSLF, e quella delle rispettive Task Force su tematiche specifiche.

A livello nazionale si segnala inoltre la partecipazione all'Osservatorio CCS, promosso dalla Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile.

Nell'ambito dell'obiettivo saranno poi condotte valutazioni tecnico-economiche a supporto dell'attività di dimostrazione relative all'impianto pilota CCS Sulcis. Si prevede in particolare aggiornamento dello studio, svolto nelle precedenti annualità, relativo all'impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO<sub>2</sub> nel bacino minerario del Sulcis, e consistente nel re-scaling dell'impianto, dalla scala di dimostrativo a quella di pilota. Verrà predisposto uno studio di progettazione preliminare, comprendente valutazioni di carattere economico, relative alla realizzazione dell'impianto, ed alle ricadute, in termini produttivi, sulla vicina miniera.

### Risultati/Deliverable:

- Rapporti sulle collaborazioni alle iniziative comuni a livello nazionale ed internazionale
- Rapporto tecnico "Aggiornamento dello studio relativo all'impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>"

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

A integrazione delle attività di ricerca, un particolare sforzo sarà profuso nella comunicazione e diffusione dei risultati del progetto.

Questa azione, condotta in collaborazione con i partner scientifici del progetto, si articolerà attraverso:

- la pubblicazione di articoli e documenti tecnici a carattere pubblico;
- l'organizzazione di workshop, seminari, convegni. Tra questi citiamo:
  - l'organizzazione del XXXV Meeting Nazionale della *Italian Section of the Combustion Institute*, che si terrà a Milano nel giugno 2013, nell'ambito del quale specifiche sessioni, come è già stato fatto in passato, saranno dedicate alle tematiche attinenti alla tecnologie CCUS;
  - l'annuale riunione del Technical Group del Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) e delle rispettive Task Force, che sarà organizzata, in primavera, da ENEA.
- il coinvolgimento di partner industriali (tipicamente ENEL, ANSALDO Energia, TURBEC, ecc.)
- l'aggiornamento di un sito web sulle tematiche e le tecnologie CCUS.

**PROGETTO B.2 Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili"**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Tecnologie innovative per la cattura della CO <sub>2</sub> in post-combustione	2291	126	6	0	0	8	395	535
b	Tecnologie per la cattura della CO <sub>2</sub> in pre-combustione	5855	322	17	210	0	16	465	1030
c	Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione	3764	207	2	55	0	9	125	398
d	Cicli energetici ad alta efficienza "capture ready"	982	54	0	50	5	3	0	112
e	Tecnologie per la rimozione permanente della CO <sub>2</sub>	3491	192	79	25	0	14	115	425
<b>TOTALE</b>		<b>16383</b>	<b>901</b>	<b>104</b>	<b>340</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>1100</b>	<b>2500</b>

\* in base al documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili", deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie (per 500 k€) e con Sotacarbo spa (per 600 k€)

<b>AREA</b>	<b>PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE</b>
<b>Tema di Ricerca</b>	<b>ENERGIA NUCLEARE - SICUREZZA, PROGRAMMI INTERNAZIONALI E REATTORI INNOVATIVI A FISSIONE</b>
<b>Progetto B.3.1</b>	<b>SVILUPPO COMPETENZE SCIENTIFICHE NEL CAMPO DELLA SICUREZZA NUCLEARE E COLLABORAZIONE AI PROGRAMMI INTERNAZIONALI PER IL NUCLEARE DI IV GENERAZIONE</b>

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

Il prodotto finale dell'attività è costituito da:

- a) attrezzature, laboratori e prove sperimentali, modelli, programmi e piattaforme di calcolo validati per la progettazione nucleare e le verifiche di sicurezza e sostenibilità del nucleare da fissione;
- b) analisi di sistema e di sicurezza di sistemi nucleari e relativi cicli del combustibile;
- c) progettazioni e qualifiche di componenti e sistemi per impianti nucleari di quarta generazione;
- d) sviluppo di materiali per sistemi nucleari innovativi.

Tutto ciò al fine di contribuire allo sviluppo rapido delle competenze e delle infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per una esauriente valutazione della sicurezza degli impianti nucleari attuali e per contribuire allo sviluppo degli impianti nucleari di nuova generazione.

Tutte le attività verranno portate 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.

Le competenze e le infrastrutture che saranno impiegate o sviluppate nell'ambito di questo tema costituiranno un insieme di capacità multidisciplinari che, in collaborazione e sinergia con altri soggetti del settore, potranno essere utilizzate per la riqualificazione ed il potenziamento del sistema scientifico ed industriale italiano in materia nucleare.

### **Situazione attuale del prodotto dell'attività**

Il nuovo quadro di riferimento che si è delineato in Italia nel corso del 2011 a seguito dell'incidente di Fukushima e del successivo referendum, ha portato ad una nuova rimodulazione delle attività di R&S previste nell'ambito del programma triennale 2012-2014.

In particolare, si ritiene che le esigenze primarie siano la conservazione nel nostro Paese di un sistema di competenze scientifiche in grado di assicurare la corretta gestione delle residue attività nucleari, in particolare sotto il profilo della sicurezza e le attività di ricerca relative alla IV generazione.

Il problema della sicurezza nucleare coinvolge tutti i Paesi, prescindendo dall'esistenza di centrali elettronucleari in esercizio, a maggior ragione se entro il limite di 200 km dai confini nazionali. La Commissione Europea ha stabilito che ciascuna nazione debba effettuare una valutazione indipendente dello stato di sicurezza di questi reattori.

E' perciò necessario conservare e rafforzare le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca nel settore nucleare, sviluppando in particolare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche dal punto di vista della sicurezza e della sostenibilità.

Rimane chiaro che a seguito del referendum abrogativo riguardante la costruzione e l'esercizio di nuove centrali elettronucleari, si è determinata la necessità di abbandonare le attività di ricerca per lo sviluppo di reattori nucleari fino alla generazione III+. I temi di ricerca riguarderanno dunque esclusivamente i reattori

nucleari di IV generazione in quanto ad elevata sicurezza ed affidabilità e con massimo utilizzo del potenziale energetico del combustibile e controllata gestione dei rifiuti radioattivi.

In particolare le attività riguarderanno lo sviluppo e implementazione dei sistemi nucleari veloci refrigerati a piombo, Lead cooled Fast Reactor (LFR) e Small Modular Reactor (SMR), su cui l'Italia detiene una posizione di leadership progettuale e tecnologica in Europa, attività che sono inquadrata nelle iniziative internazionali (GIF) ed europee (SNETP, ESNII, EERA) alle quali il nostro Paese ha aderito.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate e al fine di destinare in modo coordinato e non dispersivo gli investimenti che sono resi disponibili dal presente piano, tenendo conto delle attività tecniche già avviate in ambito Gen-IV degli studi di sicurezza nelle precedenti annualità dell'AdP, è stato deciso di reindirizzare il Piano Annuale di Realizzazione 2012 relativo al Piano Triennale 2012-2014 su due linee progettuali:

- Linea Progettuale 1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare
- Linea Progettuale 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

### ***Stato attuale delle tecnologie***

#### Linea Progettuale 1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Secondo le indicazioni IAEA (56<sup>a</sup> Conferenza Generale: Rapporto del Direttore Generale sullo stato attuale e le prospettive future nel settore nucleare), dopo Fukushima è complessivamente cambiato poco riguardo alle prospettive dell'energia nucleare nel mix energetico mondiale.

Le stime della crescita fatte prima e dopo l'incidente differiscono tra loro solamente per qualche punto percentuale. Nonostante il rallentamento dell'ultimo anno, il settore del nucleare continuerà ad espandersi nei prossimi decenni, guidato da una domanda energetica in crescita, dalla volatilità dei prezzi dei combustibili fossili, dal suo basso impatto in termini di emissioni di gas serra e dalla sicurezza energetica che esso può garantire.

Le stime più alte prevedono una crescita dell'8% inferiore alle previsioni del 2012, mentre le stime più basse prevedono una crescita del 7% inferiore alle stime pre-Fukushima. In particolare, nel 2012 la capacità produttiva mondiale di energia nucleare ammonta a 375 GWe. Le stime più alte prevedono una crescita a 746 GWe nel 2030, mentre secondo le stime più basse la capacità produttiva crescerà fino a 502 GWe nello stesso anno. Tra i paesi non nucleari intenzionati a diventare tali prima di Fukushima, ci sono stati ripensamenti e ritardi, ma la maggior parte di essi ha comunque deciso di portare avanti i propri progetti.

Per quanto riguarda lo stato attuale dell'energia nucleare, nel 2011 la produzione di elettricità a livello mondiale è stata del 12,3%, con un contributo al mix energetico che varia di regione in regione, dal 25% dell'energia utilizzata in Europa occidentale, all'1,8% in Medio Oriente allo 0% nel sudest asiatico. Le centrali nucleari operanti oggi nel mondo risalgono per la maggior parte agli anni 60' e 70', con una vita produttiva stimata di circa 60 anni.

Tra i paesi che non possiedono centrali nucleari operative, 29 stati, divisi fra Asia-Pacifico (10), Africa (10), Europa (7) e America Latina (2), hanno adesso concreti programmi di produzione di energia nucleare, a diversi stadi di sviluppo. Ci sono poi anche paesi che hanno adottato misure per l'introduzione del nucleare per la prima volta dopo l'incidente di Fukushima. Questi stati sono Turchia e Emirati Arabi dove i lavori di costruzione della prima centrale nucleare sono già iniziati, e Bielorussia, Bangladesh e Vietnam, che realizzeranno i loro progetti grazie ad accordi di fornitura con la Russia.

Tuttavia molta incertezza rimane circa l'effettivo avviamento dei loro programmi per la produzione di energia nucleare. Si prevede quindi che la crescita del settore nucleare sarà guidata dall'espansione dei programmi dei paesi già produttori di energia nucleare, più che da nuovi programmi in paesi nucleari. I fattori che guideranno tale crescita nei prossimi decenni non sono cambiati dopo Fukushima: domanda energetica in crescita (in particolare nei paesi in via di sviluppo), volatilità dei prezzi dei combustibili fossili, basso impatto in termini di emissione di gas serra e sicurezza energetica.

Al contrario dell'elettricità generata dai combustibili fossili, per l'energia nucleare il costo del combustibile costituisce solo una piccolissima percentuale del costo finale dell'energia. Si stima per esempio che un

raddoppio del prezzo dell'uranio si traduca in un aumento del 4% dei costi di produzione (a fronte di un aumento del 40-70% nel caso di combustibili fossili), riducendo sensibilmente la volatilità dei prezzi dell'energia.

Diventa sempre più evidente che la tecnologia nucleare e la safety devono procedere di pari passo. L'incidente di Fukushima ha reso sempre più chiara la necessità di estendere il concetto di progettazione in sicurezza, fino a giungere alla "safety by design", tanto quanto possibile. Il tema della sicurezza delle installazioni nucleari diverrà sempre più centrale e gli stessi enti regolatori imporranno, nei prossimi anni, misure sempre più restrittive, in particolar modo per quanto riguarda gli impianti in costruzione. Tenendo conto delle informazioni raccolte a seguito dell'incidente di Fukushima e delle successive attività di safety assessment, note come stress test, è emerso chiaramente che dalle attività di ricerca dovranno scaturire strumenti migliorati al fine di permettere una sempre più accurata predizione del comportamento degli impianti in fase incidentale e la possibilità che tali evoluzioni possano dare risultati in transitori gestibili direttamente dagli impianti e/o dai sistemi di sicurezza/emergenza in essi previsti. Tutto questo richiederà lo sviluppo di modelli e di strumenti informativi che saranno fondamentali sia nella fase pre-regolatoria, in supporto alle autorità di sicurezza, sia in fase di gestione delle emergenze, in supporto agli operatori.

### Linea Progettuale 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

Per quanto riguarda i reattori di quarta generazione alcuni sono ancora allo stadio concettuale mentre altri come MYRRHA (LFR-ETPP) e ASTRID (DEMO – SFR) sono già in una fase di progettazione avanzata, in vista di richiedere all'autorità di sicurezza l'autorizzazione alla costruzione ed esercizio nel 2014.

I sistemi nucleari di quarta generazione sono stati concettualizzati per rispondere ai seguenti requisiti:

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

In ambito europeo lo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR, con particolare riguardo a quelli a spettro neutronico veloce capaci di sostenere la chiusura del ciclo del combustibile per la minimizzazione dei rifiuti radioattivi e l'utilizzo ottimale delle risorse naturali, è inquadrato nella European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) dello Strategic Energy Technology-Plan (SET-Plan), di cui anche l'ENEA è membro.

In tale contesto, l'impegno italiano è focalizzato ai sistemi LFR (anche SMR) nella configurazione a piscina integrata, poiché potenzialmente soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di quarta generazione.

- Sostenibilità: efficace utilizzo del combustibile e minimizzazione delle scorie

Il piombo è un refrigerante che presenta una sezione d'urto di assorbimento neutronico bassa e uno scarso potere moderante. Questa proprietà nucleare, intrinseca al refrigerante, permette di progettare ed esercire noccioli a spettro neutronico veloce anche con geometrie con un elevato rapporto refrigerante/combustibile, a sua volta necessario per la corretta asportazione del calore di fissione nel rispetto dei vincoli sulle temperature massime di esercizio.

La possibilità di operare con flussi neutronici particolarmente "duri" consente di ottenere facilmente noccioli con rapporto di conversione unitario (qualora il tasso di produzione di nuovo materiale fissile nel combustibile coincide con il tasso di consumo dello stesso), e quindi noccioli a lunga vita ed elevato tasso di



bruciamento (elevata efficienza di utilizzo del combustibile, circa 150-200 volte superiore agli attuali sistemi di seconda e terza generazione).

Un flusso neutronico veloce permette non solo di accrescere la sostenibilità di tali sistemi mediante un utilizzo più efficace e razionale del combustibile nucleare, ma permette contemporaneamente una drastica riduzione della generazione di scorie ad elevata radiotossicità grazie ad un ciclo del combustibile "chiuso". Le scorie effettivamente prodotte sono infatti separate dal plutonio e dagli attinidi minori, che vengono completamente riciclati e riutilizzati nel ciclo del combustibile (detto per l'appunto chiuso). Il plutonio e gli attinidi minori sono infatti i principali responsabili dell'elevata radiotossicità delle scorie nucleari dei sistemi GEN-II, GEN-III, che richiedono tempi di stoccaggio in siti geologici dell'ordine del milione di anni.

Con un ciclo del combustibile chiuso i sistemi LFR permettono di ridurre i volumi di scorie nucleari prodotte e la relativa radiotossicità, con la sola necessità di uno stoccaggio in siti superficiali per un tempo dell'ordine di 300-400 anni.

- Economicità: costi competitivi e rischio sul capitale investito paragonabile ad ogni altra forma di produzione di energia elettrica.

I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere estremamente semplici, riducendo quindi i tempi di costruzione, i tempi di ammortamento del capitale investito (parametro molto critico per i sistemi nucleari), e il costo di produzione dell'energia elettrica.

Tale semplicità è in gran parte consentita dalle intrinseche proprietà del refrigerante utilizzato. Il piombo infatti non interagisce chimicamente con aria e acqua (a differenza del sodio), e ha una bassa tensione di vapore. Ciò consente di realizzare sistemi a bassa pressione (praticamente pressione atmosferica) e consente di installare direttamente nel sistema primario il generatore di vapore, portando ad una considerevole semplificazione impiantistica. Nei sistemi refrigerati a sodio ciò non è praticabile, e un apposito circuito intermedio a sodio è previsto, aumentando la complessità, dimensioni e costi di impianto.

Inoltre la diretta installazione del generatore di vapore nel sistema primario migliora l'efficienza energetica del sistema LFR, riducendo i costi di produzione dell'energia elettrica.

Infine mediante un accorto ed innovativo progetto di impianto, che lo rende estremamente semplice, è possibile sostituire o comunque ispezionare tutti i componenti del sistema primario, incrementando sensibilmente non solo il fattore di utilizzo dell'impianto e riducendo quindi i tempi di ammortamento sul capitale investito, ma anche la protezione dell'investimento.

- Sicurezza e Affidabilità: elevata sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, minimo rischio di danneggiamento del nocciolo, esclusione di un piano di evacuazione

I sistemi refrigerati a piombo, visto l'elevato punto di ebollizione del refrigerante utilizzato (1750 °C), la sua bassa tensione di vapore anche ad elevate temperature, e le sue ottime capacità schermanti, sono progettati per essere eserciti a pressione atmosferica e a temperature particolarmente lontane dal punto di ebollizione. Ciò consente di ottenere elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, con un rischio di esposizione agli operatori molto modesto vista la capacità del piombo di intrappolare i prodotti di fissione anche volatili e di schermare le radiazioni gamma.

Le ottime proprietà neutroniche del piombo, già citate, consentono inoltre di sfruttare a pieno le peculiarità dello stesso come refrigerante, ovvero da un punto di vista termo-fisico (elevata capacità di asportare potenza termica, elevato calore specifico, elevato coefficiente di espansione termica), permettendo la progettazione di noccioli ad elevato rapporto passo su diametro, il che implica direttamente sistemi a ridotte perdite di carico e quindi contenute potenze di pompaggio. Inoltre tale configurazione permette di incrementare le capacità del sistema di asportare la potenza di decadimento in regime di circolazione naturale, quindi in maniera completamente passiva, permettendo così una sensibile semplificazione dei sistemi di controllo e protezione e accrescendo ulteriormente il grado di sicurezza di tali sistemi.

Da un punto di vista prettamente nucleare i reattori refrigerati a piombo presentano un coefficiente di reattività per presenza di vuoto negativo nel caso di noccioli di piccole-medie dimensioni e positivo nel caso di noccioli di grosse dimensioni. Tuttavia, in virtù dell'elevato punto di ebollizione del refrigerante (superiore alla temperatura di fusione degli acciai ma inferiore a quella del combustibile), l'ipotesi di esteso

svuotamento della sola regione del nocciolo può essere considerata fisicamente irrealizzabile, così che i reattori refrigerati a piombo possano essere considerati immuni da uno degli scenari incidentali più gravi, tipici dei reattori veloci tradizionali.

Anche in caso di rottura dei tubi del generatore di vapore, vista l'elevata densità del piombo e le soluzioni progettuali adottate, il rischio di inserzione di vapore nel centro del nocciolo (dove il coefficiente di vuoto è maggiormente positivo) è estremamente ridotto.

Va infine evidenziato come l'elevata densità del piombo, pur nel caso di una improbabile fusione del nocciolo, riduca significativamente il rischio di una successiva compattazione del combustibile e quindi di una nuova condizione di criticità del sistema. I fenomeni di dispersione del combustibile nel refrigerante sono infatti predominanti viste le densità del combustibile nucleare paragonabili a quelle del piombo e l'attitudine del piombo ad instaurare moti di circolazione naturale in ogni condizione incidentale ipotizzabile. Tale scenario non è invece ipotizzabile per i reattori ad acqua e a sodio, per i quali altresì il rischio di parziale o completa fusione del nocciolo è meno ridotto che non nel caso di un LFR.

D'altro canto l'elevato punto di fusione del piombo (327°C) che può indurre problemi di esercizio e controllo dei sistemi LFR, introduce un enorme vantaggio per quanto riguarda la sicurezza di tali sistemi. In caso di rottura del vessel con fuoriuscita di piombo dal sistema primario, questo tenderebbe immediatamente a solidificare arrestando la fuoriuscita, senza alcuna conseguenza per le strutture circostanti data anche la sua inerzia chimica con aria e acqua. Per i sistemi a sodio ciò non è neanche lontanamente immaginabile.

Rimane infine la questione della produzione del Polonio-210, volatile e altamente pericoloso per la salute pubblica. Con una adeguata selezione dei materiali e una corretta implementazione dei sistemi di controllo della chimica, e ancora date le attitudini del piombo ad intrappolare i prodotti di fissione altamente volatili, il rischio di rilascio delle pur minime quantità di Po-210 prodotte nel reattore, è estremamente ridotto.

- **Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica:** impossibilità di avere plutonio per la fabbricazione di bombe, elevata sicurezza per la salute pubblica in caso di atti terroristici.

L'uso di combustibile ad ossidi misti contenente attinidi minori (nel lungo termine), associato ad un ciclo di combustibile che non prevede la separazione chimica degli attinidi presenti nel combustibile stesso, rende questi sistemi enormemente inefficaci per la diversione di plutonio a fini illeciti. Inoltre nel breve termine, le proprietà neutroniche del piombo premettono la concezione di noccioli a lunga vita (peraltro già esercibili in un'ottica di chiusura del ciclo del combustibile), intrinsecamente incompatibili con la produzione di plutonio weapon-grade.

L'uso di un refrigerante chimicamente compatibile con aria e acqua, con ottime proprietà intrinseche di schermaggio delle radiazioni e di ritenzione dei prodotti di fissione tipicamente responsabili della contaminazione ambientale in caso di incidente severo, ed operante a bassa pressione permette di aumentare sensibilmente la protezione fisica della popolazione residente nelle zone limitrofe alla installazione nucleare, riducendo inoltre la necessità di robusti e complessi sistemi di protezione contro eventi catastrofici iniziati da eventi terroristici. Inoltre per i sistemi LFR in nessuna configurazione e previsto l'utilizzo di fluidi infiammabili, eliminando quindi il rischio di propagazione di incendi nel sito.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### **Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali**

#### **Linea Progettuale 1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare**

La linea progettuale dedicata allo sviluppo di competenze per la sicurezza nucleare è stata istituita nel PAR 2011 quando le attività di ricerca relative al nucleare da fissione sono state riviste e rindirizzate per tenere conto del nuovo scenario post-referendum.

In tale linea è stata data continuità alle attività relative agli studi di sicurezza che nel precedente piano triennale 2006-2008 e nei precedenti piani annuali 2009 e 2010 erano distribuite orizzontalmente su diverse linee progettuali, avendo privilegiato nella loro collocazione il contesto piuttosto che l'omogeneità tematica. Rispetto al precedente piano annuale di realizzazione, nell'attuale vengono collocate in questa linea anche tutti gli studi relativi alla sicurezza svolti nell'ambito di comitati, gruppi di lavoro e collaborazioni internazionali.

La partecipazione consentita dall'AdP alle iniziative e piattaforme Europee come SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) ed ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) per la definizione di una strategia europea sulla produzione economica, sicura e sostenibile dell'energia nucleare ha permesso all'ENEA di essere presente in diversi progetti europei del 7° Framework Program EURATOM indirizzati allo sviluppo/validazione di strumenti e metodi innovativi per l'analisi della sicurezza negli impianti nucleari: SARGEN-IV, JASMIN, NURESAFE. Le attività portate avanti nell'ambito di questi progetti sono attualmente sinergiche con le attività svolte nell'ambito dell'AdP per mantenere e sviluppare le competenze nel campo della sicurezza nucleare.

Nei precedenti piani triennali le attività di acquisizione e validazione di strumenti di analisi per la valutazione della sicurezza degli impianti nucleari sono state condotte in diverse linee progettuali ed accorpate a partire dal PAR 2011. Queste attività inquadrare principalmente nell'ambito di accordi internazionali di collaborazione bilaterale, in particolare con le organizzazioni francesi CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ed IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), ma anche con la US-NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) hanno permesso all'ENEA di dotarsi di codici e piattaforme di calcolo avanzati ed acquisire le necessarie competenze per il loro utilizzo. In dettaglio i risultati più rilevanti sono stati i seguenti:

- Produzione e validazione di librerie di lavoro di sezioni d'urto accoppiate neutroniche e fotoniche, per applicazioni di schermaggio e danno da radiazione in reattori ad acqua leggera.
- Sviluppo di competenze su metodi e analisi di neutronica per reattori ad acqua, finalizzate tanto a calcoli di criticità (nocciolo o stoccaggio) che di ciclo con acquisizione della piattaforma di calcolo per la neutronica APOLLO2/CRONOS2.
- Acquisizione, implementazione sulla griglia ENEA di Super Calcolo (CRESCO) e validazione della piattaforma di calcolo per la modellistica termoidraulica multi-dimensionale NURESIM (codici di sistema CATHARE, e codici CFD TRIO-U e NEPTUNE).
- Acquisizione e validazione di software per l'analisi termo-idraulica e termo-meccanica del nocciolo degradato (ICARE-CATHARE, DRACCAR) e per la simulazione integrale dell'evoluzione degli incidenti gravi (MELCOR, ASTEC).
- Implementazione e confronto di modelli di calcolo nel codice RADCAL-III per le valutazioni di impatto ambientale radiologico.

In parallelo all'acquisizione e validazione degli strumenti sono state condotte attività rivolte all'approfondimento delle corrette metodologie di applicazione degli stessi per lo studio della sicurezza in reattori attuali ed innovativi. A questo riguardo nelle successive annualità sono state raccolte le informazioni necessarie per le valutazioni di sicurezza sui sistemi nucleari giudicati di interesse. Esempi dei risultati raggiunti sono il database con descrizione di sistemi e componenti relativi ad un PWR (Pressurizer Water Reactor) da 1600 MWe di tipo evolutivo e la classificazione dal punto di vista delle caratteristiche di sicurezza dei reattori innovativi SMR (Small Modular Reactor). Sulla base delle informazioni raccolte è stata effettuata un'analisi delle soluzioni impiantistiche e tecnologiche nei diversi progetti di reattori dell'attuale generazione III avanzata a fronte sia di eventi ad estremamente bassa probabilità di accadimento, sia di combinazioni di eventi che possano portare ad una sequenza di incidente severo. In particolare, sono stati applicati metodi di analisi probabilistici e deterministici per la valutazione di sistemi di sicurezza attivi, estremamente diversificati e ridondanti, e sistemi a funzionamento prevalentemente passivo.

Per quanto concerne l'analisi integrata di sistema e sicurezza, già prima dell'incidente di Fukushima le attività erano focalizzate sulla riduzione del rischio sismico e sull'analisi degli eventi esterni. Un'attività pluriennale ha permesso di valutare l'utilizzo di isolatori sismici in un reattore modulare di media taglia in

caso di terremoti superiori a quello di progetto. A questo scopo sono state effettuate prove di rottura sugli isolatori per poter utilizzare le caratteristiche reali degli isolatori nella valutazione delle sollecitazioni dinamiche sulle principali strutture e componenti. L'analisi degli eventi esterni, che inizialmente ha riguardato l'impatto aereo, è stata rivolta dopo l'incidente di Fukushima allo studio degli effetti di uno Tsunami. Per valutare la capacità di resistenza di un SMR innovativo a questi eventi si è adottata una metodologia basata sulle prescrizioni ed indicazioni delle normative internazionali vigenti con un approccio deterministico per il calcolo degli effetti indotti sulla struttura del reattore.

Nelle ultime annualità è stata portata avanti la progettazione di simulatori ingegneristici considerando due linee di applicazione: simulatori di tipo ingegneristico per le tipologie di reattore implementate in Europa (in particolare nelle oltre 20 centrali a meno di 200 km dai confini nazionali) per l'utilizzo in sistemi integrati di gestione di eventuali emergenze create da incidenti futuri, e simulatori ingegneristici 'full scope' (ovvero per il supporto alla progettazione, la verifica, la validazione, lo sviluppo di procedure ecc.) da focalizzare sui reattori evolutivi attesi come risposta all'evento di Fukushima ed alle risultanze degli Stress Test e degli studi a livello internazionale sulle implicazioni progettuali e gestionali di tale incidente. L'analisi di quanto attualmente esistente a livello internazionale e l'esperienza di utilizzo acquisita nell'ambito di accordi bilaterali (IRSN) ha inizialmente permesso di valutare le funzionalità di tali sistemi di calcolo, i principali componenti hardware e software, i codici di calcolo utilizzati nei medesimi, le prospettive di introduzione di elementi evolutivi di simulazione. Successivamente è stata definita l'architettura di questi simulatori individuando le funzioni che devono espletare, il software necessario a questo e la logica di utilizzo. Sono state inoltre realizzate applicazioni specifiche per dimostrare il funzionamento del progetto concettuale.

Nei precedenti piani triennali sono stati effettuati cospicui investimenti e condotti numerosi studi per la costruzione della facility sperimentale SPES-3 per la simulazione del comportamento in fase incidentale di un generico impianto SMR innovativo. Attualmente la realizzazione della facility presso la SIET di Piacenza è circa al 50%. Sono stati completati il progetto operativo e la struttura portante della facility; sono stati approvvigionati e montati i serbatoi per il sistema di contenimento, le piscine e gli scambiatori del sistema di rimozione del calore residuo ed il trasformatore della stazione elettrica; è stata acquisita parte della strumentazione commerciale, mentre è in fase di sviluppo avanzato la strumentazione speciale per la misura della portata bifase (sonda capacitiva). Inoltre, su di un impianto realizzato ad hoc, sono state condotte delle verifiche sperimentali delle prestazioni di due tipologie di elementi scaldanti per il canale di potenza di SPES-3 sia in condizioni di potenza nominale, sia in condizioni rappresentative di eventi incidentali.

Le verifiche numeriche effettuate con il codice RELAP5 nel corso dell'ultimo piano triennale hanno confermato la sufficiente flessibilità dell'impianto SPES-3, progettato nel precedente triennio per simulare condizioni incidentali di progetto (Design Basic Event) in impianti SMR di diversa taglia pur mantenendo lo stesso layout impiantistico. Ulteriori analisi effettuate a seguito dell'evento di Fukushima hanno dimostrato la capacità dell'impianto di simulare condizioni incidentali estreme (Beyond Design Basic Event) inclusa una sequenza incidentale del tipo accaduto sugli impianti di Fukushima.

L'attività sperimentale a supporto degli studi di sicurezza ha anche riguardato lo sviluppo di componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia. In particolare, sono state oggetto di studio le problematiche relative ai generatori di vapore elicoidali ed alla termoidraulica del fondo vessel. Per entrambi questi componenti sono stati realizzati nel corso del piano triennale 2006-2008 dei mock-up rispettivamente presso i laboratori SIET e nell'area dello Scalbatraio dell'Università di Pisa per investigare le fenomenologie di interesse per la sicurezza. Sul mock-up del fondo vessel sono quindi state eseguite prove per caratterizzare la miscelazione del Boro nel collettore inferiore del reattore che hanno prodotto dati per la validazione dei codici CFD commerciali. Questa validazione è tuttora in corso. Per quanto riguarda i generatori di vapore a tubi elicoidali sono state realizzate prove termoidrauliche sul mock-up a doppio tubo prototipico per l'identificazione dei campi di instabilità di funzionamento che hanno permesso di intraprendere lo sviluppo e la verifica di modelli numerici. Si è inoltre progettato un nuovo impianto per lo studio di tubi elicoidali di vari diametri di elica e per la valutazione di soluzioni alternative, per il quale si è proceduto alla preparazione dell'area individuata per la realizzazione.

Un'altra linea di attività portata avanti nell'AdP ha riguardato i codici di calcolo attualmente utilizzati per l'analisi incidentale negli attuali reattori LWR. Le prestazioni di questi codici (RELAP5, CATHARE e TRACE)

sono stata valutate alla luce delle caratteristiche dei reattori LWR evolutivi ed innovativi allo scopo di individuare le esigenze in termini di sviluppo e validazione da prendere in conto nella definizione di successivi programmi di ricerca.

Una delle problematiche investigate ha riguardato la necessità di utilizzare codici accoppiati per la simulazione della forte interazione impianto-contenimento nelle analisi incidentali per reattori modulari di piccola e media taglia. A questo scopo sono state effettuate simulazioni con codici accoppiati (RELAP5 per l'impianto e GOTHIC per il contenimento) e con codici provvisti di moduli specifici (TRACE) di transitori incidentali previsto per la facility SPES-3. I risultati ottenuti sono stati quindi confrontati con precedenti analisi realizzate con il solo RELAP5.

Nelle ultime annualità è stata anche considerata la possibilità di riattivare la facility sperimentale SPES-2, pure situata presso i laboratori SIET, per lo studio di tematiche rilevanti per la sicurezza di reattori evolutivi ed innovativi di tipo LWR. Un primo test sperimentale relativo ad un transitorio di diluizione del Boro, simile a quelli già condotti in altre facility internazionali (PKL, ROSA-IV), è stato definito tramite calcoli di pre-test con RELAP5 e la sua fattibilità su SPES-2 verificata. Inoltre è stata investigata tramite simulazioni REALP5 e TRACE la possibilità di realizzare un transitorio di completo Station Black-Out, come avvenuto nei reattori di Fukushima, in presenza dei sistemi passivi prototipici del reattore AP600 e di cui lo SPES-2 era stato in origine provvisto.

Gli studi per la valutazione della sostenibilità di reattori innovativi sono stati intrapresi già nel triennio 2006-2008 ma è nel secondo triennio dell'AdP che sono stati approfonditi. Essi sono stati per la maggior parte effettuati nell'ambito di gruppi di lavoro internazionali (OECD e IAEA) ed hanno riguardato i diversi aspetti: scenari energetici ed economici, valutazione di impatto del ciclo del combustibile, valutazione di resistenza alla proliferazione ed interfaccia safety-security.

Gli studi di scenario, che si sono avvalsi dei modelli economico-finanziari avanzati sviluppati dal CIRTEN e migliorati dalla partecipazione a gruppi di lavoro internazionali (Working Party Nuclear Energy Economics, e "Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle" della NEA, e "IAEA-NEA Uranium Group") hanno consentito di valutare diverse opzioni di taglia reattore e ciclo combustibile. In particolare sono stati effettuati sia studi di scenario con i codici DESAE e COSI, sia valutazioni economiche relativi al parco nucleare richiesto dall'obiettivo nazionale del pre-referendum, relativo al 25% del fabbisogno di energia elettrica al 2030. Nel post-referendum, partendo da un approccio globale sono state effettuate valutazioni e confronti dell'impatto delle varie fonti di energia a livello nazionale, regionale e internazionale, dal punto di vista economico e delle infrastrutture. In queste valutazioni è stato considerato l'utilizzo di fonti diversificate in aree extra nazionali. Per la parte nucleare si sono effettuate valutazioni sul ciclo del combustibile di reattori innovativi, con confronti tra ciclo aperto e ciclo chiuso, per avere una visione complessiva sugli aspetti principali, tra cui non-proliferazione, risorse, costi e scorie.

#### Linea Progettuale 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

L'utilizzo nel medio-lungo termine di sistemi nucleari a spettro veloce, unitamente all'adozione di cicli chiusi del combustibile, sono requisiti fondamentali di sostenibilità di questa forma di energia, sia in termini di disponibilità di materie prime sia di gestione dei rifiuti radioattivi.

Tra i sistemi nucleari a spettro veloce proposto in ambito Gen IV, tre sono le possibili scelte di fluido refrigerante primario:

- il gas;
- il sodio;
- i metalli liquidi pesanti (piombo e sue leghe).

A questi tre refrigeranti primari corrispondono gli altrettanti sistemi nucleari a spettro veloce selezionati dal Generation IV International Forum e i tre concetti proposti in ESNII, la European Sustainable Nuclear Industrial Initiative del SET-Plan europeo.

Un primo risultato delle attività svolte in ambito AdP, sia nel PT 2006-2008 che nel PT 2009-2011, è stato quello di analizzare le tre soluzioni proposte in ambito ESNII, in termini di sicurezza, affidabilità, fattibilità tecnologica, costi e scenari.

I reattori veloci raffreddati a gas attualmente studiati sono interessanti per via delle proprietà chimico-fisiche del gas (tipicamente elio), principalmente legate alla sua inerzia chimica e “trasparenza” anche ai neutroni; per contro presentano problemi di sicurezza legati al possibile incidente di depressurizzazione del circuito primario, con la conseguente incapacità di asportare il calore di decadimento con sistemi passivi, dunque la successiva degradazione del nocciolo.

I reattori veloci raffreddati a sodio rappresentano, senza dubbio, la tecnologia più matura e provata. Sono stati concepiti, realizzati e messi in operazione fin dagli albori dell’energia nucleare e, complessivamente, l’esperienza operativa accumulata ha raggiunto i 300 anni-reattore per i reattori sperimentali (ad es. EBR, FFTF, RAPSODIE, BOR-60) e i 100 anni-reattore per i reattori dimostrativi e di potenza (PHENIX, MONJU, BN-350, BN-600, SUPERPHENIX).

Sulla base dei nuovi criteri ed obiettivi, riguardanti anche la sicurezza, fissati dal Generation IV International Forum, i paesi interessati a questo concetto stanno sviluppando nuove idee e conoscenze che permettano di limitare gli inconvenienti derivanti principalmente dalla reattività chimica del sodio che reagisce violentemente con l’acqua e brucia a contatto dell’aria.

I sistemi nucleari raffreddati a metallo liquido pesante (piombo o lega eutettica piombo-bismuto) per certi aspetti presentano problematiche simili a quelle dei reattori a sodio ma comunque escludono completamente problemi di reattività chimica.

Negli ultimi anni la tecnologia dei metalli liquidi pesanti è stata ampiamente studiata e sviluppata anche in Europa e, in particolare, in Italia grazie a un considerevole numero di programmi finanziati dalla Commissione Europea (V, VI e VII Programmi Quadro EURATOM) e dal Ministero dello Sviluppo Economico (MSE) nell’ambito dell’Accordo di Programma fra questo Ministero e l’ENEA.

Da sempre ENEA ha realizzato una forte sinergia fra i programmi europei e l’AdP, permettendo di focalizzare le risorse disponibili, con risultati scientifici di elevato rilievo internazionale.

Il vantaggio offerto dai metalli liquidi pesanti, quali il piombo e l’eutettico piombo-bismuto, rispetto al sodio è di avere un alto punto di ebollizione e di non reagire chimicamente con l’acqua e con l’aria. Queste caratteristiche portano ad importanti semplificazioni impiantistiche che permettono un abbattimento dei costi a parità di prestazioni (es. potenza elettrica prodotta).

Esistono, peraltro, problemi di compatibilità dei materiali strutturali a contatto con i metalli liquidi pesanti che sono già oggetto di approfondite ricerche nell’ambito delle attività di R&S europee e nazionali, e per i quali si confida ragionevolmente di identificare le appropriate soluzioni tecniche.

Una volta risolti alcuni punti salienti della tecnologia del piombo che fino ad oggi non sono stati sufficientemente indagati e che, nella fattispecie, costituiscono l’oggetto dei programmi di R&S portati avanti in Italia in ambito AdP, sarà possibile, in linea di principio, realizzare un impianto dimostrativo di un sistema veloce raffreddato a piombo in tempi (2020-2030) congruenti con quelli previsti dai programmi internazionali per lo sviluppo di cicli del combustibile “sostenibili”.

Le attività effettuate, nei precedenti piani annuali di realizzazione (PAR) hanno riguardato:

- Progettazione di sistema
- Materiali strutturali e fabbricazioni
- Termoidraulica del refrigerante
- Analisi di sicurezza.

Nella progettazione di sistema si è provveduto alla implementazione di modelli di calcolo per la neutronica e la cinetica spaziale di nocciolo, con particolare riguardo all’applicazione di questi su sistemi LFR e SMR refrigerati a metallo liquido pesante. Si sono implementate attività di sviluppo di codici di neutronica e termoidraulica accoppiati, finalizzati all’analisi cinetica spaziale di un nocciolo LFR. Per quanto riguarda i codici di neutronica si è dato avvio ad una sistematica analisi di validazione e quindi di sviluppo del codice ERANOS, in particolare in rapporto al suo utilizzo sulla base della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) per i calcoli perturbativi generalizzati.

In ambito allo sviluppo e validazione di codici per la termoidraulica di sistemi LFR, si è avviata, in collaborazione con il CEA, la validazione del codice di sistema CATHARE-2 adattato per le analisi di sistema e di sicurezza degli LFR. Si è sviluppato e implementato, con la collaborazione del CIRTEN, il codice home-made di computazione fluidodinamica FEM-LCORE, che permette una descrizione 3-D del nocciolo del reattore a piombo mediante un approccio a sistemi porosi. Il codice, integrato nella piattaforma SALOME, ha permesso di studiare alcune condizioni incidentali relative al core di un LFR, studiando in particolare i transitori incidentali relativi al parziale flow-blockage di un elemento di combustibile. Si sono inoltre implementati modelli di turbolenza più accurati, ed è in fase di studio l'accoppiamento con codici di sistema 1-D (CATHARE-2), che permetterebbe di disporre di uno strumento di calcolo accurato ed efficace che permette l'analisi termoidraulica di sistema con il dettaglio 3-D dei sistemi e componenti in cui la modellazione 1-D non è sufficiente alla corretta simulazione dei fenomeni in gioco.

Nei precedenti PT si è inoltre provveduto alla completa concettualizzazione del nocciolo di un reattore che verta sugli obiettivi di dimostrazione della fattibilità della filiera, coerentemente con le linee guida della roadmap europea, e con i risultati evidenziati dalle analisi condotte precedentemente. Si sono quindi elaborate considerazioni ed analisi volte a supportare la concettualizzazione del nocciolo attraverso la sua completa caratterizzazione neutronica, termoidraulica e termomeccanica. L'identificazione di un approccio sistemico e la simultanea applicazione di analisi multidisciplinari alla progettazione del nocciolo del reattore studiato rappresentano il principale risultato dell'attività.

Nel prosieguo delle attività del PT 2009-2011, si sono anche realizzati studi di fattibilità circa campagne sperimentali e riutilizzo del reattore TAPIRO in appoggio alla progettazione dei sistemi LFR e SMR refrigerati a metallo liquido pesante. E' noto infatti che le attività di R&S richiedono una verifica di scopo delle misure e degli esperimenti proposti affinché le attività siano rappresentative dei requisiti tecnologici richiesti. Lo studio di fattibilità è consistito nel fornire una reinterpretazione della campagna sperimentale effettuata negli anni '80 sul reattore veloce TAPIRO da ENEA e SCK-CEN. A tal fine è stato costruito un modello di simulazione Monte Carlo (MCNPX) del reattore TAPIRO su cui sono state riprodotte una serie di misure nei canali sperimentali disponibili. L'accordo delle stime Monte Carlo con le misure sperimentali è generalmente buono e permette di considerare il modello di calcolo neutronico di TAPIRO come validato. Questo permetterà di progettare esperienze di supporto allo sviluppo di LFR, da effettuare mediante l'utilizzo del reattore TAPIRO, rappresentative delle condizioni di funzionamento del sistema in fase di studio, tagliando costi di progettazione e realizzazione. Inoltre il TAPIRO potrà utilizzarsi efficacemente come strumento europeo di taratura per strumentazione nucleare.

Uno dei maggiori punti critici nella progettazione dei sistemi LFR è la individuazione di appropriati materiali strutturali capaci di operare in piombo (altamente corrosivo poiché tende a dissolvere gli elementi di lega degli acciai) ad elevata temperatura e ad elevato tasso di irraggiamento (es. fuel cladding).

L'approccio europeo per molti anni è consistito nello sviluppare e quindi qualificare nuovi materiali strutturali (acciai F/M, ODS) che fossero capaci di assolvere a tale funzioni. Tale approccio ha dimostrato però una forte debolezza. Infatti le attività di sviluppo e qualifica di nuovi materiali strutturali richiedono forti investimenti sia in termini economici che temporali. Prima che un nuovo acciaio possa considerarsi qualificato come elemento strutturale per il fuel cladding occorre che ne venga caratterizzato il comportamento a swelling, creep-termico, creep-neutronico, infragilimento neutronico, fuel coolant chemical interaction (FCCI), (fuel coolant mechanical interaction FCMI), etc.. Tali attività, oltre a richiedere la disponibilità di una facility di irraggiamento richiede una sperimentazione non inferiore ai 15-20 anni. Inoltre, l'aver intrapreso la via degli acciai F/M, che presentano una ottima resistenza a swelling, ha aperto nuove problematiche legate al fenomeno del liquid metal embrittlement (LME) e del creep termico, problematiche assolutamente trascurabili sugli acciai austenitici. Vi è infine da considerare che fino ad oggi gli studi sulla corrosione in piombo degli acciai F/M e ODS ha dimostrato che il loro comportamento non è dissimile (spesso è peggiore) da quello di un acciaio austenitico.

In questo contesto, e vista la roadmap europea relativa allo sviluppo e implementazione dei sistemi LFR, ENEA e ANSALDO NUCLEARE hanno promosso un cambio di strategia, in sinergia con quanto proposto da SCK-CEN per MYRRHA (ADS) e CEA per ASTRID (SFR). L'approccio attuale per il DEMO-LFR prevede infatti l'utilizzo di materiali strutturali già qualificati per applicazioni nucleari in reattori veloci (tipicamente acciai

austenitici della famiglia dell' AISI 316), e lo sviluppo di sistemi di protezione contro la corrosione in piombo.

Attualmente l'acciaio di riferimento per il fuel cladding proposto da ENEA per il DEMO-LFR (ALFRED) è il 15-15 Ti mod (Si). Tale acciaio, sviluppato e qualificato dal CEA per i reattori a sodio (per il fuel e il fuel cladding sono moltissime le sinergie tra i sistemi a sodio e quelli a piombo) richiede comunque di essere qualificato in piombo, specialmente in termini di corrosione. Altri materiali strutturali da considerarsi sono l' AISI 316L per il vessel e gli internals, e il T91 (F/M) per le scatole dell'elemento di combustibile e il Generatore di Vapore.

Per incrementare le caratteristiche di resistenza alla corrosione dei materiali strutturali proposti quando operanti in piombo fluente ad elevate temperature, si è provveduto a sviluppare e realizzare, in collaborazione con CSM Spa, ricoprimenti di Fe-Al, Fe-Cr-Al, TiN mediante tecnica Physical Vapor Deposition (PVD). L'idea base è quella di creare una barriera altamente protettiva fra il sub-strato strutturale e il refrigerante. Per una completa caratterizzazione dei coating proposti e sviluppati, oltre ad un ampio programma di prove di qualifica materiali (tensile, creep, bending, creep-fatigue, corrosion, fretting, etc) si sono inoltre realizzati degli elementi scaldanti con elevata densità di potenza (fino ad 200 kW/m<sup>2</sup>) e con ricoprimenti a base di FeAl, al fine di simulare il reale comportamento di un fuel pin (generazione di potenza interna) operante in metallo liquido fluente ad una temperatura massima di 480 °C, sia in regime stazionario che di transitorio operativo.

Relativamente ai sistemi LFR si sono inoltre condotti studi di fabbricazione su componenti prototipici, quali elementi di combustibile di nuova concezione (vented), in collaborazione con FN spa. La progettazione meccanica dell'elemento di combustibile di un sistema LFR presenta infatti problematiche progettuali non comuni ai sistemi LWR e/o SFR, collegate alla spinta di galleggiamento, al corretto distanziamento tra pin, agli effetti di fretting, ai rischi di ostruzione e soprattutto alla necessità di garantire il raffreddamento dell'elemento anche in caso di arresto della macchina di refuelling. L'adozione di materiali e di specificità progettuali atte a risolvere le problematiche menzionate, è strettamente connessa alla fabbricabilità dei particolari proposti.

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si sono ulteriormente implementate le attività di ricerca e sviluppo per la caratterizzazione preliminare di generatori di vapore (GV) prototipici per applicazioni in sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR, SMR).

In particolare, considerando la soluzione proposta di GV per l'impianto DEMO-LFR ALFRED, che prevede l'utilizzo di tubi a baionetta a doppia parete con interposta intercapedine conduttiva, si sono realizzati una serie di studi sulle prestazioni del sistema, che hanno portato alla concettualizzazione e progettazione della sezione di prova per la caratterizzazione sperimentale delle prestazioni di un singolo elemento a doppia parete in piena scala, e la concettualizzazione e progettazione della facility Heavy liquid metal – pressurized water cooled tube facility (HERO), impianto sperimentale che ospiterà il tubo a baionetta del GV di ALFRED per le fasi di sperimentazione in piombo.

Relativamente alla strumentazione prototipica per metalli liquidi si è individuato, concettualizzato, progettato e realizzato, in sinergia con HZDR (Germania) un sistema di misura non intrusivo per la misura di portata in sistemi a piombo. Lo strumento, che sfrutta il principio della induzione elettromagnetica, è stato realizzato e installato sulla facility NACIE, dove si è realizzata una caratterizzazione preliminare dello strumento mediante test sperimentali di circolazione. I risultati ottenuti, seppur preliminari, sembrano dimostrare il corretto funzionamento dello strumento.

Nel PT 2009-2011 si è inoltre avviata una attività di "code-coupling" tra codici di sistema e codici di fluidodinamica computazionale (CFD). E' noto che per quanto riguarda l'utilizzo di codici numerici per il supporto alla progettazione e analisi di sicurezza dei sistemi LFR, i codici CFD riscuotono un continuo e sempre più esteso interesse da parte dei progettisti. I codici CFD permettono infatti di avere una più accurata e completa investigazione dei fenomeni analizzati, anche se a causa del loro elevato costo computazionale non possono sostituire i codici di sistema nell'analisi termoidraulica di insieme. I codici CFD sono quindi preferiti per l'analisi di fenomeni locali tridimensionali, mentre i codici di sistema sono preferiti per le analisi di sistema. Spesso però l'analisi termoidraulica di sistemi complessi richiede diversi livelli di simulazione, dal dettaglio locale 3D alla simulazione di sistema 1D. Attualmente però l'approccio utilizzato



prevede di avere simulazioni “stand-alone” sia con codici di sistema che con codici CFD, che inficia il risultato finale poiché viene annullata ogni retroazione tra i livelli di simulazione. Si è quindi lavorato per implementare uno strumento di calcolo, che basato su codici di sistema e CFD già disponibili (e validati), ne realizzi un accoppiamento bi-direzionale step-by-step, permettendo quindi di affrontare simulazioni di sistemi termoidraulici complessi in maniera più efficace ed accurata.

Relativamente alla tecnologia dei sistemi LFR, nell’ambito del PAR 2009-2011, si è provveduto a progettare una apposita sezione di prova da installare nell’impianto CIRCE, nella quale alloggiare un prototipo di pompa centrifuga ad asse verticale con girante autocentrante al fine di caratterizzarne, mediante misure di portata e prevalenza, le relative prestazioni fluidodinamiche.

Nell’ambito delle attività di caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW installato sull’impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova Integral Circulation Experiment (ICE ), sono state realizzate diverse sessioni sperimentali.

Prove a piena potenza sono state realizzate con lo scopo di ottenere informazioni utili in termini di portata di refrigerante (metallo liquido), accoppiamento termico fra sorgente termica e pozzo di calore, prestazioni del sistema di controllo della chimica del refrigerante, prestazioni di componenti prototipici (DHR-800 kW).

Si sono poi realizzate simulazioni sperimentali di alcuni scenari incidentali relativi ai sistemi LFR (perdita di portata di circolazione, perdita dell’acqua di refrigerazione), ottenendo utili informazioni e dati per la comprensione e l’analisi del comportamento incidentale di tali sistemi.

I risultati ottenuti hanno dimostrato la fattibilità termoidraulica (in scala 1 MW) del sistema primario del reattore LFR. Si sono inoltre ottenute utili informazioni per la caratterizzazione termoidraulica dei sistemi a piscina refrigerati a metallo liquido pesante (stratificazione termica, miscelamento, fatica termica, etc..), anche se la sezione di prova nella sua configurazione iniziale non permetteva di investigare dettagliatamente tali fenomeni. A tale proposito si sono definiti diversi interventi di up-grade sulla sezione di prova che sono stati successivamente implementati nell’ambito delle attività, e che hanno riguardato:

- installazione di un sistema di rimozione della potenza di decadimento da 40 kW (DHR), che utilizza aria come fluido termovettore; questo sistema, accoppiato al DHR ad acqua da 800 kW (utilizzato come pozzo termico), permette di simulare sperimentalmente dei transitori di “long-term station blackout” (evento tipo Fukushima);
- strumentazione del fuel pin bundle e della piscina di CIRCE al fine di ottenere dati relativi al coefficiente di scambio termico convettivo in fuel bundle (esperimento unico nel suo genere) sia in regime di circolazione forzata che di circolazione naturale, e dati circa la stratificazione termica e di miscelamento in piscina.

Attualmente la sezione di prova, modificata e profondamente strumentata, è in fase di esercizio nella facility CIRCE per la simulazione di scenari incidentali relativi ai sistemi LFR e per l’acquisizione di dati utili per la investigazione dei fenomeni di scambio termico e per la qualifica dei codici di calcolo proposti come strumenti di progettazione e analisi di sicurezza. Entro marzo 2013 tali dati saranno resi disponibili e analizzati dalla comunità scientifica.

Prove preliminari di “long-term station blackout” (tipo Fukushima) si sono comunque realizzate, in sinergia al progetto THINS (FP7-CE), dimostrando l’elevato grado di sicurezza e affidabilità dei sistemi nucleari refrigerati a metallo liquido pesante, anche in condizioni estremamente severe.

Relativamente al DHR si è poi elaborata una nuova specifica tecnica di prova, necessaria per la completa caratterizzazione del DHR da 800 kW. Partendo dalle prove già realizzate, che hanno dimostrato il corretto dimensionamento funzionale del DHR, e confermato il raggiungimento della crisi termica al di sotto di una certa soglia di portata, si sono definite una nuova serie di prove con strumentazione aggiuntiva e con modifiche all’attuale configurazione ICE.

Per quanto concerne la realizzazione di prove di scambio termico e perdite di carico in regime di circolazione mista (transizione dalla circolazione forzata alla circolazione naturale), si sono realizzati una serie di interventi sull’impianto NACIE, tra cui la installazione e strumentazione di un fuel pin bundle da 250 kW, installazione del sistema di regolazione e controllo potenza, installazione di uno scambiatore di

calore da 250 kW, operante con acqua in pressione (16 bar), e che utilizza la tecnologia dei sistemi a doppia parete con interposto gap conduttivo (polvere di acciaio) al fine di accrescerne la sicurezza e affidabilità. Con gli interventi sopra menzionati l'impianto NACIE sarà completato e operativo entro marzo 2013.

In preparazione degli esperimenti una serie di analisi numeriche di pre-test sono state realizzate, mediante il codice di sistema RELAP5. L'obiettivo è stato quello di analizzare la risposta del sistema durante le prove di circolazione naturale che simulano uno scenario di perdita di portata nel fuel pin bundle.

E' stata inoltre implementata, in via preliminare e adottando una schematizzazione molto semplificata dell'impianto NACIE, una serie di calcoli di pre-test accoppiando il codice di sistema RELAP5 con il codice CFD FLUENT. I calcoli hanno dimostrato come l'accoppiamento RELAP5-CFD permette di simulare correttamente il comportamento della facility NACIE, sia in regime di circolazione naturale che circolazione assistita per iniezione di gas.

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo tese al supporto dei sistemi LFR, e a completamento di quanto già realizzato nel precedente piano annuale mediante l'acquisizione di una pompa centrifuga con girante in acciaio austenitico rivestito in tantalio, si è provveduto alla progettazione, realizzazione e installazione dell'impianto a piombo denominato HELENA.

L'impianto, che sarà ampiamente utilizzato per la caratterizzazione dei materiali strutturali per metalli liquidi pesanti in ambiente a basso tenore di ossigeno, si inserisce nella attività di ricerca e sviluppo che ENEA realizza in ambito europeo. Tra i vari filoni di ricerca pianificati con il supporto dell'impianto HELENA, è prevista la realizzazione di prove di scambio termico e perdite di carico in fuel pin bundle refrigerati a piombo in regime di circolazione forzata.

Nei sistemi refrigerati a piombo, la compatibilità chimica fra materiali strutturali e refrigerante è fortemente correlata con il tenore di ossigeno disciolto nel metallo liquido. E' di fondamentale importanza quindi disporre di un sistema di regolazione e controllo del tenore di ossigeno disciolto nel metallo liquido che permetta di purificare il sistema nelle fasi di avvio e manutenzione, quando l'inquinamento da ossigeno è massimo, e di regolare il tenore di ossigeno entro i limiti desiderati durante il normale esercizio e i transitori operazionali. Elemento portante di tale sistema sono le sonde ad ossigeno, che permettono di realizzare il monitoraggio nel metallo liquido. Nell'ambito del PT 2009-2011, in collaborazione con la FER Strumenti, si è provveduto a progettare, prototipare e realizzare sonde a ossigeno per metalli liquidi basate sulla tecnologia delle celle elettrolitiche ad ossido di zirconio/ittrio. Si è inoltre concettualizzato il sistema di regolazione e controllo dell'ossigeno disciolto in sistemi a piscina sfruttando le competenze ed esperienza ENEA in questo settore, unico istituto di ricerca in Europa che dispone di una facility a piscina (CIRCE) di grandi dimensioni (90 t metallo liquido).

Ai fini della valutazione degli incidenti severi che portano al danneggiamento del combustibile, si sono realizzate per la prima volta nel contesto nazionale studi sull'interazione tra il combustibile (UO<sub>2</sub> e/o MOX fuel) ed il refrigerante (piombo fuso), e si sono approcciate metodologie per valutare il tasso di rilascio dei prodotti di fissione dal combustibile irraggiato di un sistema LFR. La metodologia proposta per la valutazione del tasso di rilascio dei prodotti di fissione prevede l'utilizzo di un metodo di analisi completamente statistico basato sull'utilizzo di codici Monte Carlo, accoppiato con codici di fuel-pin-performance basati su modelli semi-empirici (approccio deterministico).

Infine si sono analizzati numericamente possibili scenari incidentali sui sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo, con l'obiettivo di identificare e supportare future attività di ricerca e sviluppo, sperimentazione, qualifica componenti, che nel medio-lungo termine possano poi supportare il relativo processo di licensing di tali sistemi.

A tale scopo si sono individuati e analizzati preliminarmente i seguenti scenari incidentali.

- Perdita di integrità del nocciolo (core degradation). L'attività ha avuto come obiettivo la verifica di sicurezza di un sistema nucleare veloce refrigerato a piombo a seguito di un evento incidentale che comporti la parziale o completa distruzione del nocciolo. Si è quindi simulato un transitorio di "fuel dispersion", parametrizzando in funzione della porosità del combustibile. I risultati prodotti hanno messo in evidenza l'importanza di una corretta e accurata valutazione delle forze di galleggiamento e di trascinamento che agiscono sul combustibile una volta disperso nel refrigerante, sottolineando

come la porosità del combustibile (che è funzione della storia del combustibile e del relativo burn-up) e la velocità del refrigerante nelle varie sezioni del sistema primario giocano un ruolo predominante nella dispersione e intrappolamento del combustibile nei vari componenti del reattore.

- Perdita di refrigerazione (flow blockage). Nell'ambito dell'attività si è creato e validato un dominio di calcolo semplificato per codici di fluidodinamica computazionale, che ha come obiettivo l'analisi della mutua interazione fra diversi elementi di combustibile a seguito della parziale o completa perdita di portata di refrigerazione attraverso uno di essi. A seguito delle simulazioni numeriche realizzate si è evidenziato come l'effetto del flow blockage sugli elementi di combustibile consiste di due effetti, uno locale e l'altro globale. L'effetto locale, governato dai moti di ricircolo secondario che hanno luogo a valle dell'ostruzione, si manifesta con un picco di temperatura locale sulla guaina del combustibile, mentre l'effetto globale, governato dalla riduzione di portata massica nell'elemento di combustibile, si manifesta con un incremento della temperatura del refrigerante e quindi della guaina all'uscita della zona attiva del combustibile.
- Parziale congelamento del sistema primario. Si è creato e validato un dominio di calcolo semplificato per codici di fluidodinamica computazionale che permetta di investigare il comportamento termoidraulico del sistema primario (GV - pompa primaria, nocciolo) di un reattore LFR a seguito di un repentino ed esteso congelamento del metallo liquido fluente attraverso il GV.
- Valutazione delle interazioni fluido-struttura nei sistemi LFR. Scopo dello studio è stata la valutazione preliminare degli effetti strutturali (in termini di risposta globale del sistema) indotti da un terremoto di riferimento sui componenti "safety relevant" di un sistema nucleare LFR. Dai risultati ottenuti si evidenzia come la sollecitazione massima dovuta allo sloshing del piombo ha luogo nella parte inferiore dell' inner vessel, e gli spostamenti indotti su alcuni componenti interni al vessel non sono affatto trascurabili, e bisognerà quindi tenerne conto nella progettazione dei vari sistemi.

Infine, sia nel PT 2006-2008 che nel PT 2009-2011 si è studiato il riprocessamento del combustibile ad ossidi misti mediante un processo di elettrorefinazione in ambiente di sali fusi (cloruro di litio contenente ossido di litio), alla temperatura di 650 °C. La possibilità di applicare la pirometallurgia al riprocessamento di diverse tipologie di combustibile nucleare consente il recupero dei radionuclidi a lunga vita ed il loro riciclo in diversi tipi di reattori ai fini della trasmutazione. Inoltre, per i combustibili previsti per i reattori di IV generazione (UO<sub>2</sub>, MOX, a carburi, a nitruri, ecc.), rappresenta l'unica effettiva possibilità di trattamento, non essendo applicabili in questi casi i più comuni e collaudati metodi di idrometallurgia. Al fine di verificare la fattibilità del processo pirometallurgico è stato realizzato presso il CR Casaccia, l'impianto pilota Pyrel III, operante "a freddo" sia con combustibile metallico (simulato), sia con ossidi metallici.

### **Obiettivo finale dell'attività**

Gli obiettivi programmatici dell'intero progetto sono a breve, medio e lungo termine, e precisamente:

- A **breve termine**: contribuire a mantenere le competenze tecniche e scientifiche necessarie agli studi sulla sicurezza dei reattori. Sviluppare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche, in particolare dal punto di vista della sicurezza e della sostenibilità anche grazie ad accordi bilaterali con grandi istituzioni di ricerca quali il CEA e l'IRSN francesi, i laboratori del DOE americano, ecc., consentire all'Italia di partecipare a pieno titolo alle grandi iniziative di R&S internazionali/europee (GIF, INPRO, IFNEC, SNETP, ESNII, EERA, programmi EURATOM, ecc.) sul nuovo nucleare.
- A **medio termine**: supportare il sistema di ricerca nucleare italiano per lo sviluppo di reattori di IV generazione (LFR e SMR refrigerati a piombo), con relativo ciclo del combustibile in termini di competenze, infrastrutture di ricerca, laboratori, processi di qualificazione, ecc. Conservare ad alto livello le competenze sul nucleare da fissione per rendere possibile la valutazione di progetti di reattori innovativi proposti in ambito internazionale.
- Nel **lungo termine**: sfruttare le competenze e le infrastrutture di ricerca così sviluppate per partecipare a pieno titolo alla progettazione, realizzazione ed operazione di un prototipo dimostrativo di SMR refrigerato a piombo e di sistemi nucleari di quarta generazione a ciclo chiuso quale il *Lead-cooled Fast Reactor* in ambito *European Sustainable Nuclear Industrial Initiative* e GIF.

## **Descrizione dell'attività a termine**

Il programma triennale prevede l'effettuazione delle seguenti macro-attività che, a loro volta, si articolano in attività elementari i cui obiettivi intermedi per la presente annualità sono riportati nel paragrafo "Elenco degli obiettivi intermedi":

- Messa a punto di metodi e modelli fisico-matematici per la stima e caratterizzazione di rilasci e dispersione di radionuclidi a seguito di sequenze incidentali; sviluppo e validazione di piattaforme di calcolo avanzate per l'analisi neutronica, termo-idraulica e degli Incidenti Severi (SA); sviluppo e qualifica librerie per schermaggio e dosimetria;
- Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o pre-emergenza; studi deterministici, probabilistici (PSA) e probabilistici-deterministici (IDPSA) per la stima del rischio, le verifiche di sicurezza e l'analisi di sequenze incidentali; studi per la valutazione della sostenibilità del ciclo di reattori innovativi.
- Qualifica e caratterizzazione sperimentale di componenti critici e strumentazione prototipica; realizzazione di campagne sperimentali per la validazione di modellistica e codicistica
- Sviluppo e validazione di codici di calcolo per l'analisi termo-fluidodinamica dei sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo; progettazione di dettaglio del nocciolo del dimostratore; studi di dinamica spaziale; progettazione del sistema primario e dei sistemi di rimozione del calore (SG, DHR, RVACS); sviluppo di strumentazione e sistemi di controllo a supporto del progetto.
- Caratterizzazione acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo;
- Implementazione infrastrutture di ricerca (HELENA), e aggiornamento di infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE), per la caratterizzazione del fascio di barrette, caratterizzazione sperimentale dei sistemi di trasporto termico (DHR, SG), implementazione e qualifica di strumentazione prototipica. Implementazione del laboratorio di termoidraulica dei metalli liquidi per la completa caratterizzazione dei refrigeranti per sistemi nucleari veloci.
- Studi e sperimentazione in supporto alla progettazione del combustibile nucleare per reattori veloci, interazione refrigerante - combustibile – camicia; analisi numerica di scenari operativi ed incidentali.

## **Prodotti significativi previsti alla fine del triennio**

### *Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare*

- ✓ Sviluppo e validazione di codici e metodi per studi e analisi di sicurezza e sostenibilità e di metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari
- ✓ Caratterizzazione sperimentale di componenti critici e strumentazione prototipica per verifiche e valutazioni rilevanti per la sicurezza

### *Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione*

- ✓ Infrastrutture Sperimentali: realizzazione e completamento di impianti e attrezzature presso il Centro Ricerche Brasimone per studi e ricerche su sistemi SMR refrigerato a metallo liquido e LFR (impianti CIRCE, NACIE, HELENA, HERO e prototipi di generatore di vapore)
- ✓ Sviluppo di strumenti di calcolo per progettazione neutronica, termoidraulica e termomeccanica di sistemi refrigerati a metallo liquido pesante e di metodologie di calcolo per l'analisi di sicurezza dei sistemi LFR e SMR a piombo

## ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

La conservazione di un sistema di competenze scientifiche in grado di assicurare, in maniera autonoma ed indipendente, la gestione di emergenze derivanti da incidenti anche severi che potrebbero aver luogo nell'immediata vicinanza dei nostri confini è di fondamentale importanza per il nostro Paese.

Nel medio e lungo termine invece, i Paesi europei, l'Italia inclusa, potrebbero dover rivedere il proprio mix energetico per problemi connessi alla sicurezza di approvvigionamento energetico, agli elevati costi. L'opzione nucleare potrebbe quindi ancora nel lungo periodo un ruolo non trascurabile nel sistema energetico europeo e nazionale. I sistemi nucleari di quarta generazione, e in particolare i sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo, potrebbero assolvere a tale compito.

Quindi condizione necessaria per lasciare aperta l'opzione nucleare da fissione in Italia, in particolare di quarta generazione, è lo sviluppo di competenze e infrastrutture di ricerca in ambito LFR e SMR refrigerati a piombo nel contesto delle collaborazioni internazionali, su cui il sistema di ricerca italiano e l'industria nazionale del settore già gioca un ruolo di leadership sia a livello comunitario che internazionale.

### ***LINEA PROGETTUALE 1:***

#### ***SVILUPPO COMPETENZE SCIENTIFICHE NEL CAMPO DELLA SICUREZZA NUCLEARE***

##### ***PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ***

###### ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

In questa linea progettuale vengono portate avanti le attività di mantenimento e sviluppo di competenze nel campo della sicurezza nucleare in gran parte già trattate nei piani triennali precedenti. Le attività previste, principalmente svolte in un contesto internazionale, riguardano l'acquisizione degli strumenti, delle metodologie e delle tecnologie più avanzate che permettano una valutazione indipendente circa la sicurezza, sostenibilità e affidabilità delle concezioni innovative oltre che delle installazioni nucleari attuali.

La linea progettuale si articola nei seguenti obiettivi:

- Acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro corretto utilizzo. Questi strumenti, in gran parte oggetto di accordi di collaborazione con gli enti francesi CEA e IRSN, sono relativi alle diverse tematiche implicate nel funzionamento di un sistema estremamente complesso come un impianto nucleare: modellistica di base per la realizzazione di librerie di dati nucleari, codici di neutronica deterministici e Monte Carlo per l'analisi neutronica del reattore, piattaforme di calcolo avanzate con capacità "multi-scale" e "multi-physics" per la simulazione T/H dell'intero impianto e di specifici componenti, codici di calcolo per la valutazione delle conseguenze di incidenti gravi, modellistica per la valutazione del rilascio e della diffusione dei contaminanti radioattivi, metodi per la valutazione degli impianti nucleari sotto l'aspetto della resistenza alla proliferazione nucleare ed agli aspetti di interfaccia safety-security. Continua il consolidamento di conoscenze e di acquisizione di metodi per valutazioni di sostenibilità relativamente alla resistenza alla proliferazione nucleare ed alla nuclear security, inclusa la sua interfaccia con la safety.
- Sviluppo di metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari tenendo conto dell'evento di Fukushima Dai-ichi e delle risultanze degli stress test europei. In particolare si opererà per la creazione di un sistema esperto a supporto delle valutazioni di sicurezza per i reattori europei, per l'applicazione di approcci di tipo probabilistico, deterministico ed integrato (probabilistico-deterministico) per la sicurezza di reattori innovativi che tenga conto dell'affidabilità dei sistemi di sicurezza passivi.
- Realizzazione di attività sperimentali e di studi a supporto della qualifica di sistemi, strumentazione e componenti innovativi e della validazione della modellistica per l'analisi incidentale di reattori

innovativi. Queste attività sono principalmente indirizzate al completamento dell'impianto integrale SPES3 in corso di realizzazione presso la SIET ed alla progettazione/realizzazione di campagne sperimentali in mock-up di componenti realizzati nel corso del precedente piano triennale.

## **a. Acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità**

### **a.1 Dati nucleari e librerie per schermaggio e dosimetria**

Per quanto riguarda le attività relative ai dati nucleari ed alla generazione di librerie per schermaggio e dosimetria si prevedono due azioni principali:

- 1) attività di misura (nell'ambito dell'esperimento internazionale n\_TOF presso il CERN) e calcolo di dati nucleari di fissione, con particolare riferimento a Pu-238-239 nel 2012 e U-233-234 nel 2013;
- 2) completamento del lavoro dedicato alla generazione di una libreria di lavoro accoppiata neutronica/fotonica a gruppi larghi per applicazioni di schermaggio e danno da radiazione nei reattori LWR, con specifica vocazione alla dosimetria del recipiente in pressione. Questa seconda attività si svolge in ambito NEA (JEFF e WPRS Expert Group on Radiation Shielding and Dosimetry) e IAEA.

#### Risultati/Deliverable:

- LP1.a.1\_a Rapporto tecnico sulle attività legate all'esperimento n-TOF
- LP1.a.1\_b Rapporto tecnico sulla nuova Libreria BUGENDF70.BOLIB

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **a.2 Metodi Monte Carlo e deterministici per analisi di sicurezza nocciolo e stoccaggio combustibile**

L'attività prevede la messa a punto di tecniche per lo studio di comportamenti anomali del nocciolo in fase di start up o in fase incidentale con metodi Monte Carlo. L'attività si svolgerà nell'ambito della collaborazione con IRSN ed internazionale (OECD-NEA).

Per i codici deterministici, in continuità con le attività svolte nelle precedenti annualità, si prevede di approfondire, sviluppare e consolidare, le competenze relative ad alcuni aspetti della sicurezza dei reattori LWR, predominanti in Europa, mediante valutazione di proprietà neutroniche e termoidrauliche di nocciolo. Lo studio sarà svolto utilizzando gli strumenti ed i codici (APOLLO2-CRONOS) acquisiti nell'ambito dell'accordo di cooperazione tra ENEA e CEA.

Sempre nell'ambito di questa cooperazione, si prevede di acquisire il codice di calcolo termoidraulico FLICA (codice di riferimento per l'analisi termoidraulica di nocciolo in reattori PWR ad acqua leggera accoppiato con il codice APOLLO2-CRONOS) anche nell'ottica di creare una catena completa di codici per le analisi di sicurezza di reattori LWR e in considerazione dei previsti sviluppi per applicazioni in reattori di nuova generazione.

#### Risultati/Deliverable:

- LP1.a.2\_a Rapporto tecnico sullo sviluppo metodi Monte Carlo
- LP1.a.2\_b Rapporto tecnico su valutazioni neutroniche per analisi di sicurezza di un PWR
- LP1.a.2\_c Rapporto tecnico su acquisizione del codice FLICA

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **a.3 Acquisizione, sviluppo e validazione di strumenti di calcolo per la valutazione delle conseguenze di incidenti gravi**

Gli strumenti di calcolo dedicati all'analisi degli incidenti gravi sono stati acquisiti nell'ambito delle collaborazioni bilaterali con l'IRSN francese e la NRC americana. Sono essenzialmente codici di calcolo sviluppati sia per studi specifici, come l'analisi termo-idraulica e termo-meccanica del nocciolo degradato (ICARE/CATHARE e DRACCAR), sia per la simulazione integrata di scenari incidentali (ASTEC e MELCOR). Nella corrente annualità si procederà all'ulteriore arricchimento della loro matrice di validazione tramite applicazioni concordate nell'ambito delle collaborazioni sopra citate:

- ICARE/CATHARE: si procederà al calcolo di una sequenza incidentale severa con riferimento a TMI-2, che ha come sbocco internazionale un'attività prevista in OECD/CSNI/WGAMA attraverso un benchmark di confronto code-to-code;
- DRACCAR: continuerà la valutazione dei modelli relativi al comportamento termico della barretta di combustibile;
- MELCOR e ASTEC: si procederà alla valutazione della risposta integrale, in fase incidentale, del sistema di contenimento e alla identificazione delle possibili vie di fuga all'esterno (vulnerabilità).

Risultati/Deliverable:

- LP1.a.3\_a Rapporto tecnico su calcoli e validazioni relativi ai codici di calcolo specifici per l'analisi degli incidenti gravi

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**a.4 Metodi per valutazioni di sostenibilità**

Continua il consolidamento di acquisizione di conoscenze e metodi che permettano di valutare la sostenibilità del nucleare nei diversi aspetti.

Relativamente alla resistenza alla proliferazione nucleare ed alla nuclear security, inclusa la sua interfaccia con la safety, l'attività verrà condotta principalmente in un contesto internazionale (es. GIF, IAEA, NEA e G8). Continua la partecipazione ai gruppi di lavoro GIF Proliferation Resistance and Physical Protection (PR&PP-WG) e INPRO (collaborative project PROSA) per un ulteriore sviluppo delle metodologie di valutazione della resistenza alla proliferazione indirizzato più ad aspetti applicativi, in particolare per i sistemi innovativi e a supporto ai decisori politici. Comincia quest'anno un'attività per la valutazione PR&PP in reattori veloci GenIV utilizzando la metodologia GIF svolta in collaborazione con il JAEA.

Continueranno anche analisi sull'interfaccia tra safety e security, sia in termini di fattori scatenanti con impatti su entrambe, sia di sinergie o possibili interferenze, alla luce delle più recenti normative e delle "lesson learned" dall'incidente di Fukushima.

Sempre nell'ambito di sviluppo di metodi per valutazioni di sostenibilità, in collaborazione con il CEA inizierà il lavoro congiunto di sviluppo sul codice di scenario COSI, per includere analisi delle incertezze e utilizzo per reattori di nuova generazione (LFR).

Risultati/Deliverable:

- LP1.a.4\_a Rapporto tecnico sullo stato di sviluppo di metodologie e analisi per valutazioni sulla resistenza alla proliferazione e security

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**b. Metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali**

**b.1 Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o pre-emergenza**

La revisione critica della sicurezza degli impianti nucleari a seguito dell'evento di Fukushima, operata in diverse nazioni del mondo sui vari tipi d'impianto (Stress Tests), ha evidenziato la necessità di munirsi di tutta una serie di dati, informazioni di sistema, strumenti di calcolo integrale e meccanicistico, al fine di essere preparati ad operare, nel più breve tempo possibile dopo l'incidente, valutazioni utili per la stima dell'entità del danno immediato e del rischio associato al personale di centrale ed alla popolazione. Al fine di rendere possibile una tale valutazione per i reattori europei ed in particolare per quelli siti in prossimità dei nostri confini, si condurrà un'attività di acquisizione ed elaborazione dei dati e degli strumenti di calcolo per la realizzazione di un data base esperto e di una piattaforma di simulazione focalizzata sugli eventi incidentali, per l'analisi e la previsione del rischio a supporto dei processi decisionali in una eventuale situazione incidentale e di pre-emergenza:

- calcolo dell'inventario di nocciolo, che verrà effettuato con la metodologia sviluppata nel precedente PAR;
- calcoli di impianto con RELAP5-3D e/o RELAP SCDAP, MELCOR e/o ASTEC per determinare il carico di materiale che può essere disperso nel territorio, con successiva stima dell'impatto radiologico e tossico (chimico);
- messa a punto di una metodologia e di un software che, in modo veloce e adattabile, fornisca una stima del rilascio di materiale radioattivo (gas, aerosol e particolato) in ambiente a seguito di incidente grave;
- sviluppo di una catena di simulazione "fast running" per la previsione dell'evoluzione plausibile dell'evento.

Risultati/Deliverable:

- LP1.b.1\_a Rapporto tecnico sui calcoli di inventario di nocciolo
- LP1.b.1\_b Rapporto tecnico sui calcoli per la caratterizzazione dei vari impianti nucleari in condizioni di incidente grave
- LP1.b.1\_c Realizzazione di un data base esperto per supportare la gestione di una situazione di crisi
- LP1.b.1\_d Rapporto tecnico sullo sviluppo di una catena di simulazione "fast running" per le fasi avanzate dell'incidente

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

***b.2 Applicazione di metodologia PSA e IDPSA (approccio probabilistico-deterministico) del tipo Risk Informed per la stima del rischio da eventi esterni e lo studio di sequenze incidentali in impianti innovativi***

Scopo peculiare delle attività di Safety Assessment e dei recenti studi di "Stress Test", è la verifica della tenuta di parti e componenti d'impianto a fronte di sollecitazioni esterne, provocate dall'accadimento di eventi naturali parossistici, come terremoti, tsunami, inondazioni rilevanti, oppure originate dall'uomo, come la caduta di un aereo civile o militare, un attacco terroristico, etc. In questo contesto si approfondirà l'utilizzo della metodologia di PSA (Probabilistic Safety Assessment) di livello 1 e 2 per l'analisi dell'impatto sulle varie tipologie d'impianto, provocato da eventi iniziatori esterni, considerando anche la possibile contemporaneità o la successione senza soluzione di continuità, di più eventi esterni naturali (con identificazione delle vulnerabilità della difesa in profondità). Inoltre, per rendere possibile lo studio di alcune sequenze incidentali rilevanti ai fini della sicurezza della risposta dei sistemi presenti in impianti nucleari innovativi, si procederà ad uno studio di forte contenuto innovativo, basato su un approccio integrato probabilistico-deterministico (metodo IDPSA) che richiede, come primo passo, l'individuazione e l'ordinamento dei principi d'attuazione del metodo e poi, come base avanzata di studio, l'individuazione delle vulnerabilità della difesa in profondità in un contesto di analisi di tipo Risk Informed.

Risultati/Deliverable:

- LP1.b.2 - Rapporto tecnico sulle metodologie di analisi degli eventi esterni e sulla stima del rischio

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

***b.3 Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori innovativi***

Nell'ambito degli studi eseguiti durante le recenti attività del PAR 2011, si è proceduto all'analisi di sequenze incidentali critiche (BDBA) per valutare la risposta dell'impianto con indagini sulle funzioni di sicurezza come, ad esempio, lo smaltimento della potenza residua. Si è anche proceduto allo studio di eventi che possono portare a perdita di funzioni di sicurezza basilari, quali il controllo della reattività, lo smaltimento del calore residuo, il confinamento dei prodotti radioattivi. Nella corrente annualità, sfruttando i risultati ottenuti dalle ricerche compiute nell'anno precedente, si procederà all'approfondimento del tema in oggetto per ottenere informazioni utili alla realizzazione di una matrice di ranking dei



punti di forza e di debolezza dell'uno o dell'altro approccio. Il lavoro richiederà di operare una classificazione qualitativa durante le complesse modalità di risposta dei sistemi attivi e passivi, operate nel tentativo di mitigare o abbattere le sequenze incidentali in esame. Sarà necessario investigare molto a fondo l'evoluzione fenomenologica di alcuni transitori incidentali in reattori innovativi. Lo studio sarà basato su sequenze critiche opportunamente selezionate che permettano di individuare la maggiore o minore efficacia dell'impiego di sistemi attivi piuttosto che passivi o viceversa.

Risultati/Deliverable:

- LP1.b.3 Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori innovativi a fronte di sequenze incidentali significative ai fini della sicurezza

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **c. Sperimentazione e Calcolo in Appoggio agli Studi sulla Sicurezza**

#### **c.1 Studi per il completamento della Facility SPES3 presso la SIET**

Disporre di attrezzature sperimentali per studiare le caratteristiche di sicurezza intrinseche dei reattori innovativi e l'utilizzo di sistemi di sicurezza passivi permette la validazione di metodologie e codici di calcolo per le necessarie analisi sui reattori attuali e di nuova generazione.

L'obiettivo di questa attività è di valutare la possibilità di completare la facility SPES3 (simulatore integrale di SMR), parzialmente realizzata presso i laboratori SIET nel corso dei PAR precedenti, utilizzando componentistica e strumentazione esistente. A questo scopo si realizzerà uno studio di fattibilità relativo alla configurazione della facility che preveda l'utilizzo combinato dei componenti esistenti delle facility SPES-2 e SPES-3, per valutarne la rappresentatività nello studio di fenomenologie critiche dell'accoppiamento "circuito primario-contenimento" e l'adeguatezza alla validazione dei codici termoidraulici di sicurezza. Lo studio prenderà in considerazione, nel dettaglio, tutti gli aspetti critici, in particolare quelli derivanti dalla necessità di utilizzo di componenti esistenti, riducendo all'indispensabile gli interventi di modifica del hardware ed includerà una stima di tempi e costi per la realizzazione della nuova configurazione.

Risultati/Deliverable:

- LP1.c.1 Studio di fattibilità per il completamento della facility SPES3

Principali collaborazioni: CIRTEN, SIET

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

#### **c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi**

Nel corso del PAR 2012 proseguiranno le attività di investigazione sperimentale e sviluppo di modelli analitici relativi a strumentazione prototipica e componenti critici per i quali diverse infrastrutture sperimentali sono state realizzate nel corso dei PAR precedenti:

- messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES3: integrazione nello "Spool Piece", attualmente composto di sonda capacitiva e drag disk per misura del grado di vuoto e del flusso di quantità di moto, di uno strumento per la misura della velocità; completamento del data set sperimentale per la caratterizzazione della strumentazione; messa a punto di un modello numerico;
- attività di investigazione sperimentale e sviluppo di modelli analitici relativi a componenti innovativi per i quali diverse infrastrutture sperimentali sono state realizzate nel corso dei PAR precedenti come i mock-up di lower plenum e generatore di vapore a tubi elicoidali in parallelo. L'ampliamento delle relative matrici di prova permetterà di validare e qualificare codici di calcolo e modelli per lo studio di problematiche come miscelamento termico e scambio termico rilevanti per i reattori di nuova generazione.

### Risultati/Deliverable:

- LP1.c.2\_a Realizzazione e qualifica di strumentazione prototipica per la misurazione della portata bifase
- LP1.c.2\_b Validazione codici e qualifica modelli per problematiche di miscelamento e scambio termico in reattori innovativi

Principali collaborazioni: CIRTEN, SIET

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

## **LINEA PROGETTUALE 2:**

### **COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE PER IL NUCLEARE DI IV GENERAZIONE**

#### **PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ**

##### **Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012**

Nell'ambito delle attività per il nucleare di IV generazione le attività si sono focalizzate sulla tecnologia dei reattori a piombo sia in una prospettiva futura di sviluppo del nucleare, sia a causa dell'interesse e della competenze espresse dall'industria Italiana.

L'obiettivo principale del presente piano è quindi il supporto alle attività di ricerca e sviluppo finalizzate alla costruzione del reattore dimostrativo a piombo, di concezione ENEA-ANSALDO, denominato ALFRED. Sono state individuate tre macro aree di intervento, tutte afferenti allo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR refrigerati a piombo, che rappresentano altrettanti ambiti di criticità per ALFRED.

La prima macro area di intervento è denominata "progettazione di sistema ed analisi di sicurezza". Il progetto di un sistema LFR di grande o di piccola taglia (ALFRED, SMR-Lead), deve rispondere ai tre requisiti fondamentali di sicurezza, sostenibilità ed economicità affinché esso possa essere accettato ed attuato. Nel corso di questa annualità verranno approfonditi gli aspetti di sostenibilità. Verrà inoltre valutata la possibilità di utilizzare il reattore TAPIRO sia per studi di dinamica neutronica tramite simulazioni di controllo di criticità sia per prove di irraggiamento preliminari su piccoli campioni di materiale. Si prosegue inoltre con le attività di concettualizzazione e progettazione del nocciolo del DEMO-LFR, e si attivano studi e analisi di sicurezza sia sul sistema LFR che sul combustibile nucleare. Infine si proseguirà con le attività di studio relativamente al rilascio e migrazione dei prodotti di fissione in caso di scenari di "core degradation" e dell'interazione fuel-coolant

La seconda macro area ("materiali e fabbricazioni") ha un carattere decisamente tecnologico. E' principalmente dedicata ad esplorare l'applicabilità di differenti tecnologie di protezione dei materiali alla realizzazione di guaine di combustibile per reattori refrigerati a piombo. Si tratta di tecnologie sviluppate da centri di ricerca italiani che verranno applicate e qualificate sperimentalmente in condizioni simili a quelle operative. Saranno anche sviluppate tecnologie accessorie alla manipolazione in sicurezza dei sistemi operanti in piombo, come richiesto dalla qualifica sperimentale.

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

#### **a. Progettazione di sistema e analisi di sicurezza**

##### **a.1 Progettazione di sistema**

Nell'ambito dell'attività si realizzeranno studi orientati alla valutazione dello stato dell'arte e delle prospettive di sviluppo dei principali reattori della IV Generazione, con particolare riferimento alla sostenibilità dei sistemi LFR e SMR veloci refrigerati a piombo.

Si procederà inoltre, in sinergia con quanto già realizzato nel PAR 2011, nella implementazione di attività di studio e installazione di componenti e strumentazione sul reattore veloce TAPIRO, per il suo futuro utilizzo in ambito europeo ed internazionale come reattore di ricerca in supporto ai sistemi LFR, sia per studi di dinamica neutronica in piombo, sia per validazione di codici di calcolo e qualifica strumentazione nucleare.

Risultati/Deliverable:

- LP2.a.1\_a Studi di sostenibilità sui sistemi nucleari refrigerati a piombo.
- LP2.a.1\_b Report sull'utilizzo del reattore TAPIRO a supporto dello sviluppo dei sistemi LFR

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **a.2 Progettazione nocciolo LFR**

Nell'ambito dell'obiettivo si implementeranno studi sull'analisi di incertezze e rappresentatività di esperienze a potenza zero a supporto di sistemi critici e sottocritici (ADS) raffreddati a piombo. Scopo dell'attività sarà l'applicazione della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) al caso della esperienza a potenza zero GUINEVERE, sia in configurazione critica che sottocritica (tipo ADS), con nocciolo caricato con combustibile metallico. Per mezzo del codice ERANOS saranno prodotti i coefficienti di correlazione tra quantità integrali relative al sistema GUINEVERE ed analoghe quantità relative al sistema di riferimento MYRRHA.

Relativamente agli studi di dinamica sui sistemi LFR e SMR, l'attività consisterà nello sviluppo di procedure per la generazione di una libreria dinamica di dati nucleari di base (sezioni d'urto) in funzione della temperatura, in vista del successivo accoppiamento della libreria medesima con la fase di calcolo dei transitori in sistemi LFR/ADS (e ADS SMR refrigerati a piombo). Si provvederà inoltre alla definizione ed implementazione del sistema di calcolo neutronico per l'analisi in condizioni stazionarie e transitorie di sistemi tipo MYRRHA in configurazioni sottocritiche.

Relativamente alla concettualizzazione del DEMO-LFR, si procederà alla caratterizzazione neutronica e termoidraulica della configurazione di riferimento del nocciolo del reattore AFRODITE - Advanced Fast Reactor Oriented to the Demonstration of the Innovative lead Technology, che permetta di ricavare le informazioni di dettaglio relative alle performance del sistema e dimostri la rispondenza ai criteri di progetto definiti ed implementati nella progettazione concettuale del reattore effettuata nella precedente annualità.

Risultati/Deliverable:

- LP2.a.2\_a Esperienza GUINEVERE critica e sottocritica con combustibile metallico. Analisi coefficienti di correlazione con MYRRHA
- LP2.a.2\_b Procedure per la generazione di dati nucleari di base in funzione della temperatura per il calcolo di transitori in sistemi LFR
- LP2.a.2\_c Modello di calcolo neutronico per l'analisi in condizioni stazionarie e transitorie di sistemi tipo MYRRHA in configurazioni sottocritiche
- LP2.a.2\_d Neutronic and Thermal/Hydraulic characterization of the AFRODITE core

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **a.3 Analisi di Sicurezza**

Nell'ambito della linea di azione si avvieranno attività di supporto alla progettazione del combustibile nucleare. Si realizzeranno quindi studi di investigazione su modelli di rilascio dei gas di fissione per combustibili MOX ad elevato burnup, tipici dei sistemi nucleari innovativi. Tali modelli, mediante database sperimentali disponibili, e tramite l'utilizzo di fuel-pin mechanic code (es. TRANSURANUS), saranno validati mediante analisi comparativa dei risultati ottenuti.

Si provvederà inoltre, ancora tramite fuel-pin mechanic code (es. TRANSURANUS) a realizzare simulazioni numeriche che permettano di analizzare il comportamento del combustibile sia in condizioni di normal operation, sia in condizioni di DBA - Design Basic Accident - per reattori veloci di IV generazione (es. CP-ESFR, ALFRED e ELSFR). Nelle simulazioni sarà preso a riferimento la pressurizzazione interna della fuel-pin e la relativa espansione del combustibile. Si procederà inoltre al confronto tra combustibili MOX tradizionali e avanzati.

Si realizzeranno analisi numeriche di scenari operativi ed incidentali di sistemi innovativi, con l'obiettivo di identificare e supportare future attività di ricerca e sviluppo, sperimentazione, qualifica componenti, che nel medio-lungo termine possano poi supportare il relativo processo di licensing di tali sistemi.

A tale scopo si sono individuate le seguenti linee di azione.

- qualifica di codici di calcolo (termoidraulica e neutronica) dedicati alle analisi di sistema avanzati quando applicati nella simulazione di impianti a metallo liquido. Tale qualifica sarà supportata dall'utilizzo di dati sperimentali di impianto resi disponibili in ambito internazionale;
- implementazione di un approccio per la determinazione dei parametri di sicurezza (fattori di picco, reattività del nocciolo, temperatura di camicia, temperatura del combustibile, etc.) del core e dell'andamento del burnup di un reattore veloce refrigerato a metallo liquido;
- perdita di refrigerazione (flow blockage). Proseguiranno gli studi su un dominio di calcolo semplificato per codici di fluidodinamica computazionale, che analizzi la mutua interazione fra diversi elementi di combustibile a seguito della parziale o completa perdita di portata di refrigerazione attraverso uno di essi. A seguito del transitorio postulato dovrà essere analizzato il comportamento termo-fluidodinamico dell'elemento di combustibile interessato dalla parziale o completa perdita della portata di refrigerazione, valutando la mutua interazione con gli elementi di combustibile adiacenti;
- parziale congelamento del sistema primario. A completamento della precedente annualità, l'attività si propone di sviluppare e validare un dominio di calcolo semplificato per codici di fluidodinamica computazionale che permetta di investigare il comportamento termoidraulico del sistema primario (GV – pompa primaria, nocciolo) di un reattore LFR a seguito di un repentino ed esteso congelamento del metallo liquido fluente attraverso il GV. A seguito del transitorio postulato si dovranno analizzare gli effetti sulla refrigerazione del nocciolo, la capacità del sistema di riportarsi nella sua normale condizione di funzionamento.

Infine si provvederà nell'ambito delle attività del seguente obiettivo, ad avviare lo sviluppo di un sistema di simulazione per l'analisi di sicurezza e controllo di reattori critici e sottocritici a metallo liquido pesante.

#### Risultati/Deliverable:

- LP2.a.3\_a Modelli di rilascio dei gas di fissione per combustibili MOX ad elevato burnup
- LP2.a.3\_b Validazione e analisi dei gas di fissione in combustibili MOX ad elevato burnup
- LP2.a.3\_c Analisi del comportamento del combustibile MOX ad elevato burnup in condizioni di normal operation e DBA
- LP2.a.3\_d Qualifica di codici di calcolo dedicati alle analisi di sistema avanzati quando applicati nella simulazione di impianti a metallo liquido
- LP2.a.3\_e Determinazione dei parametri di sicurezza del core e dell'andamento del burnup di un reattore veloce refrigerato a metallo liquido
- LP2.a.3\_f Analisi di uno scenario di flow-blockage
- LP2.a.3\_g Analisi di uno scenario di parziale congelamento del sistema primario
- LP2.a.3\_h Sviluppo di un sistema di simulazione per l'analisi di sicurezza e controllo di reattori critici e sottocritici a metallo liquido pesante

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **a.4 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione**

A seguito di eventi incidentali in un reattore LFR, prodotti di fissione gassosi possono entrare in contatto con il refrigerante (piombo fuso). E' necessario pertanto determinare, attraverso un circuito sperimentale messo a punto nell'ambito del PAR 2011, se e in quale misura tali prodotti (in particolare cesio, iodio e stronzio) interagiscano con il refrigerante.

Gli sforzi di ricerca saranno quindi indirizzati sugli aspetti ingegneristici della cattura e rimozione degli elementi volatili non trattenuti dal piombo. In particolare occorre dimensionare gli impianti in funzione dei diversi parametri in gioco, quali la temperatura di rilascio dei gas, la velocità di flusso, il posizionamento dei filtri, il piping, etc.

Prove in scala laboratorio (impianto OGATA, ENEA) possono consentire l'accurata valutazione di tali parametri, permettendo in tal modo una idonea progettazione degli impianti di abbattimento. Sono inoltre necessari ulteriori studi sull'adsorbimento di gas e miscele di gas, come pure indagini sperimentali e simulazioni dei processi di adsorbimento su matrici specifiche.

L'attività prevede inoltre, attraverso un circuito sperimentale realizzato ad hoc presso il CIRTEN e progettato nel PAR 2011, di studiare le interazioni dei gas di fissione con il piombo fuso durante la migrazione nel refrigerante.

Relativamente agli studi di pirometallurgia per il riprocessamento del combustibile irraggiato per la separazione attinidi/lantanidi sarà reso operativo l'impianto pilota Pyrel III, realizzato nel PAR 2011, mediante prove di collaudo e verifica del processo.

Saranno quindi avviati studi circa le tecniche di riprocessamento di combustibile nucleare allo scarico dal reattore attualmente disponibili sia su scala industriale che a livello sperimentale e di laboratorio. Tale analisi dovrà valutare l'adeguatezza di tali tecniche - da un punto di vista chimico - a fronte della possibilità di separare omogeneamente tutti gli attinidi presenti nel combustibile dai prodotti di fissione generati durante l'irraggiamento in pila, arrivando così a stabilire la fattibilità di un ciclo di combustibile che possa integrare e supportare un reattore di nuova generazione capace di essere operato "adiabaticamente", garantendo in questo modo la chiusura del ciclo del combustibile sia in termini di massimizzazione delle riserve di combustibile, che di minimizzazione delle scorie per bruciamento delle componenti a più lunga emivita.

Proseguiranno infine gli studi sulla interazione fuel-coolant in sistemi multicomponente, anche con approccio ad ab-initio, tipici degli scenari incidentali che portano alla degradazione del nocciolo e fessurazione della guaina.

##### Risultati/Deliverable:

- LP2.a.4\_a Studio sulle tecniche di abbattimento degli off-gas in un reattore LFR
- LP2.a.4\_b Studio delle interazioni tra gas di fissione e refrigerante in un reattore LFR
- LP2.a.4\_c Rapporto sul processo di pirometallurgia mediante l'impianto pilota Pyrel III
- LP2.a.4\_d Tecniche di riprocessamento del combustibile irraggiato per sistemi "adiabatici"
- LP2.a.4\_e Report sulla interazione fuel-coolant in sistemi LFR.

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

#### **b. Materiali e fabbricazioni**

##### **b.1 Qualifica coating e materiali strutturali per sistemi LFR**

In continuità con il precedente Piano Annuale di Realizzazione, in cui si è provveduto alla selezione ( $Al_2O_3$  - formers) e alla deposizione (arc-PVD) di rivestimenti per la protezione dei materiali strutturali operanti in piombo, l'attività prevede la deposizione di sistemi multilayer, costituiti da uno deposito intermedio (layer intermedio) di FeAl o FeCrAl e da un rivestimento esterno (top coating) di  $Al_2O_3$ . Come in generale accade

nei sistemi multilayer, dalla presenza sinergica dei due strati ci si aspetta un potenziamento delle capacità di protezione:

- la presenza del top layer di  $Al_2O_3$  svincola il sistema dalla necessità di formare il film di ossido protettivo nelle fasi iniziali e/o transitorie;
- lo strato intermedio essendo un  $Al_2O_3$  former garantisce protezione in caso di rottura del top layer, e avendo proprietà meccaniche intermedie fra il substrato ed il top layer, crea fra questi un'interfaccia che riduce la fragilità del rivestimento come conseguenza di uno stress termico.

Oggetto dello sviluppo del sistema multilayer saranno sia gli spessori relativi dei due strati, particolarmente in riferimento alle proprietà meccaniche conseguite, che il ricorso a diversi processi di deposizione per la realizzazione dei due film. In particolare si farà ricorso sia a processi di deposizione da fase vapore (PVD) che a processi di termo-spruzzatura (TS). Nel primo caso verranno considerate le due varianti di processo da fase vapore arc PVD e RF-sputtering. Nel secondo caso saranno considerate le due varianti di processo di termo-spruzzatura, ovvero high velocity oxy fuel (HVOF) e plasma spray (PS).

Al fine di identificare i sistemi più promettenti per la deposizione e gli spessori ottimali, i coating preparati saranno analizzati dal punto di vista microstrutturale, morfologico e meccanico. In particolare si provvederà a realizzare:

- caratterizzazione microstrutturale mediante microscopia elettronica dei rivestimenti realizzati, sia sulla superficie che in sezione. L'indagine microstrutturale sarà volta a valutare l'omogeneità, la compattezza, l'uniformità, l'adesione del film intermedio al substrato e del top layer al coating sottostante, lo spessore del rivestimento totale e di ciascuno strato componente, e l'eventuale presenza di difettosità e/o cricche;
- analisi delle fasi presenti nei rivestimenti mediante diffrazione a raggi x (XRD);
- analisi chimica dei diversi strati componenti i rivestimenti, allo scopo di verificare la presenza di eventuali diffusioni tra le interfacce, mediante spettroscopia elettronica (EDX);
- prove meccaniche mediante misure di indentazione (i.e. Vickers, Knoop) e prove di flessione a tre o quattro punti finalizzate alla valutazione delle proprietà meccaniche e dell'adesione del film.
- Si prevede inoltre, nello stesso contesto della protezione dalla corrosione da piombo di materiali strutturali, lo sviluppo e implementazione di una tecnica di deposizione, mediante ablazione laser pulsata, di rivestimenti protettivi di allumina. Attualmente la tecnica sviluppata permette di ricoprire piccole superfici piane. Le prime caratterizzazioni di questi rivestimenti, sia per quanto riguarda la corrosione sia per quanto riguarda le proprietà meccaniche, sono in fase di completamento, mostrando dei risultati preliminari molto promettenti. Obiettivo della ricerca per il prossimo anno sarà la realizzazione di rivestimenti di campioni cilindrici, al fine di realizzare prove maggiormente significative, sia rispetto al comportamento meccanico, sia rispetto al comportamento a corrosione (prove in piombo fluente).
- Si provvederà inoltre alla qualifica preliminare di tali coating mediante prove di irraggiamento con ioni pesanti presso la facility sperimentale JANNUS presso il CEA di Saclay.

A completamento di quanto realizzato nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, si prevede inoltre di completare la installazione e collaudo della macchina per Detonation Spray precedentemente acquistata, in apposito locale presso il CR Brasimone, provvedere alla formazione del personale addetto all'utilizzo, e quindi alla realizzazione di campioni ricoperti di diversa tipologia ( $FeAl$ ,  $Fe_3Al$ ,  $FeCrAl$ , etc.), che potranno quindi essere successivamente testati negli impianti e laboratori di prove materiali dell'ENEA.

- Infine, il presente obiettivo si completa con la caratterizzazione di materiali strutturali (15-15 Ti, T91) vergini e ricoperti mediante tecnica PVD e CVD, già disponibile dal precedente PAR, mediante prove di trazione, fretting, piegatura, creep-rottura, presso i laboratori prova materiale dell'ENEA.

### Risultati/Deliverable:

- LP2.b.1\_a Sviluppo di sistemi multilayer per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo
- LP2.b.1\_b Sviluppo di layer per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo mediante tecniche di ablazione laser
- LP2.b.1\_c Report sulla caratterizzazione di coating realizzati mediante ablazione laser mediante prove di irraggiamento con ioni pesanti
- LP2.B1\_d Rapporto sulla installazione e collaudo di una macchina per Detonation Spray
- LP2. B1\_e Report sulla caratterizzazione di materiali strutturali ricoperti per applicazioni nucleari

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **b.2 Studi ed esperienze sulla chimica del refrigerante e sulla fabbricazione di componenti prototipici**

In continuità con quanto realizzato nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, si procederà con gli studi di fabbricazione relativi a componenti prototipici del sistema primario di un sistema LFR progettati da ENEA. La progettazione meccanica dei componenti del sistema primario di un reattore LFR presenta infatti problematiche progettuali, legate alla spinta di galleggiamento, agli effetti di fretting, ai rischi di ostruzione per errato controllo della chimica del refrigerante. Oggetto del presente obiettivo saranno quindi studi di fattibilità e prove di fabbricazione relativamente alle griglie spaziatrici dell'elemento di combustibile del sistema LFR, e dei sistemi di filtrazione meccanica e controllo dell'ossigeno per la corretta gestione della chimica del refrigerante. Le prove di fabbricazione, secondo le specifiche tecniche fornite da ENEA, saranno condotte impiegando elettroerosione, tecniche di saldatura individuate, banchi di assemblaggio da implementare in funzione della specificità dell'impiego, nonché le macchine d'officina convenzionali.

Coerentemente agli obiettivi di sviluppo e validazione di un sistema di controllo e monitoraggio della chimica del refrigerante, saranno intraprese da ENEA azioni tese alla definizione e implementazione di un laboratorio per la chimica del refrigerante (piombo), che consisterà di banchi di lavoro con cappe di aspirazione e strumentazione e componentistica per studi dei fenomeni di corrosione e controllo dell'ossigeno disciolto in sistemi stagnati e/o semi stagnanti di ridotte dimensioni.

Infine saranno progettate e realizzate strutture per il decapaggio e la pulizia di componenti di grosse dimensioni (fino a 1 t) che hanno operato in piombo, e che richiedono di essere modificati e/o riparati per del loro reintegro negli impianti sperimentali.

### Risultati/Deliverable:

- LP2.b.2\_a Rapporto tecnico di fine fabbricazione di elementi prototipici del sistema primario dell' LFR
- LP2. b.2\_b Report sulla implementazione del laboratorio della chimica del piombo
- LP2. b.2\_c Report sulla implementazione di strutture per la pulizia di grossi componenti operanti in piombo

Principali collaborazioni: FN, CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

## **c. Termoidraulica del refrigerante**

### **c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi**

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si rende necessario completare le attività di ricerca e sviluppo per la caratterizzazione preliminare di generatori di vapore (GV) per applicazioni in sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR). L'attività prevede il completamento della progettazione di dettaglio e la conseguente realizzazione della facility sperimentale HERO - Hheavy liquid mEtal – pRessurized water cOoled tube -, concettualizzata nella precedente annualità.

Inoltre, in continuità con le azioni sviluppate nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, l'attività prevede il completamento della caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW installato

sull'impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova ICE (Integral Circulation Experiment). La caratterizzazione sarà completata realizzando opportuni aggiornamenti della facility CIRCE (strumentazione aggiuntiva e componenti per il controllo della chimica) e realizzando successivamente opportuni test sperimentali per la qualifica del componente.

Si procederà inoltre con l'installazione e collaudo del prototipo di generatore di vapore a spirale piana realizzato nel precedente piano, qualificandone le prestazioni in termini di scambio termico e robustezza termo-meccanica con prove severe di sollecitazione termica in aria.

Infine saranno implementati studi sull'accoppiamento dei codici di calcolo secondo l'approccio "two-way". al fine di disporre di sistemi di calcolo efficaci e affidabili che possano supportare la progettazione e la verifica di sicurezza dei sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo.

#### Risultati/Deliverable:

- LP2.c.1\_a Progettazione e realizzazione della facility sperimentale HERO
- LP2. c.1\_b Rapporto di prova e analisi dei risultati sperimentali ottenuti per la qualifica in regime transitorio del sistema DHR prototipico
- LP2. c.1\_c Rapporto di prova e analisi dei risultati sperimentali ottenuti per la qualifica del prototipo di GV a spirale piana per sistemi LFR
- LP2. c.1\_d Report sull'accoppiamento di codici CFD e codici di sistema
- LP2. c.1\_e Report sull'accoppiamento di codici CFD e codici di sistema in sistemi a piscina
- LP2. c.1\_f Report sullo sviluppo e validazione della piattaforma di calcolo CATHARE/FEM-LCORE

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **c.2 Studi sperimentali per lo scambio termico nei sistemi LFR e SMR**

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo tese al supporto dei sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo, e a completamento di quanto già realizzato nel precedente piano annuale, in cui si è provveduto alla progettazione, realizzazione e installazione del sistema primario dell'impianto a metallo liquido pesante HELENA, si rende necessario provvedere alla implementazione del sistema di regolazione e controllo potenza e alla progettazione e realizzazione del circuito secondario (100 bar) per la rimozione della potenza. L'impianto, che sarà ampiamente utilizzato per la caratterizzazione dei materiali strutturali per metalli liquidi pesanti in ambiente a basso tenore di ossigeno, e per la caratterizzazione dello scambio termico in fuel pin bundle prototipici in regime di circolazione forzata, si inserisce nella attività di ricerca e sviluppo che ENEA realizza in ambito europeo.

Relativamente agli studi di scambio termico in fuel pin bundle prototipici in regime di circolazione naturale o mista, si rende necessario completare l'upgrade dell'impianto NACIE, inserito nel progetto europeo SEARCH (FP7-EC). L'attività prevede la progettazione e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione (16 bar) e la modifica del circuito di fill&drain che premetta di ospitare un fuel pin bundle prototipico evitandone il plugging nelle procedure di avvio e drenaggio di impianto.

#### Risultati/Deliverable:

- LP2.c.2\_a Specifica tecnica di fornitura e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante HELENA
- LP2.c.2\_b Specifica tecnica di fornitura, implementazione e collaudo del sistema di regolazione, controllo potenza e acquisizione dati dell'impianto HELENA
- LP2.c.2\_c Specifica tecnica di fornitura e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante NACIE
- LP2.c.2\_d Specifica tecnica di fornitura, implementazione e collaudo del sistema di fill&drain dell'impianto NACIE

Principali collaborazioni: CIRTEN

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013



### ***Comunicazione e diffusione dei risultati***

Per entrambe le linee progettuali del tema B.3.1 - "Sicurezza, programmi internazionali e reattori innovativi a fissione" è prevista una specifica attività di comunicazione e diffusione dei principali risultati mediante:

- pubblicazione di tutti i deliverable e della sintesi dei principali risultati ottenuti sul sito pubblico dell'ENEA;
- pubblicazioni su riviste scientifiche di settore, nazionali ed internazionali;
- workshop dedicati aperti ai principali stakeholder italiani, istituzionali, industriali ed accademici, del nucleare da fissione.

I costi di questa attività sono inclusi nei preventivi delle diverse linee progettuali.

## Progetto B.3.1 "Sicurezza, programmi internazionali e reattori innovativi a fissione"

### Obiettivi e relativi preventivi economici

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
LP1 a	Acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi e analisi di sicurezza e sostenibilità	2309	127	0	10	0	25	40	202
LP1 b	Metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali	2055	113	0	15	0	20	40	188
LP1 c	Sperimentazione e calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza	455	25	0	0	200	5	80	310
<b>LP1 "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare"</b>		<b>4819</b>	<b>265</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>200</b>	<b>50</b>	<b>160</b>	<b>700</b>
LP2 a	Progettazione di sistema e analisi di sicurezza	7891	434	75	40	0	26	200	775
LP2 b	Materiali e fabbricazioni	4582	252	30	70	60	8	220	640
LP2 c	Termoidraulica del refrigerante	5255	289	320	150	0	6	120	885
<b>LP2 "Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione"</b>		<b>17728</b>	<b>975</b>	<b>425</b>	<b>260</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>540</b>	<b>2300</b>
<b>TOTALE</b>		<b>22547</b>	<b>1240</b>	<b>425</b>	<b>285</b>	<b>260</b>	<b>90</b>	<b>700</b>	<b>3000</b>

\* in base al documento "Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili", deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie (per 600 k€) e con FN spa (per 100 k€)

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata da tutti i paesi più industrializzati una opzione molto concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. A conferma di ciò, Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi in un progetto di grande prestigio, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), che rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO).

ITER dovrà produrre 500 MW di potenza e dimostrare la possibilità di mantenere la reazione per un tempo sufficientemente lungo. L'impianto consentirà di verificare le tecnologie rilevanti per il reattore e fornirà gli elementi utili per la progettazione di DEMO. Per sfruttare al meglio la sperimentazione di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno deciso di avviare in parallelo un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare ad ITER.

Il Broader Approach è un accordo di cooperazione internazionale tra Unione Europea (Euratom) e Giappone avente lo scopo di integrare il progetto ITER ed accelerare i tempi per la realizzazione dell'energia da fusione, attraverso attività di R&S relative a tecnologie avanzate per i futuri reattori dimostrativi. L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, consiste in una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono realizzazioni prototipiche di alto contenuto tecnologico.

Il programma Broader Approach rappresenta una opportunità molto importante per sviluppare ricerche di base sulla fisica e la tecnologia della fusione nucleare. Infatti, il BA include una serie di attività finalizzate: alla realizzazione di componenti ad alto contenuto tecnologico; allo sviluppo di conoscenze di fisica di interesse per il reattore a fusione DEMO; alla realizzazione di prototipi per la validazione del progetto della sorgente intensa di neutroni IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) e alla realizzazione di un centro di studi denominato IFERC (International Fusion Energy Research Center) indirizzato a ricerche sui materiali e al supercalcolo.

In particolare le attività del BA includono:

- la costruzione di una macchina Tokamak denominata JT-60SA: macchina superconduttrice delle dimensioni del JET destinata a studiare scenari operativi rilevanti per DEMO;
- la realizzazione di una facility in cui saranno provati i componenti di IFMIF, complessa struttura di ricerca finalizzata allo studio del danneggiamento dei materiali provocato dal flusso di neutroni di alta energia, quali quelli generati nella reazione di fusione. Si tratta del prototipo del primo stadio dell'acceleratore di ioni di deuterio che dopo essere accelerati fino ad energie di 40 MeV vanno a collidere un bersaglio di litio producendo un flusso di neutroni molto intenso capace di produrre un danneggiamento di 80 dp/anno;
- la realizzazione di un prototipo del bersaglio per la produzione di neutroni (target) di IFMIF su cui far scorrere a forte velocità il litio liquido e i dispositivi per la sua manutenzione remota;
- la creazione del International Fusion Energy Research Center (IFERC) che include attività per DEMO tra le quali lo sviluppo di materiali avanzati come il SiC/SiC e un centro di supercalcolo.

L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach, ed in particolare ad ENEA sono state affidate le seguenti attività:

## Costruzione magneti Tokamak JT-60SA

Realizzazione, in collaborazione col CEA francese, del magnete superconduttore di JT-60SA, incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche. JT-60SA si propone di contribuire al rapido sviluppo dell'energia da fusione attraverso lo studio degli aspetti più importanti della fisica di ITER e DEMO.

JT-60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m, in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, in configurazioni elongate a D, con singolo o doppio nullo. Una potenza di riscaldamento di 41 MW con iniettori di neutri ed antenne a microonde alla ciclotronica elettronica permettono di operare con alte densità di plasma e significativi valori di flusso di potenza sul divertore. Il Tokamak superconduttore JT-60SA sarà installato in Giappone, a Naka, nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U. L'isolamento termico di JT-60SA sarà assicurato, sotto vuoto, da un criostato metallico. Delle 18 bobine toroidali che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzate dall'ENEA e 9 dal CEA francese. La macchina JT-60SA sarà il più grande Tokamak superconduttore ad essere costruito prima della macchina ITER. Il magnete toroidale di JT-60SA è superconduttore, raffreddato ad elio supercritico alla temperatura di 4,4 gradi Kelvin e termicamente isolato da un criostato. Il conduttore rettangolare (22x26 mm<sup>2</sup>) in NbTi contenuto in una camicia in AISI di spessore 2 mm è stato ottimizzato per ridurre i rischi di transizione rapida (quench) e migliorare la stabilità intrinseca. Ciascun conduttore è attraversato da una corrente di 25,7 kA e refrigerato da una portata in massa di elio di 4 g/s. L'analisi di riscaldamento nucleare e flusso neutronico è stata condotta dall'ENEA utilizzando un codice Monte Carlo MCNP-5 con libreria FENDL-2. È stato usato un modello in 3D di un settore di 20° della macchina; le proprietà dei materiali componenti sono state opportunamente omogeneizzate. La camera da vuoto è riempita, nella doppia parete, di acqua borata per migliorare le prestazioni schermanti ed è stata modellata considerando i tre port di cui uno equatoriale e due alla estremità superiore ed inferiore della camera da vuoto stessa. L'avvolgimento della bobina è segmentato in 36 celle, ciascuno rappresentante due spire in direzione toroidale dei sei doppi pancake. Anche la cassa è stata segmentata in modo accurato per il calcolo del profilo del loro riscaldamento nucleare. Il flusso neutronico di riferimento è  $1,5 \times 10^{17}$  n/s. L'analisi termoidraulica della bobina, considerando anche il calore trasferito dalla cassa, assicura condizioni operative fortemente stabili con un margine di temperatura di 1,2 K.

L'analisi strutturale è stata eseguita con il codice di calcolo agli elementi finiti ANSYS su un modello di bobina toroidale in 3D sollecitata da carichi elettromagnetici, in piano e fuori piano, prodotti durante lo scenario di riferimento. Nell'isolamento di spira si raggiunge un valore di taglio di 18 MPa; la sollecitazione di taglio sull'isolamento verso massa mostra un picco di 10 MPa. Entrambi i valori di taglio sono accettabili. La distribuzione delle sollecitazioni nella parte strutturale della bobina raggiunge un picco di circa 400 MPa nella gamba interna; valore accettabile nel caso di AISI 316. La deformazione della bobina assume una forma ad S e raggiunge un massimo di circa 20 mm nella parte esterna, vicino ai port della camera da vuoto. Il metodo di inserimento dell'avvolgimento della bobina nella cassa è stato studiato con cura per ottenere un manufatto di elevata precisione meccanica richiesta dagli accoppiamenti per realizzare il complesso del magnete toroidale. Lo sviluppo del modello CAD della bobina e della cassa di contenimento in acciaio austenitico ha consentito lo studio delle interfacce e la definizione dei disegni di massima. Sperimentazioni sono state condotte su campioni di superconduttore per ottimizzare le loro prestazioni elettriche e fluidiche.

Il sistema magnetico di JT-60SA è costituito da 18 bobine toroidali superconduttrici di forma a D avvolte con un cavo in NbTi, raffreddato da un flusso forzato di elio supercritico. Ciascun avvolgimento è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare la continuità elettrica; giunti esterni garantiscono la connessione elettrica con le bobine contigue mentre dei collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio. Ogni pancake è formato da sei spire, con un isolamento di spira dello spessore di 1 mm. Ciascun doppio pancake è avvolto da isolante con uno spessore di 1 mm; mentre l'intero avvolgimento ha un isolamento verso massa di 3 mm. L'isolamento elettrico è realizzato con tele di vetro e resina epossidica impregnata sotto vuoto. L'intero pacco di avvolgimento della bobina ha dimensioni nominali di 345 mm (toroidalmente) e 150 mm (radialmente). La realizzazione delle 9 bobine richiede lo sviluppo di impianti ed attrezzature prototipali che rivestono carattere innovativo e di ricerca, sia per lo sviluppo delle soluzioni costruttive, che per la definizione delle procedure realizzative degli elementi componenti la bobina toroidale.

L'Italia deve fornire:

- nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete e che hanno dimensioni e caratteristiche tali da richiedere una estrapolazione significativa dei processi realizzativi, esse rappresentano un utile banco di prova per la costruzione delle bobine di ITER;
- le casse di contenimento per tutte le 18 bobine sono componenti in acciaio austenitico che richiedono precisioni molto accurate per garantire il corretto posizionamento delle bobine che devono ospitare;
- le alimentazioni elettriche di tutto il sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 8 alimentatori (SCMPS, Super Conducting Magnet Power Supplies) ad alta tensione e corrente con relativi interruttori, crow-bar e quattro trasformatori. Quattro sistemi di interruzione della corrente continua (SNU, Switching Network Unit) con inserzione di un sistema variabile di resistenza. Tutto ciò richiede una progettazione specifica e le dimensioni e caratteristiche e i contenuti tecnici sono tali per cui vi è un forte interesse da parte della nostra industria. Il ruolo dell'ENEA è di fondamentale importanza perché la progettazione di tutti i componenti in questione richiede un know-how specifico da sviluppare in continuità con quanto fatto finora in questi settori;
- progettazione, costruzione, collaudo e spedizione a Naka (Centro Ricerche JAEA) del Magnete Toroidale superconduttore della Macchina Tokamak JT60SA completo di casse di contenimento ed alimentazione elettrica.

I processi realizzativi saranno qualificati con lo sviluppo di prototipi a piena scala e mock-up. L'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico ed è caratterizzato da precisioni molto accurate per garantire il corretto accoppiamento con la bobina stessa.

La cassa delle bobine toroidali è una struttura saldata di piastre con spessore nell'intervallo 15-100 mm. Ogni cassa sarà preparata per il suo assemblaggio finale composta da un numero limitato di sotto insiemi per minimizzare le saldature necessarie alla chiusura della cassa. I supporti meccanici delle bobine poloidali esterne e del trasformatore centrale saranno saldati. Il sistema magnetico di JT-60SA è supportato attraverso le casse delle bobine toroidali.

#### Attività di ricerca e sviluppo per IFMIF-EVEDA e IFERC

Queste attività richiedono lo sviluppo competenze e l'elaborazione di applicazioni innovative nel campo dei metalli liquidi, in particolare per gli aspetti legati alla purificazione e alla corrosione/erosione del litio liquido, della manutenzione remota, dello sviluppo e caratterizzazione di materiali compositi ceramici in matrice e fibra di silicio (SiC/SiC). Questi settori sono di grande interesse per le attività programmatiche dell'ENEA che in questi settori è impegnata da tempo. In particolare le attività relative ai metalli liquidi e alla manutenzione remota potranno usufruire degli impianti presenti presso il Centro ENEA del Brasimone e della esperienza nella progettazione di circuiti a metallo liquido e della relativa manutenzione remota.

L'attività, infatti, consiste nella progettazione del target di IFMIF, un componente su cui fluisce litio liquido ad alta velocità, e delle attività di sviluppo e caratterizzazione a supporto riguardanti la corrosione/erosione e la purificazione del litio e la dimostrazione delle operazioni di manutenzione remota.

Verranno effettuate sperimentazioni dedicate alla purificazione ed alla verifica della compatibilità chimica del litio con i materiali strutturali al fine di prevedere la durata dei componenti, il trasporto di massa relativo agli elementi principali (Fe, Cr e Ni), la loro deposizione ed il loro contributo di radio attivazione del sistema. Infine verrà effettuata, l'analisi di sicurezza completa del target e del circuito a litio di IFMIF. Il target è un componente su cui fluisce litio liquido ad alta velocità, e pertanto si rendono necessarie le attività di sviluppo e caratterizzazione a supporto riguardanti la corrosione/erosione e la purificazione del litio e la dimostrazione delle operazioni di manutenzione remota. Poiché il target di IFMIF è soggetto ad un elevato danneggiamento neutronico, dell'ordine di 50 dpa/anno, una componente essenziale della progettazione è l'analisi delle sollecitazioni termomeccaniche conseguenti all'esposizione neutronica. Tale analisi deve essere eseguita in modo accurato al fine di predire la vita media delle parti più sollecitate e pianificarne il programma di sostituzione parziale o totale. Tale analisi richiede un significativo impegno in termini di calcolo numerico sia con codici Monte Carlo di neutronica e sia con codici F.E per la termica e la

meccanica. In molti aspetti del calcolo è necessario ricorrere ad adattamenti ad hoc in quanto i codici commerciali non sono ancora adeguatamente configurati.

Nel campo dei compositi ceramici, grazie anche alla collaborazione in atto con la società partecipata FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, si hanno dotazioni impiantistiche di grande rilievo come il sistema di CVI (Chemical Vacuum Infiltration) per la realizzazione di componenti di carburo di silicio composito (SiC/SiC). Ai compositi ceramici si guarda con grande interesse per l'utilizzo sia come materiale strutturale sia come materiale funzionale per barriere termiche ed elettriche. Queste attività hanno una forte continuità con quanto in atto per lo sviluppo del reattore dimostrativo a fusione ma anche per i reattori a fissione di IV generazione.

#### Altre attività internazionali di accompagnamento ad Iter: FAST il nuovo esperimento satellite europeo

Obiettivo è la realizzazione di un esperimento di fusione denominato FAST di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 1983 a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER (la macchina tokamak che sarà costruita a Cadarache, Francia, frutto di una collaborazione internazionale tra Unione Europea, Cina, Giappone, Federazione Russa, India, Corea, USA). FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER. Lo scopo è quello di preparare gli scenari operativi di ITER simulando l'effetto delle particelle alfa mediante ioni accelerati dai sistemi di riscaldamento ausiliario. In questo modo sarà possibile studiare un plasma che brucia senza ricorrere all'uso del trizio. L'uso di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti ad alto flusso termico, sviluppate in ENEA, e le scariche di lunga durata consentono di provare componenti in condizioni rilevanti per il funzionamento di ITER e DEMO.

Il progetto riguarda la costruzione della macchina tokamak denominata FAST da installare possibilmente in un sito ENEA e include la realizzazione di impianti per le alimentazioni elettriche, il riscaldamento del plasma con radiofrequenza (40 MW) e predisposta per l'utilizzo di iniezione di neutri, il raffreddamento con fluido criogenico (elio a 30 K) ed acqua. Sono incluse, inoltre, le diagnostiche per le misure dei parametri del plasma ed il sistema di controllo. A seconda del sito scelto, sarà necessario costruire nuovi edifici o adeguare quelli esistenti.

La simulazione di un plasma che brucia nelle condizioni di interesse reattoristico è un aspetto altamente innovativo del progetto. Ad oggi i parametri che caratterizzano questi regimi sono stati studiati singolarmente. Risulterebbe perciò, data l'alta non linearità dei fenomeni associati, un passo molto importante verso la piena comprensione del comportamento del plasma e contribuirebbe a rendere molto più proficua la sperimentazione di ITER. Inoltre, FAST consentirà di sviluppare nuove tecnologie avanzate per il reattore a fusione, quali quelle relative allo smaltimento degli altissimi flussi termici originati dal plasma.

#### ***Situazione attuale del prodotto dell'attività***

Il programma fusione è uno dei campi di eccellenza della ricerca in Italia. Il programma è coordinato a livello europeo dall'Euratom e vede la partecipazione di tutti i paesi UE più la Svizzera. Le attività italiane, sono condotte dall'ENEA, che ha la funzione di coordinatore, dal CNR e da molte Università italiane. ENEA e CNR hanno inoltre costituito con altri partner il Consorzio RFX.

La ricerca sulla fusione, essendo ormai orientata verso la realizzazione del reattore, richiede di sviluppare oltre alle conoscenze di fisica anche le tecnologie relative ai materiali, ai processi di fabbricazione dei componenti ed alla manutenzione remotizzata, che nel caso della fusione presentano caratteristiche che vanno oltre la normale pratica realizzativa. In questo contesto, particolare rilevanza presentano le tecnologie dei magneti superconduttori e dei componenti di grosse dimensioni e alte precisioni, lo sviluppo dei materiali e nello specifico dei compositi ceramici. Ai compositi ceramici si guarda infatti con grande interesse per l'utilizzo sia come materiale strutturale sia come materiale funzionale per barriere termiche ed elettriche.

Parallelamente all'impiego di ITER, la comunità scientifica, sarà impegnata a individuare e provare i materiali strutturali più adatti a rispondere alle differenti richieste di un prototipo dimostrativo di reattore

a fusione. La fusione termonucleare pone una doppia sfida agli specialisti di materiali: alte temperature (fino ad 800 °C) ed alti flussi di neutroni da 14 MeV che in un anno inducono danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. La conduzione di ricerche appropriate in questa area di sviluppo, che appare fortemente strategica per tutto il settore industriale, richiede la realizzazione e l'impiego della sorgente di neutroni IFMIF. Per tale motivo nell'ambito delle attività tecnologiche di Broader Approach vengono previste azioni per progettare e realizzare la sorgente di neutroni da 14 MeV completa di due acceleratori di deutoni accoppiati in parallelo, circuito per purificazione e pompaggio litio a 20 m/s e tre dispositivi per prove meccaniche sui materiali candidati all'impiego fusionistico. Lo sviluppo delle tecnologie dei metalli liquidi, inoltre, è un punto di forza delle ricerche in ENEA che applica queste tecnologie non solo nel campo della fusione ma anche per i reattori a fissione di IV Generazione.

L'ENEA è tra i leader nel settore e grazie alla sua dotazione strumentale ed impiantistica può accrescere il know-how in un campo cruciale per le tecnologie dei futuri reattori nucleari. Il proposto esperimento FAST è stato ideato in modo tale da essere integrato al progetto di JT60SA e con obiettivi complementari. Di conseguenza, l'integrazione degli esperimenti sulle due macchine potrà garantire lo studio completo dei problemi di fisica ancora aperti in vista di DEMO. Inoltre, FAST, essendo una macchina compatta ed ad alte performances, potrà garantire informazioni notevoli riguardo il possibile sviluppo della Fusione Nucleare verso reattori Ibridi Fusione-Fissione, in grado di bruciare le scorie nucleari.

### ***Stato attuale delle tecnologie***

Il magnete toroidale di JT60SA è superconduttore, raffreddato da elio supercritico alla temperatura di 4,4 K e termicamente isolato da un criostato. Il conduttore in NbTi verrà ottimizzato per ridurre i rischi di transizione rapida e migliorare la stabilità intrinseca. L'analisi di riscaldamento nucleare e flusso neutronico verrà condotta dall'ENEA con codice Monte Carlo. Verrà usato un modello in 3D di un settore della macchina e le proprietà dei materiali componenti saranno opportunamente omogeneizzate. L'analisi termica del superconduttore, considerando anche il calore dovuto al flusso neutronico trasferito dalla cassa, assicurerà condizioni operative fortemente stabili con un margine di temperatura di 1,2 K. L'integrità meccanica del magnete verrà studiata con un settore di macchina in 3D sollecitata da carichi elettromagnetici provenienti dallo scenario di riferimento. Il metodo d'inserimento dell'avvolgimento bobina nella cassa verrà studiato con attenzione per ottenere un manufatto con la precisione meccanica richiesta dagli accoppiamenti per realizzare il complesso del magnete toroidale. Sperimentazioni sono state già condotte su piccoli campioni per ottimizzare le prestazioni elettriche e fluidiche dei componenti superconduttori. Lo sviluppo del modello CAD della bobina e della cassa di contenimento consentirà lo studio delle interfacce e la definizione dei disegni di massima.

Tra le varie tecnologie di punta inerenti al progetto FAST, vanno sicuramente citate, lo sviluppo di piastre di tungsteno solido, freddate attivamente e capaci di sostenere in continua un alto flusso di potenza (~20 MW/m<sup>2</sup>), ed, inoltre, espandere la sperimentazione, attualmente effettuata in modo limitato col Tokamak FTU, usando metalli liquidi (litio) per assorbire la potenza uscente dal plasma.

L'impianto IFMIF sarà una facility di ricerca di cospicuo rilievo, con una lunghezza di oltre 200 metri, progettata ad hoc. I suoi componenti principali saranno:

- 1) una sorgente di ioni (tipicamente ioni di deuterio);
- 2) due acceleratori lineari, di grande potenza (complessivamente 10 MW), che accelerano gli ioni di deuterio fino all'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sullo stesso bersaglio (target);
- 3) un target costituito da litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità, su cui gli ioni di deuterio accelerati impattano, sviluppando neutroni di elevata energia mediante opportune reazioni nucleari. ENEA, in ambito europeo, è responsabile dello sviluppo del target per la produzione di neutroni. Il progetto è basato su un efflusso libero di litio ad alta velocità (20 m/s) che, investito normalmente da un fascio di deutoni, rilascia per la reazione nucleare di stripping, una corrente di neutroni sufficientemente energetici per poter esercitare, sui materiali in prova, lo stesso danneggiamento neutronico che ha luogo in un reattore a fusione. La proposta progettuale di ENEA comprende anche la

intercambiabilità della parete posteriore del componente al fine di consentirne la sostituzione quando il danneggiamento del materiale con cui è realizzato raggiunge livelli inaccettabili.

Lo studio di compositi di SiC/SiC è una delle attività di ricerca e sviluppo di DEMO previste nell'ambito del progetto IFERC (International Fusion Energy Research Center). L'ENEA ha il compito di studiare le proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei compositi in SiC/SiC e di sviluppare un'analisi di modello in grado di simulare ed interpretare le prove meccaniche su campioni di SiC/SiC.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### **Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali**

Il progetto sulla fusione nucleare è stato avviato nel PAR 2010 e comprendeva inizialmente le attività inserite nel quadro dell'accordo di collaborazione "Broader Approach".

#### **BROADER APPROACH**

##### Macchina JT-60SA

- Progettazione delle bobine superconduttrici del magnete toroidale della macchina JT-60SA

Le attività di progettazione sono state completate e sono state eseguite tutte le azioni preparatorie all'emissione degli ordini di acquisto. In particolare sono stati realizzati i disegni costruttivi del doppio pancake della bobina, completo dei particolari di ingresso di elio di refrigerazione, giunti elettrici intermedi, giunti elettrici di terminazione e riempitivi necessari all'avvolgimento della bobina. Sono stati acquisiti i materiali per la bobina e progettate e acquisite le attrezzature per la sua realizzazione (linea d'avvolgimento, attrezzature di movimentazione, bancali di composizione, stampo di impregnazione della bobina, camere da vuoto per prove sul conduttore e sulla bobina completa).

- Progettazione delle strutture di contenimento delle bobine toroidali JT60SA

Sono state avviate le attività realizzative delle bobine di contenimento ed emessi gli ordini di acquisto dei materiali costruttivi. È stato completato lo sviluppo dei disegni costruttivi relativi ai componenti di assemblaggio della cassa di contenimento bobina e prodotto un programma di qualifica relativo alle procedure di messa a punto dei processi di saldatura ed è stato realizzato un mock-up per la validazione della tecnologia di saldatura.

- Progettazione degli Switching Network Unit

L'ENEA ha condotto studi e progettazione preliminare per la realizzazione di quattro sistemi di Switching Network Unit per l'ottenimento di commutazione di corrente sugli avvolgimenti delle bobine del trasformatore centrale della Macchina JT-60SA. Sono state avviate le azioni necessarie alla loro realizzazione.

- Progettazione degli alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA

L'ENEA ha condotto gli studi e la progettazione per la realizzazione di alimentatori AC/DC e relativi trasformatori, per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina JT60SA.

Si ricorda che ENEA deve fornire parte delle alimentazioni elettriche del sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di otto alimentatori ad alta tensione e corrente, più quattro trasformatori. Il sito di installazione è il centro di ricerca di Naka-Ibaraki (Tokyo) in Giappone.

Questi sistemi dovranno essere inseriti in sistemi e impianti esistenti e, in parte a essi collegati. Per questo si sono avuti slittamenti dei tempi dovuti agli smontaggi, revisioni delle zone di allocazione dovute alle facility necessarie e in ultimo alle verifiche strutturali post sisma. Le specifiche tecniche elaborate definiscono i parametri funzionali del sistema, la modalità di funzionamento e i limiti di esercizio.



## Attività per IFMIF (International Fusion Energy Research Center)

L'attività ha come obiettivo lo sviluppo progettuale del target rimovibile per IFMIF, del suo sistema di sostituzione e del dispositivo di purificazione continua da azoto del litio.

- Forniture e implementazioni comuni per progettazione, costruzione e operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF

Nelle precedenti annualità è stata completata la progettazione ingegneristica del target assembly con backplate rimovibile a baionetta, che costituisce il concetto europeo di target, alternativo a quello integrale sviluppato dal JAEA, per l'EVEDA Lithium Test Loop di Oarai in Giappone. In particolare ENEA ha completato sia il design della backplate in EUROFER che del supporto di interfaccia (in F82H) con la rimanente parte fissa del target assembly progettata dal JAEA e la verifica termomeccanica dettagliata con riferimento sia alle condizioni nominali sia a quelle di progetto. I risultati indicano che il componente è in grado di sopportare i carichi termici e meccanici previsti garantendo una buona performance complessiva anche per quanto concerne gli spostamenti relativi tra il frame e la backplate che risultano contenuti nei massimi valori ammissibili.

Presso il centro di Oarai è in fase di realizzazione un impianto a litio fluente avente l'obiettivo di validare sperimentalmente il progetto del circuito litio della macchina IFMIF. Tra i parametri fondamentali per il funzionamento in sicurezza di IFMIF vi è il controllo delle impurezze non metalliche disciolte in litio. Inoltre ogni fenomeno di cavitazione deve essere evitato. ENEA partecipa alla sperimentazione e ha il compito di fornire sia il sistema di misura delle impurezze che quello per il rilevamento del fenomeno di cavitazione, la cui realizzazione risulta completata.

- Forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni della corrosione/erosione per IFMIF

La progettazione dell'impianto IFMIF richiede un'approfondita conoscenza del comportamento dei materiali strutturali esposti al litio ad alta velocità. E' infatti noto che il litio, a causa delle impurità non metalliche in esso presenti, promuove la corrosione dei materiali e che l'effetto della velocità è causa del ben più deleterio fenomeno erosivo. Per IFMIF è richiesto che il fenomeno di erosione/corrosione da litio sia limitato a un valore non superiore a 1  $\mu\text{m}$ . Presso l'impianto LiFus3 del CR ENEA Brasimone sono state condotte indagini sperimentali per la determinazione di tale tasso di erosione e corrosione, è stato quindi progettato un nuovo impianto a litio (LiFus6) su cui proseguirà la sperimentazione.

- Forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione litio per IFMIF

L'ENEA ha completato la progettazione di un circuito di purificazione per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione del litio, dalle principali impurezze. Il circuito di purificazione progettato consiste di un sistema di tre trappole, in acciaio AISI 316L, riscaldato elettricamente alla temperatura di esercizio e collegato in parallelo all'impianto principale tramite due valvole di stacco (sezionamento). Il sistema comprende due trappole fredde ed una calda per ridurre le impurezze (C, O, H, N) presenti nel litio entro i limiti attesi per il funzionamento di IFMIF.

- Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF

Le operazioni di manutenzione remotizzata del target di IFMIF richiedono l'impiego di un braccio robotico avente un alto numero di gradi di libertà, per garantire la raggiungibilità delle varie posizioni in cui i tool devono operare, e una buona capacità di carico per permettere la rimozione del bersaglio.

Il laboratorio di manutenzione remotizzata del CR ENEA di Brasimone era già fornito di un braccio robotico, il quale è stato modificato e trasformato in un nuovo sistema integrato basato su flange ad attacco rapido che consentono di sostituire il terminale del braccio in funzione dei task previsti. L'adozione di questa soluzione presenta i seguenti vantaggi: riduzione dei costi, in quanto viene utilizzata parte del manipolatore esistente; facile estendibilità del sistema (possono essere inseriti nuovi end effectors); la connessione e la disconnessione degli end effectors viene eseguita automaticamente da postazione remota; il sistema integrato può arrivare ad avere un numero max. di 10 gradi di libertà.

La proposta europea del concetto di target assembly per IFMIF, conosciuto come “target a baionetta”, presenta delle peculiarità in termini di manutenibilità, di miglioramento della disponibilità d’impianto e di riduzione del materiale attivato da smaltire. La validazione del progetto di tale concetto di target passa comunque attraverso la verifica di alcune funzionalità senza le quali non è possibile garantire gli elevati standard di sicurezza richiesti durante il funzionamento. A supporto dell’attività d’ingegneria sono stati eseguiti una serie di test e analisi teorico-computazionali per la validazione di tale concetto. È stata eseguita la qualifica del sistema di tenuta della backplate, analizzato il fenomeno di swelling sugli accoppiamenti bullonati della Backplate, eseguite analisi e test del sistema di bloccaggio della backplate mediante pattini.

È stata adeguata l’area sperimentale del CR ENEA di Brasimone presso la quale saranno svolte le attività di validazione delle procedure e operazioni di manutenzione remotizzata del target di IFMIF. In particolare le modifiche hanno interessato sia l’area di lavoro (integrazione del nuovo braccio robotico e installazione di alcune nuove telecamere utili a migliorare le possibilità di visualizzazione degli operatori) sia la sala controllo.

- Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa del target assembly per IFMIF

L’attività svolta nel periodo di riferimento si è focalizzata sull’avanzamento del progetto ingegneristico del target assembly di IFMIF basato sul concetto di backplate rimovibile a baionetta. E’ stato prodotto un modello 3D in CATIA del sistema, completo di tutte le varie parti (backplate, nozzle, raddrizzatore di flusso, corpo centrale, flange di interfaccia), effettuando anche un’analisi di funzionalità per verificare la possibilità di rimuovere la back plate senza interferenze e di integrare il target con il design del loop al litio (di progetto JAEA) e della test cell (di progetto KIT).

E’ stata individuata e analizzata in via preliminare la possibilità di utilizzare un sistema ad hoc di tipo QDS (Quick Disconnecting System) per quanto riguarda le interfacce meccaniche del target con il loop al litio e con l’acceleratore, oppure, in seconda battuta, giunti di accoppiamento laddove l’uso del QDS risultasse impossibile. Sono state inoltre effettuate alcune simulazioni numeriche preliminari in supporto al design, in particolare: analisi neutronica, termoidraulica e termomeccanica che hanno globalmente confermato la fattibilità del concetto di target a baionetta proposto per IFMIF e la possibilità di soddisfare le principali specifiche di progetto del sistema.

#### Attività per il Programma IFERC (International Fusion Energy Research Center)

In quest’ambito ENEA ha il compito di studiare le proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei compositi ceramici in SiC/SiC e di sviluppare un’analisi di modello in grado di simulare ed interpretare le prove meccaniche su campioni di SiC/SiC. Sono state svolte attività relative alla caratterizzazione fisico/meccanica del composito ceramico SiC/SiC realizzato in collaborazione con FN. È stato progettato e realizzata una camera sperimentale per prove ad alta temperatura (1000-1200 °C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo per applicazioni fusionistiche. Sono state completate la camera in acciaio, il sistema di isolamento termico, il sistema di movimentazione del campione in SiC ed il sistema di sollevamento della flangia superiore della camera. La progettazione ha richiesto la realizzazione di un programma di ricerca e sviluppo ed una continua interazione con i colleghi giapponesi. Si sono rese necessarie prove sperimentali condotte nei laboratori di Frascati per verificare la compatibilità dei materiali.

#### **PROGRAMMA “FAST IL NUOVO ESPERIMENTO SATELLITE EUROPEO”**

- Calcoli strutturali per il sistema magnetico, la camera da vuoto ed il criostato di FAST e analisi del sistema di raffreddamento della macchina FAST

Il lavoro si è concentrato essenzialmente sulla progettazione, con le relative verifiche strutturali, nelle varie configurazioni magnetiche, di alcune delle parti più importanti della macchina FAST. In particolare sono stati calcolati in dettaglio i carichi elettromagnetici per l’avvolgimento toroidale e per il solenoide centrale e sono stati valutati accuratamente tutti i relativi sforzi meccanici sia in piano che fuori asse. Inoltre sono state ridisegnate sia la camera da vuoto che la prima parete; per entrambe è stata completata la valutazione, nella reale geometria 3D, dei carichi strutturali, dovuti alle correnti indotte, nelle varie configurazioni e/o scenari di plasma.

- **Analisi del sistema di Remote Handling (RH)**

Il divertore, in una macchina Tokamak, è il componente destinato allo smaltimento della maggior parte del carico termico della macchina stessa. Conseguentemente è una delle parti più critiche dell'esperimento, fino a considerarsi parte integrante dell'esperimento stesso: almeno per quanto riguarda lo sviluppo dei materiali e/o il disegno di differenti configurazioni, sia geometriche che magnetiche del divertore stesso, capaci di sostenere nel modo più robusto possibile i grandi carichi termici previsti per un futuro reattore.

Da quanto sopra esplicitato si evince facilmente la necessità sperimentale di poter cambiare il divertore durante le varie fasi della vita della macchina FAST. A tal fine si è resa necessaria una notevole attività di studio e progettazione di innovativi sistemi di Remote Handling. È stato sviluppato il sistema di RH per la presente configurazione standard del divertore. Questo ha significato il disegno dei supporti interni alla camera da vuoto, la loro compatibilità con il resto del progetto, la loro flessibilità ad allocare possibili, durante la vita della macchina, diversi divertori, la progettazione di sistemi, controllati remotamente, in grado di allocare e fissare il divertore all'interno della camera da vuoto e, per finire, la verifica in 3D della reale possibilità di muovere il divertore da dentro a fuori la macchina senza interferire con tutte le altre strutture presenti (finestre nella camera da vuoto, avvolgimenti poloidali).

### **Obiettivo finale dell'attività**

Il magnete toroidale di JT-60SA è superconduttore, raffreddato da elio supercritico alla temperatura di 4,4 K e termicamente isolato da un criostato. L'ENEA è responsabile della realizzazione e fornitura di 9 delle 18 bobine toroidali del magnete del Tokamak JT-60SA e gran parte degli alimentatori di alta tensione e corrente del sistema elettrico. La realizzazione delle bobine sarà eseguito utilizzando la linea di avvolgimento installata nello stabilimento della ASG dove avverrà la relativa impregnazione, inserimento e chiusura finale nella cassa di contenimento. Il metodo di inserimento dell'avvolgimento bobina nella cassa verrà studiato con attenzione per ottenere un manufatto con la precisione meccanica richiesta dagli accoppiamenti del magnete toroidale. Lo sviluppo del modello CAD della bobina e della cassa di contenimento consentirà lo studio delle interfacce e la definizione dei disegni di massima. Le attrezzature necessarie alla fase di inserimento e di lavorazione meccanica finale saranno finalizzate sulla base di prove di validazione e studi. Sperimentazioni sono state già condotte su piccoli campioni per ottimizzare le prestazioni elettriche e fluidiche dei componenti superconduttori.

All'interno dello sviluppo del progetto concettuale di FAST verranno analizzati in dettaglio alcune proprietà strutturali, le necessarie azioni per l'integrazione della potenza elettrica necessaria a far funzionare l'esperimento, e le principali necessità per il remote Handling della prima parete.

L'impianto IFMIF sarà una facility di ricerca di cospicuo rilievo, con una lunghezza di oltre 200 metri, progettata ad hoc. I suoi componenti principali saranno:

- 1) una sorgente di ioni (tipicamente ioni di deuterio);
- 2) due acceleratori lineari, di grande potenza (complessivamente 10 MW), che accelerano gli ioni di deuterio fino all'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sullo stesso bersaglio (target);
- 3) un target costituito da litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità, su cui gli ioni di deuterio accelerati impattano, sviluppando neutroni di elevata energia mediante opportune reazioni nucleari.

ENEA, in ambito europeo, è responsabile dello sviluppo del target per la produzione di neutroni. Il progetto è basato su un efflusso libero di litio ad alta velocità (20 m/s) che, investito normalmente da un fascio di deutoni, rilascia per la reazione nucleare di stripping, una corrente di neutroni sufficientemente energetici per poter esercitare, sui materiali in prova, lo stesso danneggiamento neutronico che ha luogo in un reattore a fusione. La proposta progettuale di ENEA comprende anche la intercambiabilità della parete posteriore del componente al fine di consentirne la sostituzione quando il danneggiamento del materiale con cui è realizzato raggiunge livelli inaccettabili.

Lo studio di compositi di SiC/SiC è una delle attività di ricerca e sviluppo di DEMO previste nell'ambito del progetto IFCR (International Fusion Energy Research Center). L'ENEA ha il compito di studiare le proprietà

meccaniche e chimico-fisiche dei compositi in SiC/SiC e di sviluppare un'analisi di modello in grado di simulare ed interpretare le prove meccaniche su campioni di SiC/SiC.

All'interno dello sviluppo del progetto concettuale di FAST verranno analizzati in dettaglio alcune proprietà strutturali del sistema magnetico, le necessarie azioni per l'integrazione della potenza elettrica necessaria a far funzionare l'esperimento, e le principali necessità per il remote Handling della prima parete.

### **Descrizione dell'attività a termine**

Il progetto riguarda le attività sulla fusione di cui ENEA ha la responsabilità, nell'ambito delle collaborazioni internazionali.

Il programma "Broader Approach", che si svolgerà nell'arco di sei anni, prevede:

- studio, progettazione e realizzazione del magnete di JT60SA (bobine superconduttrici e strutture di contenimento). Le attività si articolano in redazione delle specifiche, emissione di ordini per acquisti di materiali, impianti e attrezzature per la realizzazione delle bobine;
- studio, progettazione e realizzazione delle alimentazioni elettriche degli avvolgimenti di JT60SA. Le attività si articolano in redazione delle specifiche tecniche, procedure di gara ed aggiudicazione, revisione del progetto e inizio della realizzazione di 6 alimentatori degli avvolgimenti di campo poloidale e 2 alimentatori degli avvolgimenti di controllo della posizione del plasma tutti con i loro sistemi di crow-bar e i loro relativi 4 trasformatori;
- progettazione e realizzazione di 4 switching network unit. Le attività si articolano in redazione delle specifiche tecniche, procedure di gara ed aggiudicazione, revisione del progetto e inizio della realizzazione di 4 sistemi di switching;
- studi, progettazione e costruzione di un prototipo del target per prove fluidodinamiche, realizzazione e fornitura di sensori di misura, prove di erosione, corrosione e purificazione nell'impianto a litio liquido LiFus 6 del Brasimone;
- progettazione d'assieme completa del target di IFMIF; realizzazione del sistema di manutenzione remota e prove prototipiche di manutenzione in piattaforma di prova;
- analisi di sicurezza ed incidentale del target e del circuito a litio di IFMIF;
- misure delle caratteristiche fisiche di componenti in SiC/SiC. Sviluppo di modelli reologici per simulare il comportamento dei compositi ceramici
- progettazione e realizzazione di un dispositivo per prove di erosione/corrosione di target di SiC/SiC in movimento in litio liquido ad alta temperatura.

Nell'ambito del programma FAST si prevede:

- progettazione delle proprietà strutturali del sistema magnetico (toroidale più poloidale), della camera da vuoto, dei ports e del criostato di FAST;
- progettazione del sistema di raffreddamento per la macchina FAST;
- analisi della configurazione del Remote Handling, con particolare riguardo alla prima parete.

### **Prodotti significativi previsti alla fine del triennio**

Il risultato finale del progetto, connesso al Broader Approach, è atteso per il 2016: il triennio 2012-2014 rappresenta un avanzamento intermedio del progetto che produrrà successivamente i suoi risultati finali con la consegna in Giappone dei componenti di costruzione italiana, nel rispetto degli impegni internazionali assunti dal Governo Italiano.

Peraltro, i prodotti di tutte le attività elencate in precedenza costituiscono di per sé risultati intermedi molto significativi, che accrescono il patrimonio nazionale di know how, per certi aspetti unico nel campo della fusione, anche in settori ad alta tecnologia e di ampio interesse applicativo.

## ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

La realizzazione di queste attività sono inserite nell'ambito delle attività di ricerca per la fusione, che vengono eseguite nel nostro Paese da alcuni decenni, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi e benefici previsti dalla fusione nel lungo periodo. Nello specifico, inoltre, tra i benefici ipotizzabili per gli utenti del sistema elettrico nazionale possono essere individuati:

- lo sviluppo di nuovi processi di produzione innovativi nel campo dei conduttori elettrici;
- lo sviluppo di nuovi materiali e di loro possibili applicazioni future per diversi usi energetici anche elettrici.

## ***PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ***

### ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

#### **a. Macchina JT60SA**

L'obiettivo prevede il completamento dell'avvolgimento della prima bobina toroidale completa della prova di accettazione e l'approvvigionamento, degli impianti necessari all'inserimento della bobina nella cassa di contenimento. Lo sviluppo delle bobine toroidali è accompagnato dalla realizzazione completa dei componenti meccanici per la composizione di tre casse di contenimento.

Si prevede di acquisire i componenti principali per la realizzazione del primo della serie dei 4 Switching Network Unit (prototipo) per la commutazione rapida della corrente delle bobine del solenoide centrale. L'ingegnerizzazione di tale sistema consisterà nell'identificazione dei componenti industriali, della strumentazione di corredo e dello sviluppo dei disegni di fabbrica. Sono state completate tutte le specifiche tecniche e sarà elaborata la documentazione di gara degli alimentatori delle bobine poloidali e del controllo veloce della posizione del plasma.

Il preventivo per la sola spesa in attrezzature per la macchina JT60SA ricadente nel presente PAR 2012 è stimato in **5049 k€**, di cui si dirà in maggior dettaglio nella seguente descrizione dei quattro subtask in cui è suddiviso l'obiettivo:

#### ***a.1 Fornitura di 9 moduli di magneti di campo toroidale***

Si prevede il completamento di 6 doppi pancake con la composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione; l'approvvigionamento e l'installazione degli impianti di integrazione per l'assemblaggio finale delle bobine.

Al fine di portare a termine il presente obiettivo dovranno essere acquisiti i seguenti impianti e attrezzature:

- impianto di movimentazione e posizionamento della bobina e dei componenti della cassa;
- saldatrici TIG e impianto di saldatura dedicato per la saldatura finale della cassa;
- sistema di impregnazione e attrezzature di contenimento e riscaldamento per il processo di impregnazione nella cassa.

Quanto sopra è già previsto nell'ambito del contratto di ricerca pluriennale stipulato con ASG Superconductors spa nel corso del precedente PAR 2010 per l'importo complessivo di 17.258 k€. La quota di spesa in attrezzature relativa a detto contratto ricadente nell'arco temporale della presente annualità è di **2.715 k€**.

#### ***a.2 Realizzazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA***

Si prevede il completamento di qualifica dei processi speciali e la realizzazione e fornitura dei componenti necessari alla composizione di tre casse di contenimento.

Si procederà inoltre all'ottimizzazione dei procedimenti costruttivi, alla definizione dei trattamenti superficiali e delle tecniche mirate alla mitigazione degli stress residui.

Quanto sopra è già previsto nell'ambito del contratto pluriennale stipulato con Walter Tosto nel corso del precedente PAR 2011 per l'importo complessivo di circa 11.962 k€. La quota di spesa in attrezzature relativa a detto contratto ricadente nella presente annualità è di **1.584 k€**.

### **a.3 Realizzazione degli "Switching Network Unit" (SNU)**

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

Quanto sopra è già previsto nell'ambito del contratto pluriennale stipulato con OCEM Energy Technology srl nel corso del precedente PAR 2011 per l'importo complessivo di 3.509,88 k€. La quota di spesa in attrezzature relativa a detto contratto ricadente nella presente annualità è di **320 k€**.

### **a.4 Realizzazione di parte degli alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA**

Si prevede di completare la fase di aggiudicazione della gara per la realizzazione di otto alimentatori AC/DC e quattro trasformatori per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della Macchina JT-60SA. Si procederà con l'ingegnerizzazione con componenti industriali di 6 alimentatori per le bobine poloidali e 2 alimentatori di controllo e nello sviluppo dei disegni di fabbrica.

Quanto sopra sarà quindi oggetto di un contratto da stipulare nel corso del presente PAR 2012 per un importo complessivo che a base d'asta è stato fissato in 9.600 k€. La quota di spesa in attrezzature relativa a detto contratto ricadente nella presente annualità è stimata in **384 k€**.

#### Risultati/Deliverable:

- Completamento di 6 doppi pancake e relativa composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione (contratto ASG)
- Componenti meccanici per la composizione di tre casse di contenimento (contratto Walter Tosto)
- Realizzazione del primo elemento delle SNU detto anche prototipo (contratto OCEM)
- Ingegnerizzazione di 6 alimentatori per le bobine poloidali e 2 alimentatori di controllo e nello sviluppo dei disegni di fabbrica (contratto in aggiudicazione)

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

## **b. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF**

L'obiettivo è articolato nei cinque subtask di seguito descritti.

### **b.1 Campagna sperimentale dei sistemi di monitoring online per la misura delle impurezze in litio e per i fenomeni di cavitazione per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone) e costruzione del bersaglio a baionetta**

Si prevede di installare i sistemi di monitoring forniti da ENEA per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone). Due tipi di sistemi di misura saranno installati e qualificati: 1) il sistema di misura della resistività elettrica (resistivity meter - RM) che permette di determinare la quantità di azoto disciolto in litio; 2) il sistema di rilevamento del fenomeno di cavitazione. Il RM sarà installato sul circuito di purificazione dell'impianto EVEDA. Tale strumento sarà calibrato utilizzando le analisi offline fatte su campioni di litio prelevati dall'impianto EVEDA stesso, mentre in via preliminare saranno utilizzate le curve di calibrazione ottenute con uno strumento analogo installato sull'impianto LiFus6.

Il monitoraggio del fenomeno della cavitazione sarà effettuato per mezzo di uno strumento (CASBA system) progettato dall'ENEA. I sensori di cavitazione saranno installati all'ingresso della pompa elettromagnetica dell'impianto EVEDA e all'ingresso dell'ugello del target assembly.

Il progetto del target assembly Europeo è basato sul concetto di bersaglio a baionetta. Tale concetto consente di rimpiazzare la parte di target più sollecitata dal punto di vista neutronico, che è il bersaglio,

senza dover necessariamente sostituire l'intero target. La qualifica di tale componente prevede una campagna sperimentale, da condurre sull'EVEDA loop di Oarai, per la qualificazione termoidraulica e fluidodinamica. A tal fine il target assembly è stato realizzato in due parti: il corpo del Target, interamente in acciaio a bassa attivazione (F82H), è già stato realizzato dal JAEA di Oarai mentre il bersaglio a baionetta, anch'esso in acciaio a bassa attivazione (Eurofer 97), sarà realizzato dall'ENEA Brasimone.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto sull'installazione e commissioning dei sistemi di misurazione online per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone)
- Rapporto di fabbricazione del bersaglio a baionetta

Principali collaborazioni: Consorzio RFX

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**b.2 Campagne sperimentali a breve-medio termine (2000/4000 ore) per corrosione/erosione da litio**

Il programma sperimentale sui fenomeni di corrosione ed erosione per IFMIF è interamente di responsabilità dell'ENEA. Tale programma dovrà fornire i dati attesi di corrosione ed erosione per la corretta esecuzione della progettazione dell'intero impianto a litio di IFMIF.

In questa annualità sono previsti i tests di funzionamento fino a 4000 ore con uno step intermedio a 2000 ore. I campioni di materiale da testare sono l'AISI 316L e l'Eurofer 97.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulle prove di corrosione da litio sul breve e medio termine

Principali collaborazioni: contratto esterno

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**b.3 Validazione del sistema di purificazione del litio e calibrazione del sistema di monitoring online per misura delle impurezze in litio per l'impianto LiFus 6**

L'impianto LiFus6 utilizzato per lo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione è fornito di un sistema di purificazione delle impurezze disciolte nel litio. Principalmente si tratta di un sistema di trappole (calda e fredda) progettate per catturare le impurezze di C, N ed O. L'attività ha come obiettivo la valutazione dell'efficienza dei materiali utilizzati come getters.

Il controllo del contenuto di N in litio è uno dei fattori determinanti per garantire il funzionamento di lungo periodo di IFMIF. E' noto infatti che la concentrazione dell'azoto nel litio è l'elemento che promuove i fenomeni di corrosione degli acciai e pertanto la sua concentrazione deve essere mantenuta entro limiti accettabili. Per IFMIF tale limite è stato fissato in 10 ppm. Il sistema di monitoring attualmente in uso si basa sulla misura della resistività elettrica del litio ed è conosciuto come resistivity meter. L'obiettivo dell'attività è quello di fornire le curve di calibrazione della resistività  $\rho$  (T °C, N%).

Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulla validazione del sistema di purificazione di IFMIF
- Rapporto sulla calibrazione del sistema di monitoring online delle impurezze in litio

Principali collaborazioni: contratto esterno

Durata: ottobre 2012- settembre 2013

**b.4 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF**

- Validazione delle procedure ottimizzate per il ricondizionamento del target assembly di IFMIF

Per il ricondizionamento del target assembly di IFMIF nella versione europea saranno sviluppate le procedure per: il rimpiazzo della backplate; l'operazione di pulizia delle superfici in contatto con il litio; le

operazioni di ispezione e di tests da eseguire prima dello start di IFMIF; l'operazione per la rimozione del target assembly stesso.

Al fine di validare tali procedure di remote handling è prevista l'esecuzione di una serie di test delle operazioni su elencate.

- Valutazione dell'affidabilità delle procedure e dei dispositivi per il ricondizionamento del target di IFMIF

L'obiettivo di quest'attività è di fornire una valutazione dell'affidabilità delle procedure per il ricondizionamento del target assembly e del prototipo del target stesso dal punto di vista della manutenzione remotizzata. Inoltre sarà valutata l'affidabilità dei dispositivi utilizzati per l'esecuzione di tali operazioni. A tal fine saranno eseguiti un numero di cicli di manutenzione uguali a quelli attesi durante la vita di IFMIF (30 cicli).

- Realizzazione dei dispositivi per la validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target assembly di IFMIF

Le prove di validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata richiedono la realizzazione di dispositivi speciali appositamente progettati ( come il dispositivo per la pulizia delle superfici dai depositi di litio). Inoltre l'esistente sistema di manipolazione sarà integrato con un nuovo sistema per la rimozione di componenti di dimensioni e peso rilevanti.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulla validazione delle procedure di manutenzione remotizzata per il ricondizionamento del target di IFMIF
- Rapporto sulla affidabilità delle procedure e dei dispositivi per il ricondizionamento del target
- Rapporto sulla realizzazione dei dispositivi per la validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target di IFMIF

Principali collaborazioni: contratto esterno

Durata: ottobre 2012- settembre 2013

**b.5 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa di target assembly per IFMIF**

- Progetto finale del target assembly a baionetta completo di analisi termomeccanica, termo fluidodinamica e neutronica

Il progetto comprende: i disegni meccanici, il calcolo meccanico relativo al carico richiesto per la chiusura dei sistemi di tenuta backplate-target e per le connessioni del target con il loop a litio, l'analisi termomeccanica e quella termo fluidodinamica e l'analisi neutronica. L'attività comprende inoltre una stima del tempo di vita del componente.

- Progetto finale dei dispositivi per la manutenzione remotizzata del target di IFMIF

L'obiettivo di questa attività comprende il progetto di dettaglio dei dispositivi robotici per la manutenzione remotizzata del target assembly di IFMIF con particolare riferimento ai dispositivi per la sostituzione della sola backplate, inclusi i dispositivi di pulizia e di ispezione, e per l'apertura/chiusura delle tre flange di connessione del target assembly con il loop a litio.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulla progettazione finale del Target Assembly a baionetta completo di disegni
- Rapporto finale sulla progettazione dei dispositivi per la manutenzione remotizzata per il target assembly a baionetta di IFMIF.

Principali collaborazioni: Contratto esterno; Università di Palermo

Durata: Ottobre 2012- settembre 2013



## **c. Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center)**

### ***c.1 Realizzazione di componenti in SiC/SiC da utilizzare come componenti strutturali e funzionali***

Il materiale composito ceramico SiC/SiC rappresenta un interessante materiale per un possibile utilizzo come prima parete nei reattori a fusione o come materiale funzionale da utilizzare sempre nei reattori a fusione. Questi utilizzi richiedono la messa a punto di procedure per la realizzazione di manufatti di varie geometrie. A tal fine FN realizzerà pannelli di spessore 3, 4 e 5 mm e tubi di piccolo diametro oltreché prismi cavi a sezione quadrata. Tali elementi saranno soggetti a lavorazione meccanica per l'ottenimento di componenti da utilizzare nel forno destinato alla caratterizzazione ad alta temperatura del composito ceramico SiC/SiC in litio-piombo.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto su realizzazione di componenti in SiC/SiC da utilizzare per la realizzazione del supporto del campione di prova nel forno litio-piombo
- Fornitura di particolari prismatici cavi a sezione quadrata in SiC/SiC

Principali collaborazioni: FN

Durata: Ottobre 2012- settembre 2013

### ***c.2 Progettazione e costruzione di una camera sperimentale per prove di erosione-corrosione ad alta temperatura (1000°C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo***

Il forno opera ad alta temperatura prove di erosione-corrosione di SiC/SiC in litio-piombo. Nello specifico, un campione di SiC/SiC viene mantenuto in rotazione all'interno di un crogiolo contenente litio-piombo. Le condizioni di prova sono le seguenti:

- temperatura massima 1000 °C,
- velocità relativa LiPb/SiC nell'intervallo 0,1-0,5 m/s,
- durata delle prove fino a 3000 h.

Nella presente annualità sarà completata la realizzazione del forno in LiPb con la costruzione dei seguenti impianti: sistema di flussaggio gas inerte, sistema di raffreddamento dell'acqua, cablaggio degli impianti elettrici di alimentazione, layout della sensoristica e messa a punto del sistema di controllo ed acquisizione dati. Dopo il collaudo il forno verrà spedito in Giappone (laboratori di Rokkasho).

#### Risultati/Deliverable:

- Completamento dell'apparato sperimentale

Durata: Ottobre 2012- settembre 2013

## **d. FAST il nuovo esperimento satellite europeo**

### ***d.1 Sviluppo di un nuovo divertore compatibile con la standard topologia magnetica e con l'innovativa "Snow Flakes"***

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

#### Risultato/Deliverable:

- Progettazione e disegno ingegneristico del nuovo concetto di divertore
- Analisi delle sue proprietà in termini di power exhaust ed in termini di sua "compatibilità" con il bulk del plasma
- Analisi strutturale (carichi meccanici dovuti alle sollecitazioni elettromagnetiche e termiche) del nuovo divertore

Principali collaborazioni: Consorzio CREATE

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### ***d.2 Studio sulla possibilità di modificare la parte inferiore di FAST per realizzare una configurazione tipo "Super X"***

Scopo dell'attività è di analizzare, se è possibile, in un Tokamak con il rapporto di aspetto di FAST, una configurazione tipo "Super X". Tale configurazione avrebbe il vantaggio di portare la potenza uscente dal plasma in una regione lontana dal plasma stesso, disaccoppiando i problemi del bordo del plasma dalle caratteristiche del bulk del plasma.

Risultato/Deliverable:

- Progettazione di un equilibrio del plasma di FAST con configurazione "Super X"
- Compatibilità del suddetto equilibrio con un sistema di circuiti poloidali compatibile con FAST
- Valutazione preliminare del risultato ottenuto ai fini del disaccoppiamento "edge-bulk"

Principali collaborazioni: Consorzio CREATE

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### ***Comunicazione e diffusione dei risultati***

L'attività di comunicazione e diffusione dei principali risultati sia alla comunità scientifica che al largo pubblico generalmente interessato al tema avverrà mediante:

- workshop tematici nazionali ed internazionali;
- pubblicazioni di articoli e saggi divulgativi sulle principali riviste scientifiche internazionali del settore;
- divulgazione e condivisione dei risultati scientifici ottenuti anche attraverso l'utilizzo dei nuova media, ad iniziare da internet;
- Informazioni all'interno dei notiziari informatici più diffusi nella comunità scientifica internazionale del settore, tra i quali le newsletter dell'ENEA, di F4E e della JAEA.

Potranno essere adottate anche altre forme di comunicazione e diffusione dei risultati a seconda delle esigenze specifiche che potranno presentarsi, utilizzando un approccio comunicativo flessibile in grado di assicurare la migliore copertura possibile dell'audience. I costi di queste attività sono inclusi nei preventivi dei diversi obiettivi progettuali.

**PROGETTO B.3.2 “Attività di fisica della fusione complementari a ITER”**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Macchina JT60SA	40091	2205	5049	100	0	65	0	7419
b	Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF	1818	100	265	20	265	25	0	675
c	Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center)	3927	216	40	0	0	0	250	506
d	FAST il nuovo esperimento satellite europeo	5818	320	0	0	80	0	0	400
<b>TOTALE</b>		<b>51654</b>	<b>2841</b>	<b>5354</b>	<b>120</b>	<b>345</b>	<b>90</b>	<b>250</b>	<b>9000</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con FN spa (per 250 k€)

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

Il Piano d'Azione Europeo per l'Efficienza Energetica (PAEE) 2011 rimarca il ruolo dell'efficienza energetica come strumento imprescindibile di riduzione dei consumi nell'ambito dei Paesi Membri, nel raggiungimento dell'obiettivo del -20% al 2020 e al fine di avviare un uso efficiente delle risorse. In parallelo, il Piano d'Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili (PAN) fornisce ulteriori indicazioni a favore dell'efficienza energetica, come presupposto indispensabile per il raggiungimento degli obiettivi in materia di energie rinnovabili e riduzione della CO<sub>2</sub>.

L'impegno particolarmente intenso necessario per raggiungere tali obiettivi richiede efficaci politiche energetiche che da un lato facilitino lo sviluppo di tecnologie, processi, prodotti e servizi a ridotto consumo di energia e, dall'altro nello stesso tempo permettano di orientare i comportamenti dei consumatori e/o utenti finali verso un uso razionale dell'energia in modo da ridurre il consumo di energia attraverso l'acquisto consapevole e informato di prodotti e servizi ecoefficienti prima e il loro corretto uso poi.

In tale senso l'efficienza energetica, intesa nel suo più ampio senso di riduzione del consumo di energia a parità di servizio che di uso razionale dell'energia è uno strumento funzionale alla costruzione di un quadro organico con un orizzonte di medio e lungo periodo; la sua doppia natura legata ai miglioramenti tecnologici ma anche a comportamenti consapevoli e responsabili verso gli usi energetici la rendono lo strumento più efficace dal punto di vista della praticabilità tecnica, finanziaria e socio-economica.

Il Rapporto annuale sull'Efficienza energetica restituisce l'immagine di un Paese che mostra finalmente segnali significativi di un nuovo approccio strategico al risparmio energetico, come testimonia l'entità del risparmio conseguito al 31/12/2010 (circa 47.700 GWh/anno) notevolmente superiore all'obiettivo prefissato nell'ambito del PAEE (35.600 GWh/anno). Nonostante ciò esiste ancora una significativa possibilità di miglioramento dell'efficienza e di risparmio energetico specialmente in alcuni settori.

Le barriere che ostacolano lo sfruttamento di questo potenziale includono: una carente attività di informazione e formazione verso tutti gli *stakeholder* (PA, aziende e cittadini), con riferimento ai benefici ottenibili con interventi di efficientamento del parco di beni e servizi; difficoltà di accesso al capitale per l'investimento iniziale necessario, la percezione di un rischio elevato dell'investimento e la mancanza di strumenti e dati sul ritorno economico dell'investimento stesso e, infine, la piccola dimensione dei progetti associata ad alti costi di transazione.

Il superamento delle barriere esistenti richiede che occorrono una serie di condizioni: attività di RS&D sulle tecnologie energetiche innovative/non mature al fine di favorirne una più rapida introduzione sul mercato; l'esistenza di un bilanciato mix di regole e incentivi per le politiche di efficienza energetica; efficaci azioni di formazione, informazione, sensibilizzazione per promuovere comportamenti energeticamente consapevoli; la messa a punto di semplici strumenti di valutazione dei benefici economici energetici/ambientali degli interventi effettuati, un quadro legislativo certo e stabile nel medio periodo indispensabile per attrarre gli investimenti.

### **Situazione attuale del prodotto dell'attività**

I miglioramenti di efficienza nei diversi settori sono stati valutati mediante indici di efficienza energetica che mettono in relazione sia il consumo energetico per produrre beni e/o servizi con la quantità di beni e/o servizi prodotta che il consumo di energia dei beni/servizi per la realizzazione della loro funzione. I vari settori dell'economia italiana hanno contribuito in modo diverso all'ottenimento di questo risultato: il civile

è quello che ha avuto miglioramenti regolari e costanti per tutto il periodo 1990-2009, mentre l'industria ha avuto significativi miglioramenti solo negli ultimi cinque anni.

Il settore civile ha fornito un contributo determinante al raggiungimento degli obiettivi previsti dal PAEE 2007. Il merito principale è da ascrivere all'attuazione, da parte del nostro Paese, di politiche di recepimento della Direttiva 2002/91/CE (efficienza energetica degli edifici) quali l'aggiornamento della legislazione di riferimento, l'adeguamento delle relative norme tecniche e l'incentivazione di interventi nel settore civile. Nel periodo 1990-2009, il settore residenziale è quello che ha registrato il miglior risultato in termini di incremento dell'efficienza energetica: nel 2009 l'indice è risultato pari a 76,1 e quindi l'incremento di efficienza complessivo, rispetto al 1990, è stato pari al 23,9%.

Nel settore civile, il mercato dispone di diverse tecnologie di particolare interesse per il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio/impianto, ma è necessario che si consolidino e diffondano anche altre tecniche tali da rendere gli impianti energeticamente positivi grazie all'uso di un'attenta progettazione del sistema, grazie all' sviluppo di strumenti di calcolo validi con modelli matematici sufficientemente evoluti, e di logiche di regolazione e controllo; inoltre, il diffondersi delle sorgenti luminose a LED e OLED comporta diverse attività di ricerca per aumentare l'efficienza energetica nell'illuminazione artificiale e in altre realtà ad essa collegate, sia sulla produzione della luce, sia sul suo utilizzo.

Il settore dell'industria manifatturiera ha fatto registrare nel periodo 1990-2009 un miglioramento dell'efficienza energetica pari al 9,9%; la chimica e siderurgia sono i settori che hanno realizzato le migliori performance: l'incremento di efficienza è stato rispettivamente pari al 38,8% e al 17,9%; significativi miglioramenti si osservano a partire dal 2005 anche per il tessile.

### ***Stato attuale delle tecnologie***

L'introduzione di limiti prestazionali più restrittivi sulle prestazioni energetiche termiche degli edifici ha decisamente inciso sulle tecnologie costruttive e di climatizzazione degli stessi fornendo un forte stimolo per le industrie del settore alla ricerca verso l'innovazione. Inoltre, la normativa emanata in attuazione delle direttive europee richiede che gli impianti di produzione di energia termica per edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti devono essere progettati e realizzati in modo da garantire la copertura di almeno il 20% del fabbisogno termico di acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento da fonti rinnovabili.

Gli obiettivi previsti dal decreto potrebbero risultare particolarmente ambiziosi, in particolare per complessi edilizi ad alta densità abitativa, dove l'adozione di tecnologie capaci di produrre la necessaria energia termica da fonte rinnovabile potrebbero trovare difficoltà applicativa, per mancanza di spazi o per difficoltà integrative, tali da spingere i progettisti a invocare il vincolo tecnico. In questo contesto si ritiene particolarmente importante analizzare le potenzialità delle reti energetiche locali come possibile soluzione ai vincoli tecnici che contrastano la diffusione delle fonti rinnovabili.

Il recente sviluppo di efficienti motori termici per la generazione distribuita sta cambiando il fulcro della produzione di energia verso unità di produzione locali sparse sul territorio e si fa, dunque, avanti la necessità di strumenti nuovi per affrontare l'analisi e la pianificazione delle risorse energetiche distribuite.

L'accoppiamento di sistemi di cogenerazione per refrigeratori ad assorbimento/elettrico o pompe di calore, così come le interazioni con fonti rinnovabili, consentono la creazione di multi-generazione di sistemi combinati per la produzione locale di diversi vettori energetici come l'energia elettrica, calore (entalpia a livelli diversi), potenza di raffreddamento.

L'Industria alimentare - che insieme ad agricoltura, indotto e distribuzione rappresenta la prima filiera economica del Paese - acquista e trasforma circa il 70% delle materie prime nazionali, rappresenta la seconda industria manifatturiera del Paese dopo quella metalmeccanica con un fatturato di export pari a circa a 20 miliardi di euro. Proprio allo scopo di rafforzare la proiezione nazionale e internazionale delle imprese alimentari e le potenzialità di crescita è necessario promuovere una politica di efficienza e di ottimizzazione dei consumi energetici dell'intera filiera agroalimentare (dall'agricoltura, ai trasporti, alla distribuzione tradizionale e moderna). In tale contesto, un ruolo primario assume la cosiddetta "catena del

freddo” che a livello mondiale consuma l’8% dell’energia. Gli stili di vita determinano la continua crescita del settore dei surgelati o dei piatti pronti che devono essere conservati a temperatura controllata. Si consideri che nel 1984 la produzione era di circa 200000 tonnellate mentre nel 2004 sono state commercializzate oltre 750000 tonnellate di prodotto. L’appropriata e costante temperatura delle derrate alimentari dalla fase di produzione a quella di consumo è uno degli elementi più importanti per la conservazione del prodotto e per la conseguente riduzione dei consumi energetici. Tra le tecniche di conservazione degli alimenti la refrigerazione è quella di maggiore interesse dal punto di vista della efficienza energetica a causa della necessità di tenere sotto stretto controllo l’umidità.

L’evoluzione tecnologica di questi ultimi anni ha portato a celle frigorifero sempre più evolute che cercano di ottenere un controllo sulla temperatura sempre più accurato, anche in condizioni critiche di esercizio, migliorando l’omogeneità della temperatura all’interno della cella, fattore critico per proteggere il carico, mediante opportuni ventilatori e prese d’aria. Per quanto riguarda i materiali utilizzati, fino a qualche decennio fa, i soffitti e le pareti erano costituiti da pannelli sandwich prefabbricati consistenti in due cortecce in lamiera zincata e verniciata fra le quali veniva espanso il materiale isolante, in genere poliuretano. Attualmente in modo sempre più marcato, specie in condizioni di esercizio critiche, questi materiali sono stati sostituiti da pannelli sandwich in resina poliestere caricata con fibre di vetro fra le quali viene espanso il materiale isolante, in genere sempre poliuretano. In tale scenario l’impiego dei materiali a cambiamento di fase (Phase Change Material, PCM) potrebbe migliorare notevolmente l’isolamento termico delle strutture sandwich, affiancando/sostituendo, dipendentemente dalle applicazioni, lo strato espanso di poliuretano.

La COM (2011)889 del 15/12/2011, emessa dalla Commissione Europea, conferma l’importanza del mercato dell’illuminazione a stato solido, oggi e nel prossimo futuro, dato che l’illuminazione genera il 14% dei consumi di energia elettrica in Europa (19% nel mondo).

I LED sono oggi una tecnologia matura a differenza degli OLED (disponibili sul mercato solo ad alto costo e in esemplari di piccole dimensioni), la cui importanza è destinata a crescere nei prossimi anni. La tecnologia SSL (Solid-SLightin, comprende LED e OLED) rappresenta una svolta nell’illuminazione generale sotto diversi aspetti fondamentali: l’efficienza energetica, qualità dell’illuminazione e comfort visivo, design ed estetica. Oggi i LED bianchi d’avanguardia hanno già raggiunto un’efficienza energetica pari al 30-50%, hanno un’efficacia luminosa che va da 100 a 150 lumen/Watt (lm/W) e il loro indice di resa cromatica (IRC) è pari a 80. I valori obiettivo previsti per i LED bianchi caldi nei prossimi 10 anni sono un’efficienza del 50-60%, un’efficacia superiore a 200 lm/W e un IRC superiore a 90. I prodotti OLED più moderni hanno oggi un’efficacia di circa 50 lm/W. Anche se si prevede che gli OLED avranno sempre un’efficacia inferiore a quella dei LED, il valore aggiunto della tecnologia OLED deriverà dalle dimensioni e dalla flessibilità di questi dispositivi, nonché dalle possibilità offerte nell’ottica di nuove applicazioni.

La combinazione e lo sfruttamento delle numerose caratteristiche e dei molti vantaggi della tecnologia SSL creeranno molte nuove opportunità commerciali per l’industria dell’illuminazione e determineranno un cambiamento dei modelli di impresa.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### ***Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali***

Nei precedenti piani triennali sono stati svolti dei programmi che hanno fornito soluzioni per il miglioramento dell’efficienza energetica del sistema edificio-impianti attraverso lo sviluppo di interventi di tipo sistemico, quali: la definizione di linee guida e di benchmark di riferimento per la eco-progettazione dei componenti di uso diffuso, l’aggiornamento della normativa, lo sviluppo e qualificazione di tecnologie innovative e loro diffusione attraverso la realizzazione di progetti dimostrativi, l’informazione e trasferimento tecnologico verso società di servizi e utenti finali.

Inoltre, sono state svolte attività di ricerca sui fabbisogni e consumi energetici del sistema edificio-impianto, l’applicazione dimostrativa di soluzioni tecnologiche avanzate per la razionalizzazione dei

consumi, lo sviluppo di componenti innovativi e le nuove attività sulle tecnologie per l'illuminazione pubblica. In particolare, per quanto attiene al settore civile sono state prodotte linee guida e indici di riferimento per il legislatore, valutazione dei consumi di significative tipologie di edifici, sviluppo di modelli di calcolo, caratterizzazione di componenti dell'involucro edilizio per schermaggio e illuminazione naturale.

In relazione al risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica sono state svolte attività di ricerca su prodotti innovativi (LED), che hanno prodotto prototipi, validati con campagne di test sperimentali, sviluppo di strumenti per la progettazione ottimizzata di set urbani e sistemi di controllo intelligente, realizzazione di sistemi pilota di illuminazione in situazioni applicative complesse e ripetibili. Infine sono state condotte attività trasferimento tecnologico verso realtà territoriali e di supporto all'attività prenormativa e normativa.

A seguito delle attività svolte, sono stati pubblicati sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea vari regolamenti delegati che definiscono la nuova etichetta per i principali apparecchi domestici<sup>1</sup> e una lunga serie di regolamenti di ecodesign, che definiscono i criteri minimi per l'immissione dei prodotti sul mercato comunitario, e quindi nazionale e che coprono oltre ai grandi elettrodomestici prima citati una serie di prodotti industriali (motori elettrici, i ventilatori, le pompe), i sistemi di illuminazione, e alcuni prodotti di uso comune quali i decoder e i caricabatteria.

### **Obiettivo finale dell'attività**

L'obiettivo finale dell'attività consiste nello sviluppo di strumenti e metodi, che mirano al miglioramento di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di stimolare nel mercato la circolazione di prodotti più performanti.

Poiché il panorama degli *stakeholder* è piuttosto complesso e caratterizzato da diverse tipologie le attività sono state suddivise in quattro linee di attività principali, che si articolano a loro volta in differenti obiettivi.

### **Descrizione dell'attività a termine**

L'attività a termine, con un orizzonte temporale triennale, si articola attraverso le seguenti quattro linee di attività:

- Reti di poligenerazione
- Gestione ottimale reti di edifici
- Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione
- Tecnologie per l'industria del freddo

### **Prodotti significativi previsti alla fine del triennio**

- ✓ Realizzazione di un ambiente di progettazione e simulazione di un distretto energetico per l'identificazione dei principali parametri elettrici e energetici
- ✓ Creazione di una roadmap per reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento che comprenderà la definizione di linee guida e la progettazione di dimostrativi per stimolare il mercato in questo settore
- ✓ Sviluppo di una metodologia a supporto del gestore di una rete di edifici terziari (es: uffici, scuole, agenzie postali o bancarie, ecc..) e/o del gestore di uno "smart village" al fine di ridurre tutte le fonti di consumo energetico all'interno del village
- ✓ Prototipi di dispositivo di illuminazione a LED a fosfori remoti e di apparati di illuminazione innovativi a LED per impianti stradali

---

<sup>1</sup> Apparecchi per la refrigerazione domestica (r.d. 1060/2010/UE); lavatrici domestiche (r. d. 1061/2010/UE, lavastoviglie (r.d. 1059/2010/UE); TV (r.d. 1062/2010/UE); condizionatori d'aria ≤ 12kW capacità di raffreddamento (r.d. 626/2012/UE); Asciugatrici (r.d. 392/2012/UE).

- ✓ Tool di simulazione per il supporto alla redazione del Piano Regolatore dell'illuminazione comunale pubblica (PRIC) e tool per il monitoraggio remoto e real time di indicatori di prestazione di impianti di illuminazione pubblica
- ✓ Prototipo di naso elettronico per il monitoraggio temperatura, umidità relativa e composti volatili organici emessi dai prodotti deperibili per ricavarne un indice di maturazione e stato di salute che consenta di migliorare l'efficienza energetica del sistema di refrigerazione a costi compatibili con l'esercizio delle attività commerciali
- ✓ Caratterizzazione di strutture multistrato presenti sul mercato contenenti tipologie diverse di materiali a cambiamento di fase (PCM), potenzialmente utilizzabili nella costruzione di pareti multistrato di celle frigorifere, al fine di migliorarne le performance e ridurre i costi di gestione energetica.

### **Coordinamento con attività di CNR e RSE**

Il Ministero dello Sviluppo Economico, accogliendo anche le indicazioni presentate dai comitati di sorveglianza degli Accordi di Programma, ha ritenuto opportuno disporre la costituzione di gruppi di lavoro con lo scopo di garantire quanto previsto nel Piano triennale, ovvero coordinare le attività comuni ed affini tra i vari soggetti affidatari, con lo scopo di evitare inutili sovrapposizioni.

ENEA ha coordinato il Gruppo di Lavoro "Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia nei settori: industria, servizi e civile" per raccordare ed ottimizzare le attività con CNR e RSE nei seguenti temi:

- a) Sistemi e tecnologie per il solar cooling
- b) Sistemi illuminazione innovativi LED OLED
- c) Sviluppo pareti opache
- d) Politiche energetiche nazionali e comunitarie.

Inoltre, ENEA ha partecipato, insieme a CNR e RSE, alle attività del Gruppo di Coordinamento del progetto "Ricerche su reti attive, generazione distribuita e sistemi di accumulo di energia elettrica", che ha predisposto un documento che assicura la pianificazione in termini quantitativi, qualitativi e temporali delle attività svolte dagli affidatari sui seguenti argomenti comuni:

- Studio di reti di distribuzione attive in MT e BT (RSE, ENEA, CNR)
- Sviluppo sistemi di accumulo avanzati integrati nelle reti elettriche nelle seguenti applicazioni: Power Quality, Peak Shaving, servizi ancillari, sistemi ibridi a fonte rinnovabile (minieolico, fotovoltaico) operanti in isola, trasporto elettrico (CNR, RSE, ENEA).

### **Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività**

Lo sviluppo delle tecnologie per l'efficienza energetica, l'uso di nuove tecnologie e la conoscenza di dati tipologici e dei consumi energetici degli edifici sono le principali azioni con le quali è possibile far fronte alla riduzione dei consumi termici e alla diminuzione della richiesta di energia elettrica nel settore civile, industria e servizi.

Da considerare che il settore del civile è, al momento, quello maggiormente responsabile dei consumi negli edifici. I consumi infatti hanno registrato un aumento da 46,9 Mtep del 2009 a circa 48Mtep nel 2010 con incrementi percentuali di circa l'8%. Questo incremento di consumi va imputato, principalmente, all'utilizzo del vettore elettrico per gli impianti di climatizzazione estiva, sempre più diffusi, e all'utilizzo di apparecchi "bianchi" e "bruni".

In tutti settori economici le potenzialità di contenimento 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 ed esse possono contribuire in maniera considerevole agli ambiziosi obiettivi della direttiva EU 20-20-20. Una gestione "centralizzata" può fornire vantaggi economici, che potrebbero essere sfruttati da ESCo per incrementare la redditività economica, i risparmi energetici nonché benefici dovuti



alla maggiore indipendenza energetica dell'utenza e legati ad un più razionale utilizzo stagionale del gas naturale e dell'energia elettrica.

Le attività di questo progetto costituiscono la base per l'applicazione di soluzioni tecnologiche e lo sviluppo di strumenti di governance atti a favorire il consenso verso tali strategie e la loro diffusione capillare. E' da evidenziare che, la disponibilità di poter accedere e utilizzare informazioni e soluzioni tecnologiche per l'efficienza energetica negli edifici, di nuova costruzione o da riqualificare, è un fattore di cui beneficia il sistema Paese, in generale, e l'utente finale, in particolare.

## **PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ**

### ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

#### **a. Reti di poligenerazione distribuita**

##### ***a.1 Sviluppo di strumenti per l'ottimizzazione dei consumi energetici del sistema edifici-impianti nella configurazione di distretto energetico, attraverso la modellazione dinamica dei carichi termici ed elettrici.***

Il modello di sviluppo basato sui distretti energetici, ovvero insediamenti (residenziale, non residenziale, industriale) in cui un mix di soluzioni tecnologiche consente di ottimizzare l'interazione tra consumo e generazione locale dell'energia, riducendo i consumi e ricorrendo alle fonti rinnovabili. La trasposizione reale di un tale modello di comunità energetica, basata sulla collaborazione diffusa e la flessibilità (ovvero scambi di energia e load sharing) deve essere realizzato per mezzo di strumenti che permettano di individuare i valori corretti dei parametri progettuali attraverso una simulazione dinamica integrata del mix di tecnologie impiegate. Lavori scientifici sperimentali hanno dimostrato come l'efficienza di una rete di poligenerazione, caratterizzata da impianti di piccola taglia, differisce significativamente dal suo funzionamento previsto, a causa della necessità di un regolare funzionamento dell'impianto e degli effetti delle interruzioni per attività di manutenzione programmata o non programmata; quindi gli approcci euristici basati sulla curva di domanda di durata sono strumenti deboli per l'ottimizzazione della progettazione degli impianti, mentre un metodo più raffinato è quello che si basa sulle condizioni operative realistiche.

Il presente obiettivo intende realizzare, nell'orizzonte temporale dei tre anni, lo sviluppo di un ambiente di progettazione e simulazione di un distretto energetico integrando i modelli matematici già sviluppati (nel precedente piano triennale) per la identificazione di parametri elettrici e energetici.

L'attività di sviluppo comprende: una prima fase di definizione di architetture e configurazioni di reti evolute per gli edifici predisposte alla gestione centralizzata dell'energia prodotta localmente in funzione di una curva rappresentativa della "domanda termica aggregata" (oggetto del piano operativo 2012), una seconda fase di individuazione di un caso applicativo e costruzione del modello nell'ambiente di simulazione (seconda annualità), una terza fase di sperimentazione delle logiche di gestione e di analisi di sensitività rispetto ai parametri economici ed energetici.

Allo scopo di preparare la fase di sperimentazione, verrà sviluppato un sistema di controllo per piattaforme poligenerative basate su integrazione di varie tecnologie di generazione dell'energia da fonte rinnovabile e convenzionale. Il sistema di controllo sarà dotato di un'architettura hardware e software di tipo modulare idonea alla gestione ottimizzata dell'interfaccia di comunicazione con le diverse tecnologie di generazione più diffuse in relazione, sia ad esigenze d'utenza per quanto concerne la domanda d'energia, sia alle specifiche tecniche ed alle caratteristiche della piattaforma ibrida, anche in considerazione dell'utilizzo di componenti/sistemi commerciali (pannelli fotovoltaici, micro-turbine eoliche, storage, microturbina a gas, gruppi frigo ad assorbimento, etc..).

## ***a.2 Studi e caratterizzazione di reti termiche distribuite, valutazione dei risparmi energetici conseguibili grazie all'integrazione di impianti basati su tecnologie non diffuse con ampi potenziali di efficientamento.***

Nel presente obiettivo si intende analizzare le principali problematiche relative all'efficientamento delle reti di teleriscaldamento già esistenti, ovvero la definizione di metodologie di gestione (produzione e prelievo) che permettano di aumentare la capacità di servizio delle attuali infrastrutture, e all'immissione di calore da parte di terzi (produzione distribuita locale di calore, sovrapproduzione provenienti da processi produttivi industriali) nelle attuali infrastrutture.

Una nuova prospettiva che si affianca al teleriscaldamento è quella del teleraffrescamento: l'uso del calore prodotto dagli impianti di cogenerazione per la produzione di acqua refrigerata, mediante gruppi frigoriferi ad assorbimento. In un sistema di teleriscaldamento, il teleraffrescamento può essere utilizzato sia a livello di centrale, distribuendo acqua refrigerata presso le utenze (ad una temperatura di 6°C), oppure attraverso un gruppo frigorifero presso l'utente finale. Il teleraffrescamento (district cooling) vero e proprio si ha nel primo caso in cui l'acqua refrigerata, prodotta in centrale dai gruppi frigoriferi, è distribuita alle utenze attraverso una rete dedicata. Vi sono tuttavia diversi problemi economici e tecnici che ostacolano una larga diffusione di questa tecnologia nel nostro Paese, che invece è caratterizzato da elevati picchi di consumi energetici durante il periodo estivo.

Nell'orizzonte temporale dei tre anni di attività del presente programma si intende: analizzare e dare soluzione ai principali problemi tecnici, definire strategie di controllo che permettono l'ottimizzazione della produzione in linea con la domanda e dei prezzi dell'energia, tale capacità si traduce in una migliore efficienza energetica e minori costi operativi. L'obiettivo, in collaborazione con le Associazioni di categoria è quello di creare una roadmap che comprende l'individuazione delle criticità, la definizione di linee guida e la progettazione di dimostrativi per stimolare il mercato in questo settore.

Le attività del primo anno si articoleranno attraverso la caratterizzazione delle reti di teleriscaldamento con particolare attenzione ai materiali e ai componenti impiegati, alle logiche di controllo e gestione per individuare soluzioni innovative al fine di incrementare l'efficienza energetica delle reti esistenti e promuovere l'installazione di nuove reti di piccola estensione come possibile soluzione ai vincoli tecnici che influenzano la diffusione della poligenerazione.

### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico contenente i risultati dell'attività di sviluppo dell'ottimizzazione dei consumi energetici nel distretto
- Rapporto tecnico contenente le specifiche del sistema di controllo per la piattaforma poligenerativa ibrida
- Rapporto tecnico contenente i risultati degli studi e dell'attività di caratterizzazione

Principali collaborazioni: Università di Palermo, Politecnico di Torino, Sapienza Università di Roma, Università del Sannio

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

## **b. Gestione di reti di edifici e "smart village"**

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

L'attività si articola su due approcci tra loro in parte connessi. L'approccio "building network management" prescinde dal fatto che gli edifici siano localizzati nella stessa area o distribuiti su un ampio territorio ed è vastamente applicabile sull'attuale patrimonio edificato terziario esistente (non richiede edifici di nuova

costruzione). Inoltre identifica un modello tecnologico che potrebbe rispondere alla direttiva comunitaria che focalizza l'attenzione sugli edifici pubblici. Il concetto di "smart village" identifica un sistema ottimale di gestione fortemente informatizzata relativa ad una concentrazione in un'area limitata di edifici ed utenze esterne a loro connesse ma gestite da un solo gestore (es: un campus universitario, un complesso ospedaliero).

In particolare l'idea di base è quella di dotare la rete di edifici ed il "village" stesso di sensoristica, sistemi di attuazione e sistemi di trasmissione dati ed un sistema centralizzato dove viene sviluppata la modellazione della rete, la diagnostica su ogni edificio ed utenza della rete, la comparazione tra le prestazioni dei vari edifici, l'impatto delle fonti di consumo energetico e dei loro costi.

Tale attività rappresenta la continuazione dello sviluppo della metodologia introdotta nei precedenti programmi di ricerca (PAR 2010 e PAR 2011) all'interno dei quali è stata realizzata presso il CR Casaccia una rete che comprende otto edifici ed il viale su cui tali edifici si affacciano ed uno smart building particolarmente avanzato (F40). In precedenza l'attenzione è stata concentrata sulla realizzazione di un sistema di diagnostica che potesse operare sia a livello di singolo edificio che a livello di rete con tecnologie di computing intelligence al fine di segnalare guasti, insufficienze dei sistemi o errati comportamenti delle persone. Il programma successivo mira a sviluppare la piattaforma di controllo ed ottimizzazione della rete. Per quanto riguarda gli edifici, tali metodologie si posizionano al di sopra dei Building Energy Management Systems (BEMS) ed hanno lo scopo di ottimizzare i set point del BEMS (orari di accensione-spegnimento, parzializzazioni, temperature dei sistemi di scambio termico e set point delle stanze) per il controllo delle utenze di climatizzazione, di illuminazione e fcm in relazione ad una serie di target quali comfort, risparmio energetico, spesa energetica, spesa di manutenzione. Saranno impiegate tecniche di ottimizzazione dinamica al fine di inseguire continuamente i cambiamenti stagionali, settimanali, giornalieri, orari e delle abitudini dell'utenza. Sarà inoltre studiata la modellazione di situazioni in cui, per motivi diversi, venga richiesta una riduzione temporanea del carico in relazione ad emergenze o premialità (gestione attiva della domanda). Tale logica sarà affrontata introducendo nei sistemi di ottimizzazione dinamica multi-obiettivo la richiesta di riduzione del carico cercando di attuarla con la minimizzazione del discomfort e dell'impatto sulla condizione efficiente della rete di edifici.

Il principio dell'energy-on-demand che ispira la metodologia verrà applicata a tutte le fonti di consumo energetico dello smart village sia all'interno che all'esterno degli edifici stessi. A tal proposito verrà sviluppata una metodologia di predizione della utenza all'interno della rete al fine della regolazione dinamica dell'illuminazione interna ed esterna nel complesso in funzione delle esigenze di utilizzo basata sull'analisi di sensori visivi e sistemi di rilievo della presenza e della ricostruzione dei flussi di mobilità all'interno del village. Tale metodologia eredita lo sviluppo condotto negli anni precedenti ma specializza l'analisi sul monitoraggio delle persone e sulla ingegnerizzazione del metodo.

Tutti i dati ed i sistemi "verticali" verranno integrati in una piattaforma sviluppata ad hoc cui affluiscono tutte le informazioni provenienti dalle diverse voci di consumo all'interno del village che integrerà tutte le informazioni su un DB coordinato, un sistema di visualizzazione e sistemi di interazione con gli utenti. La sperimentazione avverrà principalmente presso il Centro Ricerche Casaccia dove è stato allestito il 90 % delle attrezzature necessarie a portare a termine e qualificare sperimentalmente le metodologie sviluppate. Tale attività è in forte connessione con le reti di ricerca europee. In particolare si parteciperà attivamente alla rete EERA dove ENEA svolge un ruolo di coordinamento molto importante sul tema della gestione ottimale delle reti di edifici e con le Stakeholder Platforms delle Industrial Initiatives.

Nell'orizzonte temporale dei tre anni di attività del presente programma si intende: sviluppare la metodologia, qualificarla su una rete di edifici a bassa complessità (terziario, aree controllate), estenderla al settore residenziale e qualificarla su una rete di edifici ad alta complessità (contesti urbani, terziario+residenziale). Tale attività è in forte connessione con le filiere industriali (in particolare Confindustria) e le reti di ricerca europee.

#### Risultati/Deliverable

- Rapporto tecnico sulla metodologia di controllo ed ottimizzazione della rete di edifici.

- Rapporto tecnico contenente la descrizione della metodologia e dell' implementazione presso la rete del CR Casaccia. Risultati della sperimentazione

*Principali collaborazioni:* Università di Roma Tre, Università Politecnica delle Marche, Politecnico di Torino

*Durata:* ottobre 2012 - settembre 2013

## **c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione**

### **c.1 Materiali e componenti utilizzati per l'emissione e la trasmissione della luce**

L'attività sperimentale è mirata alla realizzazione di prototipo OLED finalizzato allo studio e messa a punto di particolari aspetti del suo processo di realizzazione e del suo funzionamento: estrazione ottica e tempo di vita. Lo studio e l'ottimizzazione di questi particolari passi di processo si inquadrano in termini di efficienza energetica e risparmio energetico e mirano a portare valore aggiunto a prodotti della industria italiana di settore.

Le attività si articoleranno, quindi, in due fasi: la prima sarà caratterizzata dalla realizzazione di diversi tipologie di strati per modificare gli effetti di intrappolamento di luce e migliorare l'accoppiamento ottico dei dispositivi al fine incrementarne l'efficacia; la seconda fase riguarderà la realizzazione di OLED su vetro con la finalità di testare e sperimentare sia materiali assorbitori di ossigeno e vapore d'acqua sia sostanze sigillanti per aumentarne il tempo di vita.

Questo studio sarà condotto adottando opportuni test di invecchiamento, anche accelerato, dei dispositivi, effettuati in condizioni di temperatura e umidità stabilite dagli standard europei in una apposita camera di test, disponibile nei laboratori ENEA. Si analizzerà l'impatto che i risultati raggiunti possono avere sulle prestazioni di prodotti futuri, sia in termini di maggiore quantità di luce estratta (accoppiamento ottico) sia in termini di durata nel tempo.

### **c.2 Progettazione eco-compatibile di un apparecchio a LED**

Saranno eseguiti studi per la progettazione di dispositivi di illuminazione, mirati a diminuire il consumo energetico e l'impatto ambientale in fase di produzione e a fine vita, con realizzazione di prototipi. In particolare sarà iniziato lo studio per arrivare a un apparecchio di illuminazione con LED e fosfori remoti per l'utilizzo in ambienti interni (ad es. scuole o uffici) con particolari caratteristiche di regolazione luminosa.

In parallelo saranno eseguiti studi per l'approfondimento delle conoscenze sul sistema visivo umano (inclusi aspetti circadiani) e della sua risposta agli stimoli spaziali e spettrali, alla ricerca di una misura dell'affidabilità di una sorgente di luce circa la sua capacità di rendere correttamente l'apparenza dei colori in una scena.

### **c.3 Progetto Lumiere: sviluppo di un tool per la qualità di gestione degli impianti illuminotecnici**

Il progetto Lumiere, nel contesto dei precedenti anni del programma di ricerca, ha sviluppato una metodologia operativa ed una serie di strumenti tecnico-procedurali di riferimento per promuovere l'efficientamento energetico degli impianti di pubblica illuminazione e l'acquisizione di una maggiore consapevolezza dei pubblici amministratori nella gestione del servizio. Nel presente obiettivo l'attività si concentrerà nello sviluppo di due elementi innovativi: lo sviluppo di un tool di simulazione per il supporto alla redazione del PRIC e lo sviluppo di un tool per il monitoraggio remoto e real time di indicatori di prestazione di un impianto avanzato. Il Progetto Lumière continuerà inoltre a sviluppare una serie di azioni finalizzate a sperimentare e favorire la più ampia diffusione fra operatori economici e istituzioni degli strumenti tecnico-procedurali, al fine di perfezionarli e confezionarli su misura delle effettive esigenze delle realtà applicative di riferimento.

Nel caso del supporto alla redazione del PRIC si tratta di creare uno strumento informatico che permetta al comune e agli operatori di avere una valutazione multi-obiettivo di energia consumata, costi associati e performance corretta (comfort e sicurezza). Più in dettaglio questo software consente di:

- acquisire conoscenza in merito allo stato e gestione degli impianti di pubblica illuminazione;

- favorire la comprensione teorica delle diverse variabili in gioco per delinearne percorsi ottimizzati alle reali esigenze e potenzialità del mercato;
- integrare le tecnologie smart (sviluppo di prodotti e servizi innovativi) nel settore specifico;
- valutare una pluralità di parametri economici ed ambientali .

Lo strumento per il monitoraggio remoto e real time di indicatori di prestazione, invece, si applica a valle della realizzazione dell'impianto; esso riceverà in ingresso le misure più significative provenienti dall'impianto e produrrà una serie di indicatori che tengano conto del comfort e della sicurezza dello stesso (misurato quantitativamente), della energia risparmiata e della efficienza energetica del sistema, della congruità del costo energetico e degli interventi di manutenzione; infine, un algoritmo multi-obiettivo provvederà a dare un giudizio globale della conduzione dell'impianto.

Lo sviluppo di un tale tool ha l'intento di costituire uno strumento di verifica delle prestazioni dell'impianto installato, di supporto e analisi di monitoraggio dei consumi energetici specifici, di valutazione delle esternalità sociali generate al fine di impostare policies e di diagnostica remota dell'impianto per evidenziare le inefficienze di conduzione, l' inadeguatezza del contratto di gestione e l'insorgenza di guasti o manomissioni

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico con le analisi di impatto dei risultati della ricerca sulle prestazioni dei prodotti futuri. Prototipo OLED incapsulato, realizzato su substrato di vetro, per dimostrare l'impatto su Efficienza e Risparmio Energetico degli studi proposti
- Rapporto tecnico su attività sperimentale e teorica. Pre-prototipo di dispositivo a LED con fosfori remoti
- Rapporto tecnico sulla metodologia per la qualità di gestione degli impianti

Principali collaborazioni: Università Federico II Napoli, Università di Milano, Politecnico Milano, Sapienza Università di Roma, INRIM, AIDI

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **d. Tecnologie per l'industria del freddo**

##### ***d.1 Realizzazione di un sensore elettronico dedicato al controllo dello stato di conservazione di alimenti freschi conservati in ambienti critici.***

L'attività punta, nel corso della durata triennale del progetto, allo sviluppo di un sistema di monitoraggio e regolazione delle condizioni di esercizio alle quali sono chiamati a far fronte gli impianti frigoriferi che consenta di ottimizzare il consumo energetico degli impianti frigoriferi e la qualità organolettica dell'ortofrutta conservata basandosi sulla determinazione di un indice di maturità dell'ortofrutta, monitorato da un opportuno array di sensori a stato solido, che invierà i dati ad un computer dotato di un software per l'analisi dei dati e semplici modelli sperimentali di previsione dell'evoluzione dell'indice di maturazione in funzione dei parametri ambientali nella cella frigorifero (temperatura, umidità). Il computer potrà quindi modificare in tempo reale l'impostazione della temperatura di funzionamento dell'impianto frigorifero in base alle condizioni ambientali effettivamente misurate ed al modello di previsione dell'evoluzione della maturazione. Obiettivo finale è quindi un prototipo di *naso elettronico*, che possa monitorare temperatura, umidità relativa e composti volatili organici emessi dall'ortofrutta per ricavarne un indice di maturazione e stato di salute della frutta conservata che consenta di migliorare l'efficienza energetica e mantenere le qualità organolettiche della frutta in cella frigorifera controllando in modo "intelligente" il sistema di refrigerazione a costi compatibili con l'esercizio delle attività commerciali.

L'attività relativa alla presente annualità si articolerà: nell'impiego in campagne di monitoraggio e misura di uno strumento scientifico commerciale, altamente specializzato, per individuare il numero minimo di sensori necessari ad ottenere un indice di maturazione dei prodotti soggetti alla conservazione; si procederà ad attrezzare il laboratorio ENEA con una cella frigo e gruppo refrigerante in grado di simulare in laboratorio lo stato di conservazione della frutta in condizioni ambientali critiche; si procederà allo sviluppo

di metodologie innovative per il controllo dell'atmosfera nelle celle frigo mirato alla riduzione dei consumi del gruppo refrigerante.

## ***d.2 Individuazione delle caratteristiche costruttive ottimali di strutture multistrato contenenti Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere.***

Tra le strategie attive impiegabili per il miglioramento delle caratteristiche di isolamento termico e degli spessori isolanti delle pareti dei magazzini frigoriferi sta riscuotendo un crescente interesse l'utilizzo dei cosiddetti materiali a cambiamento di fase (Phase Change Material, PCM).

Si tratta di materiali accumulatori di calore latente, che sfruttando il fenomeno della transizione di fase, assorbono i flussi energetici entranti, immagazzinando un'elevata quantità d'energia e soprattutto mantenendo costante la propria temperatura.

Tali materiali termoregolanti (detti anche accumulatori di calore intelligenti) rappresentano una soluzione tecnologica innovativa nella progettazione degli spessori isolanti delle pareti dei magazzini frigoriferi, perché sono un interessante sistema per smussare le fluttuazioni giornaliere della temperatura ambiente attraverso la riduzione dei picchi di temperatura interna; essi pertanto, risultano in grado di contribuire al contenimento dei consumi energetici necessari alla climatizzazione degli ambienti.

I PCM sono solitamente incapsulati in contenitori di forma cilindrica o rettangolare e possono essere in materiale plastico o metallico (nel secondo caso soprattutto alluminio e acciaio).

Va da sé che la stabilità strutturale e dimensionale del sistema PCM-contenitore è un fattore estremamente importante in applicazioni "stazionarie" come tipicamente lo sono quelle nel condizionamento in edilizia civile o industriale (magazzini frigoriferi), soprattutto in situazioni critiche (forte e variabile insolazione) che potrebbero portare alla deformazione/scollamento delle pareti isolanti con conseguente drastica riduzione della efficienza di immagazzinamento della energia radiante.

L'attività punta all'individuazione e alla caratterizzazione in condizioni simulanti l'esercizio di strutture multistrato presenti sul mercato contenenti tipologie diverse di PCM potenzialmente utilizzabili nella costruzione di pareti multistrato di celle frigorifere, al fine della definizione delle caratteristiche costruttive ottimali per la applicazione specifica.

Verranno eseguiti test di qualificazione strutturale anche mediante l'utilizzo di tecniche di indagine non distruttiva (NDT) e funzionale, di strutture multistrato sia presenti sul mercato che realizzate ad hoc, dopo averli sottoposti prove di sollecitazione dinamica e vibrazionale variando, tra gli altri parametri, la frequenza di vibrazione e la temperatura di esercizio.

Verranno testati:

- materiali macroincapsulati ovvero sistemi che prevedono l'inclusione del PCM in qualche forma come tubi, sfere, pannelli e altri recipienti che possono o fungere direttamente da scambiatori o essere a loro volta incorporati in altri elementi;
- materiali microincapsulati, ovvero sistemi in cui le particelle di PCM vengono racchiuse in un film polimerico fino e con elevato peso molecolare. Le particelle rivestite (con diametro minore di 1 mm) possono essere poi incorporate in una matrice compatibile con il film.

### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico contenente i risultati dell'attività di progettazione e sviluppo di un sistema elettronico di controllo dello stato di conservazione della merce fresca
- Rapporto tecnico contenente i risultati dell'attività di caratterizzazione di materiali per la realizzazione di celle frigorifere in ambienti critici.

Principali collaborazioni: Sapienza Università di Roma, Università Politecnica delle Marche

Durata: Ottobre 2012 - Settembre 2013

## ***Comunicazione e diffusione dei risultati***

L'efficacia reale del presente progetto è legata strettamente alla possibilità concreta che i risultati possano essere conosciuti, valutati ed applicati da parte di una serie di soggetti coinvolti a vario titolo nel processo di innovazione.

Per tale motivo, risultano necessarie azioni di diffusione e divulgazione del programma e dei relativi prodotti per far conoscere, ai diversi soggetti/attori interessati, quanto reso disponibile dal settore della ricerca e sperimentazione, fino a raggiungere l'utilizzatore finale del prodotto, capace di assicurare l'applicazione ed il reale soddisfacimento delle esigenze.

In particolare, si intende:

- garantire che gli strumenti ed i metodi, sviluppati nel triennio 2009-2011 e quelli in programma per il periodo 2012-2014, per il miglioramento di tecnologie ad alta efficienza energetica, vengano ampiamente diffusi e che siano facilmente accessibili ai potenziali beneficiari, favorendone il coinvolgimento anche attraverso l'utilizzo delle nuove tecnologie della comunicazione;
- accrescere il grado di conoscenza e sensibilizzazione del grande pubblico sul ruolo della ricerca e dell'innovazione tecnologica per il miglioramento dell'efficienza energetica nei diversi settori.

Si intende raggiungere tali obiettivi attraverso un'attività dedicata alla comunicazione ed alla diffusione dei risultati al fine di individuare, in maniera condivisa, azioni integrate e misure di accompagnamento relative alle linee di ricerca e di strutturare in maniera strategica il processo di trasferimento.

**PROGETTO C.1 “Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi”**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Reti di poligenerazione distribuita	8345	459	3	45	0	30	125	662
b	Gestione delle reti di edifici	5291	291	8	60	0	20	150	529
c	Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione	4000	220	40	35	35	19	135	484
d	Tecnologie per l'industria del freddo	4182	230	2	28	0	15	50	325
<b>TOTALE</b>		<b>21818</b>	<b>1200</b>	<b>53</b>	<b>168</b>	<b>35</b>	<b>84</b>	<b>460</b>	<b>2000</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie



<b>AREA</b>	<b>RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA</b>
<b>Tema di Ricerca</b>	<b>SVILUPPO DI MODELLI PER LA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI DI EFFICIENZA ENERGETICA SUL PATRIMONIO IMMOBILIARE PUBBLICO</b>
<b>Progetto C.2</b>	<b>SVILUPPO DI MODELLI PER LA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI DI EFFICIENZA ENERGETICA SUL PATRIMONIO IMMOBILIARE PUBBLICO</b>

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

Le attività consisteranno nello studio, sviluppo e valutazione di strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica degli edifici del settore residenziale e non residenziale, finalizzate al contenimento dei consumi energetici e nella riduzione dei gas serra, con riferimento agli edifici della Pubblica Amministrazione (PA). Le attività previste terranno in debito conto gli impegni assunti nel PAEE 2011 e gli adempimenti che le nuove Direttive UE impongono agli Stati Membri. Un aspetto molto importante è contenuto nella direttiva 27/2012/CE in cui viene data particolare attenzione agli edifici del settore pubblico, residenziali e non residenziali, per i quali si chiedono una serie di dati (caratterizzazione del parco immobiliare, consistenza della superficie utile, consumi energetici da bolletta ecc.) sui quali poter sviluppare misure e standard di intervento accompagnati da una diagnosi energetica e da una sensibilizzazione e formazione del personale tecnico delle PA. Da tener presente che, per gli edifici pubblici, tali livelli di prestazione saranno obbligatori dal 1° gennaio 2019 mentre lo saranno dal 1° gennaio 2021 per tutti gli edifici privati. Oltre a questo aspetto gli Stati Membri dovranno mettere in campo adeguate misure e provvedimenti per dare un forte impulso all'efficientamento energetico degli edifici del pubblico già dal 2014. Questo comporta, oltre che lo studio di particolari forme per il finanziamento degli interventi di efficientamento degli edifici, anche lo sviluppo di strumenti, per la valutazione degli indicatori di efficienza energetica, componenti, per migliorare le prestazioni dell'involucro e degli impianti, e servizi tecnologici integrati in grado, a parità e qualità di servizio reso, di offrire il risultato migliore tenendo presente il fattore costo/beneficio. Per la realizzazione degli interventi si dovranno predisporre una serie di attività che investiranno la parte tecnico-amministrativa (contrattualistica, bandi, ecc.) e quella per la conoscenza di strumenti e procedure, che le PA possono utilizzare, per l'accesso ai fondi messi a disposizione dalla UE.

In questo ambito una grande importanza è da attribuire allo sviluppo di strumenti e modelli applicativi semplificati per la diagnosi energetica, per la Certificazione energetica degli edifici, per il calcolo dell'indice di prestazione energetica (EP) in regime estivo e per la definizione di nuovi benchmark per le singole destinazioni d'uso, per l'accesso a finanziamenti europei e nazionali, per la sensibilizzazione dell'utenza sulla convenienza nell'applicazione di interventi per l'efficienza energetica e sull'applicazione di sistemi per la misura dell'efficacia degli interventi.

Lo svolgimento delle attività dovranno considerare le nuove indicazioni delle direttive europee che hanno definito con una attenzione molto specifica lo sviluppo di azioni a supporto degli edifici della Pubblica Amministrazione che, oltre a rivestire il ruolo di esempio di eccellenza per l'efficienza energetica dei propri edifici, dovranno dotarsi di strumenti e modelli per utilizzare le opportunità finanziarie messe a disposizione dalla UE e da quelli nazionali e per le strategie da mettere in atto in modo da favorire l'aggregazione della domanda. Saranno sviluppati schemi e strumenti per la definizione di misure, modelli di intervento e utilizzo di tecnologie innovative, anche con l'integrazione delle fonti rinnovabili, per ottenere edifici con alte prestazioni energetiche: "NEZB", con una attenzione mirata agli edifici esistenti delle PA per le diverse destinazioni d'uso. In questo ambito saranno sviluppate, anche, una serie di attività mirate, in un'ottica sistemica e che guarda alla economie di scala, per la messa a punto di tali modelli e schemi, applicabili dalla PA, per l'ingaggio sul territorio degli operatori privati, in particolare le ESCo (Energy Saving Company), per proporre la realizzazione di interventi utilizzando le risorse disponibili dal Fondo europeo (ELENA, JESSICA ecc.) o da altri analoghi e la definizione di procedure tecnico-amministrative per l'assegnazione degli appalti e degli strumenti finanziari più adeguati da adottare.

## **Situazione attuale del prodotto dell'attività**

La recente Direttiva 27/2012/CE rimarca il ruolo determinante energetica nel settore del civile, riprendendo molti dei criteri presenti nella direttiva 31/2010/CE che obbliga gli Stati Membri a dotarsi di standard e strumenti in grado di assicurare e accelerare l'attuazione dei programmi per l'efficienza e il risparmio energetico e raggiungere l'obiettivo del Nearly Energy Zero Building (NEZB).

In particolare viene richiesto di determinare, nell'ambito delle destinazioni d'uso residenziale e non residenziale, gli edifici di riferimento nuovi ed esistenti, la definizione di nuovi standard di prestazione energetica degli edifici, la definizione degli edifici NEZB, la metodologia comparativa, per la verifica dell'efficacia degli standard utilizzati, e altri criteri mirati al miglioramento dell'efficienza energetica con particolare attenzione agli edifici della Pubblica Amministrazione nuovi e, in modo più mirato, a quelli esistenti.

Il quadro è molto complesso e si dovranno attivare una serie di studi per superare la parcellizzazione dei possibili interventi, assicurarne la razionalità e la convenienza economica, e mettere a punto modelli applicabili per le PA. Per rendere efficaci e fattibili gli interventi individuati sarà indispensabile che si sviluppino modelli per agevolare e utilizzare da parte delle PA contratti di garanzia e ingaggiare operatori privati, in particolare le ESCo e istituti di credito congruenti con le Direttive Europee: 27/2012/CE e 31/2010/CE (Direttiva EPBD recast)<sup>2</sup>, e la 2005/32/CE (Direttiva EuP) per la creazione di un quadro sull'ecodesign delle apparecchiature utilizzanti energia.

In tale senso l'efficienza energetica, intesa nel suo più ampio senso di riduzione del consumo di energia a parità di servizio e di uso razionale dell'energia, è uno strumento funzionale alla costruzione di un quadro organico con un orizzonte di medio e lungo periodo; la sua doppia natura legata ai miglioramenti tecnologici ma anche a comportamenti consapevoli e responsabili verso gli usi energetici la rendono lo strumento più efficace dal punto di vista della praticabilità tecnica, finanziaria e socio-economica. In questo ambito riveste una innovazione il fatto che anche per gli edifici vincolati si dovrà intervenire per rendere più efficienti gli impianti e formulare proposte che prevedano l'integrazione con le fonti rinnovabili.

L'impegno particolarmente intenso necessario per raggiungere tali obiettivi, per gli edifici delle PA, richiede efficaci politiche energetiche che da un lato facilitino lo sviluppo di tecnologie, processi, prodotti e servizi a ridotto consumo di energia e, dall'altro nello stesso tempo permettano di orientare i comportamenti dei consumatori e/o utenti finali verso un uso razionale dell'energia.

## **Stato attuale delle tecnologie**

In Italia al momento non esiste una normativa definita che consenta il calcolo del fabbisogno energetico per il condizionamento estivo degli edifici, si dovrà sviluppare una serie di strumenti per definire gli standard prestazionali per il Nearly Energy Zero Building e si dovranno definire modelli, per l'efficienza energetica degli edifici delle PA, per favorire l'accesso a fondi europei e nazionali e per l'utilizzo delle ESCo.

Le direttive UE 27/2012 e 31/2010 richiedono che si sviluppino materiali, componenti e strumenti per la verifica del rendimento energetico degli edifici non solo per quanto riguarda i sistemi di riscaldamento e acqua calda sanitaria, ma anche i sistemi di condizionamento estivo e l'illuminazione.

Il decreto "Linee Guida Nazionali per la Certificazione energetica degli edifici" prevede una valutazione qualitativa dell'involucro per il fabbisogno estivo, l'obbligo di schermatura esterna per tutti gli edifici nuovi e per quelli da ristrutturare fino a 1000 m<sup>2</sup>, e il calcolo dell'indicatore energetico per l'illuminazione, per gli edifici del terziario; tuttavia mancano delle linee guida su come utilizzare detti schermi e sull'influenza che questi hanno sulla illuminazione naturale degli edifici e le procedure di calcolo da applicare per la determinazione dell'Indice di Prestazione energetica in regime estivo.

---

<sup>2</sup> Direttiva recepita in Italia con il Dlgs. 192/2005, successivamente modificato e integrato dal Dlgs. 311/2006 e dal DPR 59/2009.

## IL PROGETTO NEL TRIENNIO

### Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali

Nelle precedenti annualità dell'Accordo di Programma, le tematiche in esame erano comprese nei temi di ricerca "Sviluppo di linee guida e indici di riferimento per il legislatore" e "Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione".

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo di tecnologie e materiali innovativi (sistemi di controllo e regolazione, sistemi schermanti, materiali termo-cromici e a selettività spettrale), lo sviluppo di metodologie di diagnosi energetica e di metodologie di valutazione degli interventi di recupero energetico di edifici pubblici, di pregio architettonico e nelle aree archeologiche di proprietà pubblica. Sono state analizzate le possibili opzioni tecnologiche che consentono al settore edilizio di rispettare le disposizioni delle nuove direttive comunitarie in tema di efficienza energetica degli edifici che obbliga le nuove costruzioni, realizzate dopo il 2018 per il pubblico e dopo il 2020 per tutti gli edifici, ad essere ad "emissioni quasi zero".

In particolare le attività di ricerca svolte hanno riguardato:

- Analisi della normativa vigente in ambito nazionale ed europeo. E' stato realizzato uno studio sui provvedimenti legislativi e normativi, nazionale e dei Paesi della UE, collegati al settore dell'energia elettrica in ambito europeo e nazionale in modo da poterne valutare i punti deboli e le opportunità in grado di portare ad un miglioramento dell'efficienza lato produzione, trasporto, distribuzione e usi finali per inquadrare i continui sviluppi e aggiornamenti della materia.
- Analisi statistica sul parco edilizio residenziale e non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati per un'indagine su consistenza numerica, distribuzione territoriale e caratteristiche strutturali e impiantistiche di edifici del settore non residenziale.
- Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e definizione degli indici di benchmark mediante codici semplificati. E' stata definita una metodologia che consente di effettuare analisi energetiche negli edifici alla luce delle normative vigenti e determinarne le caratteristiche strutturali ed impiantistiche al fine di condurre una valutazione di fattibilità degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici, in funzione di diverse ipotesi di intervento. Lo studio finora condotto ha riguardato uffici, scuole e alberghi, edifici ad uso bancario e assicurativo e centri commerciali. Questa metodologia necessita di ulteriori sviluppi e applicazioni ad altre categorie del terziario per una sua validazione.
- Creazione di un database di sistemi e tecnologie di generazione distribuita. L'attività di ricerca svolta ha riguardato la creazione di un database di sistemi di microgenerazione, con l'indicazione degli indici di prestazione energetica e dei componenti del sistema di conversione energetica, con lo scopo di dare un supporto tecnico di riferimento a progettisti di impianti e funzionari pubblici.
- Aggiornamento Archivio Dati Climatici e Censimento Stazioni Meteo. E' stata sviluppata una metodologia di elaborazione dei dati climatici per l'aggiornamento della UNI 10349 ed è stata applicata a tutte le regioni e Province Autonome del territorio nazionale. Sono stati definiti i nuovi dati climatici. E' stata sviluppata una metodologia per il calcolo dell'Indice di Severità del Clima. L'attività sull'Indice di Severità Climatica (ISC) necessita di verifiche e sviluppo per la definizione dell'ISC per i Comuni italiani, attualmente è stato definito l'ISC per le sole Province, per cui si prevede la continuazione dell'attività nelle successive annualità. Tale attività consentirà la realizzazione di una zonizzazione del territorio nazionale ai fini della determinazione dei limiti di consumo ammissibili per la climatizzazione estiva.
- Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile. L'attività ha riguardato in particolare lo sviluppo di tecnologie, sistemi e componenti per il controllo, la gestione e la regolazione degli impianti di condizionamento, elettrici e illuminazione, ai fini di un'ottimizzazione dei consumi energetici in funzione dei carichi, dei profili di utenza e degli scambi energetici con la rete elettrica, attraverso l'applicazione di tecnologie e sistemi intelligenti (Smart Building) avanzati per il sistema integrato

edificio- impianto-clima-utente. E' stata svolta un'indagine in un grande complesso sportivo (Centro Onesti dell'Acqua Acetosa, Roma), per la definizione degli indici di consumo energetico, elettrico e termico, e di soluzioni tecnologiche da adottare per ridurre i consumi energetici anche con l'applicazione di sistemi di Energy Management System.

- Sviluppo e analisi di componenti trasparenti innovativi per l'involucro edilizio. Sono state eseguite caratterizzazioni dei componenti di involucro per il controllo solare e l'illuminazione naturale degli edifici, sia attraverso attività sperimentali e di calcolo sui materiali semitrasparenti di facciata, sia attraverso la valutazione dei benefici energetici derivanti dall'utilizzo di rivestimenti opachi a elevata riflessione solare. E' stato sviluppato il software WINSHELTER ((Window and shading energetic, luminous and thermal evaluation routines) che consente di calcolare le proprietà termiche, solari e luminose dei serramenti e dei sistemi di schermatura solare, secondo l'attuale quadro normativo di riferimento nazionale ed europeo
- Sviluppo ed assessment di cool material per l'efficienza energetica ed il controllo ambientale. È stato affrontato il tema dei materiali ad elevata riflessione solare come strumento per migliorare il comfort in ambienti esterni e confinati e, soprattutto, ridurre la domanda di energia elettrica negli edifici. È stato seguito lo sviluppo di nuovi materiali da utilizzare anche a scala urbana e di edificio, con focus sulla verifica del loro impatto sulla mitigazione dell'isola di calore.
- Efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica. È stato condotto uno studio di prefattibilità per interventi dimostrativi all'interno del Parco della Villa Reale di Monza finalizzati ad un miglioramento delle prestazioni energetiche e ad una più efficiente gestione dei sistemi edificio-impianto. Sono state prodotte 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 e sviluppate linee guida per gli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica e per la gestione efficiente del sistema edificio-impianto.

### **Obiettivo finale dell'attività**

L'obiettivo previsto per le attività di ricerca proposte è quello di dare un significativo contributo al raggiungimento degli obiettivi europei e nazionali sull'efficienza energetica degli edifici e definire valori di benchmark e standard prestazionali a supporto della normativa e delle politiche energetiche; la ricerca sarà sviluppata tenendo conto delle esigenze del mercato e degli utenti finali nel rispetto dell'ambiente e con un uso razionale dell'energia. Elementi per raggiungere questo obiettivo sono:

- Analisi, con applicazioni di tecnologie e sistemi di rilevamento e controllo, dei consumi energetici da bolletta e di sistemi innovativi di monitoraggio degli edifici del non residenziale, con particolare attenzione a quelli ad uso pubblico.
- Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva.
- Studio di edifici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio, applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani;
- Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile.
- Caratterizzazione dell'efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica.
- Sviluppo ed assessment di cool material per l'efficienza energetica ed il controllo ambientale a scala urbana e di edificio.
- Sviluppo di componenti innovativi per la riduzione dei carichi termici per l'edificio
- Studio e sviluppo di metodologie e strumenti per le valutazioni di interventi di efficienza energetica per gli edifici pubblici e privati finalizzati al NEZB.

- Sviluppo e promozione di strumenti software per la comunicazione e la sensibilizzazione presso l'utenza.

### ***Descrizione dell'attività a termine***

Le linee di attività proposte sono le seguenti:

#### Sviluppo di modelli e strumenti per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Sviluppo di un tool informatico per le diagnosi energetiche degli edifici (scuole e uffici); un codice informatico per il calcolo dinamico delle prestazioni energetiche degli edifici, secondo le linee guida comunitarie relative della Direttiva 31/2010/CE, tool informatico per il controllo e la verifica dei risultati raggiunti in termini di efficienza energetica dalle PA, caratterizzazione delle tipologie di impianto nelle scuole e negli uffici; sviluppo di modelli applicativi per le PA per il coinvolgimento di operatori privati per favorire l'aggregazione della domanda, generare economie di scala e utilizzare contratti per l'assegnazione degli appalti con riferimento all'Energy Performance Contract, un modello per accedere a finanziamenti europei, modelli e procedure per promuovere il coinvolgimento di operatori privati (ESCo).

#### Tecnologie per edifici ad energia quasi zero

Sviluppo sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool Material) per le coperture, le facciate degli edifici e le pavimentazioni di spazi esterni che limitino gli apporti solari e la richiesta di energia per il raffrescamento estivo. Sviluppo di attività di ricerca per l'implementazione di metodologie atte a valutare l'intensità dell'isola di calore urbana, l'impatto energetico a larga scala, nonché tecniche di previsione del fenomeno, anche al fine di minimizzare i rischi per l'approvvigionamento energetico dovuto ad un aumento, non previsto della domanda.

#### Revisione della Norma UNI 10349 alla luce dei nuovi parametri climatici nazionali e dell'anno tipo - Integrazione nella nova norma dell'ICS per la zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva

Proposta di revisione della norma UNI 10349 ai fini della determinazione dei limiti di consumo ammissibili per la climatizzazione invernale ed estiva per tutto il territorio nazionale. Tale attività risulta fondamentale per la corretta applicazione delle norme per la valutazione della certificazione energetica degli edifici.

#### Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologiche

Sviluppo di un database di sistemi di protezione solare innovativi; caratterizzazione sperimentale delle tecnologie innovative per una loro inclusione nei modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici; aggiornamento del software Winshelter, sviluppato durante le prime annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, al fine di includere i nuovi materiali nel motore di calcolo, specifiche tecniche per la realizzazione di celle prova per la valutazione delle prestazioni degli schermii di ombreggiamento , applicazione negli edifici di tecniche per le coperture e le facciate "verdi.

#### Piano integrato per l'informazione e la diffusione delle tecnologie verso i cittadini, le aziende e le pubbliche amministrazioni

Definizione, validazione e verifica di requisiti di ecodesign e di etichettatura energetica per gli apparecchi domestici, professionali e commerciali, in particolare nel settore refrigerazione, lavaggio, cottura, condizionamento e illuminazione. Definizione e pubblicazione di standard internazionali ed europei per questi prodotti. Ricerche di mercato e inchieste per l'analisi della situazione nazionale del parco installato dei prodotti e tool informatici per la sensibilizzazione dell'utente in merito agli interventi di efficienza energetica e all'ottimizzazione dell'utilizzo degli elettrodomestici per la riduzione dei consumi .

Ricerche di mercato, inchieste e tool informatici per la verifica delle misure in merito ad interventi di efficienza energetica e all'ottimizzazione dell'utilizzo degli elettrodomestici per la riduzione dei consumi promosse dalle PA.

Nel triennio 2012-2014 si prevede di realizzare due interventi dimostrativi di alta efficienza energetica in edifici della Pubblica Amministrazione anche con applicazione di fonti rinnovabili e di completare, a valere delle attività delle precedenti annualità, l'allestimento dell'edificio F51 per il sistema integrato di gestione degli impianti (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione ecc.), in modo, anche, di poterlo integrare con il sistema intelligente di gestione del Centro ENEA Casaccia. Gli interventi per il dimostratore si indirizzeranno su due destinazioni d'uso: un edificio scolastico e un edificio destinato ad uso uffici.

L'intervento dimostrativo sarà sviluppato in tre fasi, secondo lo sviluppo delle annualità previste del piano. In particolare nel primo anno saranno definite le procedure da seguire per redigere un bando di gara del tipo EPC, che preveda il coinvolgimento di una ESCo e terrà presente opportunità di utilizzare finanziamenti nazionali o europei, saranno svolte le diagnosi energetiche e definite le soluzioni di progetto per l'efficientamento del sistema edificio impianto; nella seconda annualità si redigerà il progetto definitivo per l'espletamento delle procedure di gara per la relativa aggiudicazione dei lavori e si prevede di dare inizio ai lavori; nella terza annualità sarà conclusa la realizzazione e verranno svolte le campagne di monitoraggio per la verifica dei risultati.

### ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

- ✓ Realizzazione di due interventi dimostrativi di riqualificazione energetica ad edificio Near Zero Energy Building; in particolare saranno oggetto della realizzazione un edificio ad uso scolastico e un edificio ad uso ufficio
- ✓ Realizzazione di una cella di prova per la valutazione e la caratterizzazione delle prestazioni di schermi di ombreggiamento
- ✓ Realizzazione di un dimostratore con applicazione di tecnologie e sistemi di facciate e coperture verdi con monitoraggi dei dati prestazionali e dei costi di manutenzione
- ✓ Realizzazione di nuovi format per la contrattualistica EPC che, basandosi sulle innovazioni tecnologiche avvenute nel campo dell'efficienza energetica, rispondano in modo adeguato alle esigenze normative che si sono venute via via formate in questo settore tecnico-amministrativo
- ✓ Realizzazione di modelli e di linee guida per il coinvolgimento degli operatori privati per promuovere l'utilizzo delle ESCo e l'accesso a fondi nazionali ed europei
- ✓ Caratterizzazione di edifici del terziario pubblico (Uffici, Scuole, Ospedali, Centri Sportivi, Social Housing, ecc.) e definizione di idonei parametri e standard energetico-prestazionali da applicare agli stessi, categorizzati in base alla destinazione d'uso, per il recepimento delle direttive della UE in tema di efficienza energetica
- ✓ Caratterizzazione energetico-prestazionale di materiali innovativi (Cool Material) per le coperture, le facciate degli edifici e le pavimentazioni esterne
- ✓ Protocolli per la sensibilizzazione e diffusione dei risultati e delle attività per il cittadino e realizzazione di percorsi di informazione e comunicazione sull'efficienza energetica.

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

Lo sviluppo delle tecnologie per l'efficienza energetica, l'uso di nuove tecnologie e la conoscenza di dati tipologici e dei consumi energetici degli edifici sono le principali azioni con le quali è possibile far fronte alla riduzione dei consumi termici e alla diminuzione della richiesta di energia elettrica nel settore civile.

Le attività di questo progetto costituiscono la base per l'applicazione di soluzioni tecnologiche e lo sviluppo di strumenti di governance atti a favorire il consenso verso tali strategie e la loro diffusione capillare. E' da evidenziare che, la disponibilità di poter accedere e utilizzare informazioni e soluzioni tecnologiche per l'efficienza energetica negli edifici, di nuova costruzione o da riqualificare, è un fattore di cui beneficia il sistema Paese, in generale, e l'utente finale, in particolare.



## PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ

### Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012

#### a. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Verrà sviluppata e definita una metodologia per la valutazione tecnico economica degli interventi atti ad implementare l'efficienza energetica rivolti ad edifici nuovi ed esistenti facendo riferimento alle linee guida della UE, così come indicato nella Direttiva recast 2010/31/CE. Tale metodologia dovrà essere adottata dai Paesi membri entro il 2013 e sarà uno strumento di riferimento per caratterizzare gli edifici NEZB. La metodologia sarà supportata da uno strumento informatico di calcolo per le valutazioni che dovranno essere prodotte per le tipologie edilizie residenziali e a quelle destinate ad uso uffici come richiesto dalla direttiva recast.

Particolare attenzione sarà posta all'integrazione delle fonti rinnovabili negli interventi di efficientamento energetico degli edifici. Il tema è molto sentito soprattutto per gli interventi rivolti al patrimonio edilizio esistente in cui è necessario sviluppare un'attività che metta in condizione gli operatori di poter valutare, tecnicamente ed economicamente, tali interventi.

Per rispondere a quanto previsto dalla Direttiva 2012/27/CE sarà svolta un'indagine mirata agli edifici ad uso uffici della Pubblica Amministrazione del Governo Centrale. Tale attività prevede un'analisi del parco immobiliare nazionale per caratterizzare gli immobili dal punto di vista del sistema edificio impianto e stimare la potenzialità di risparmio energetico tenendo conto del parametro costo /beneficio. Sulla base dei dati raccolti si procederà ad una valutazione per determinare gli edifici che presentano maggiori problemi dal punto di vista di efficienza energetica e individuare gli interventi da realizzare. Tale valutazione si rende necessaria in quanto nel 2014 si dovrà procedere all'efficientamento di edifici che rappresentino il 3% della superficie utile totale di questi edifici come previsto all'art.5 della direttiva 2012/27/CE. Per lo svolgimento di questa attività si dovranno mettere a punto delle procedure, linee guida ed un questionario di indagine, indirizzato ai responsabili di edificio, per facilitare il compito dei responsabili e accelerare i tempi di acquisizione. Da tale indagine saranno esclusi gli edifici del Ministero della Difesa e quelli definiti sensibili. Per motivi istituzionali si dovrà coinvolgere l'Agenzia del Demanio.

In tal senso saranno sviluppati strumenti e schede tecniche, a supporto delle PA, per le valutazioni necessarie.

L'attività risponde alle disposizioni introdotte con il Dlgs 115/08 in materia di monitoraggio dei consumi degli edifici ed a quanto è previsto si dovrà fare, dal punto di vista normativo tecnico, tecnico-amministrativo e finanziato, per il recepimento delle Direttive 2010/31/CE, 27/2012/CE ed al D.lgs. 28/11.

Saranno sviluppati: modelli di supporto alla programmazione e valutazione; un tool informatico per le diagnosi energetiche degli edifici (scuole e uffici); un sistema esperto informatico per le valutazioni dei consumi energetici degli edifici, facendo riferimento alla Direttiva 31/2010/CE e metodologie finalizzate all'ottimizzazione e alla valutazione degli interventi.

Saranno prodotti un rapporto tecnico per la caratterizzazione delle tipologie di impianto nelle scuole e negli uffici; una metodologia per la verifica dei risultati derivanti dai bilanci energetici territoriali e la definizione di strumenti per le valutazioni delle prestazioni energetiche degli edifici.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulla raccolta dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici
- Linee guida sull'efficienza energetica negli edifici in uso alle pubbliche Amministrazioni Centrali e periferiche dello Stato. e prime valutazioni sui potenziali di risparmio energetico
- Tool informatico semplificato per le diagnosi energetiche degli edifici pubblici (scuole e alberghi) e manuale di istruzioni

- Sviluppo di una metodologia per la valutazione della rispondenza degli standard energetici nazionali, da applicare agli edifici di riferimento, secondo le linee guida della metodologia comparativa promossa dalla 2012/31/CE
- Metodologia per i bilanci energetici territoriali e la pianificazione delle politiche energetiche: uno strumento per la verifica del raggiungimento degli obiettivi strategici nazionali e comunitari
- Definizione dei parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del rapporto costi /benefici, anche in riferimento alle attività svolte nel contesto IEA
- Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici, anche in riferimento alle attività svolte nel contesto IEA
- Definizione di un sistema esperto informatico per le valutazioni dei consumi energetici in relazione agli interventi di efficienza energetica

Principali collaborazioni: CRESME, Politecnico di Milano, Università di Pisa, Politecnico di Torino, CTI, Agenzia del Demanio

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **b. Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni**

Saranno promosse di concerto con le PA, attraverso i Tavoli 4E (Efficienza Energetica Edifici Esistenti) ENEA, azioni e modelli per la programmazione, il monitoraggio e la verifica delle misure promosse sui temi dell'efficienza energetica al fine di proporre e definire criteri armonizzati. Saranno sviluppati strumenti informatici semplificati a supporto delle PA per il calcolo dinamico delle prestazioni energetiche degli edifici, per il controllo dei consumi degli edifici della PA con le evidenze delle anomalie rispetto al benchmark di riferimento, e una serie di strumenti e modelli tecnico-amministrativi che riguardano i contratti con garanzia e la promozione dell'utilizzo di ESCo per gli interventi di efficientamento energetico degli edifici pubblici e modelli per facilitare l'accesso ai fondi europei.

Verranno approfonditi i seguenti temi: modelli di supporto alla programmazione e valutazione; linee guida e schemi per i contratti con garanzia di risultato e per l'accesso ai fondi europei.

Le attività prevedono l'individuazione di due edifici della PA su cui effettuare dei dimostratori. Nella prima annualità saranno svolte attività per la definizione degli edifici e la predisposizione di un layout di progetto di riqualificazione con attività per l'audit e predisposizione dei documenti necessari per l'espletamento di un bando per l'aggiudicazione dei lavori

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto sulle azioni e modelli di programmazione e valutazione per le misure adottate dalle PA in tema di efficienza energetica
- Guida operativa per il ricorso, da parte delle PA, del modello finanziario tramite terzi
- Linee guida per le stesure di contratti di garanzia per le PA
- Procedure e modelli da utilizzare per l'accesso e la fruizione a fondi europei, da parte delle PA per l'efficienza energetica. Rapporto su uno schema per la fruizione di accesso a fondi europei per l'efficienza energetica: Modelli applicativi per l'ingaggio sul territorio di operatori privati
- Lay-out di progetto di riqualificazione energetica di un edificio della PA

Principali collaborazioni: Politecnico di Milano, FIRE, CONSIP, Università di Padova, ANCI, UPI, FEDERCASA, Conferenza Stato Regioni - regione Piemonte, Cassa Depositi e Prestiti, Sapienza Università Roma

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **c. Proposta di revisione della Norma UNI 10349**

L'obiettivo riguarda la proposta di revisione della Norma UNI 10349 alla luce dei nuovi parametri climatici nazionali e dell'anno tipo, e l'integrazione nella nuova norma dell'Indice di severità del Clima (ICS) per la zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva.

A partire dalla metodologia di calcolo per la definizione dell'anno tipo, dall'aggiornamento dei dati climatici e dell'ICS, e relativa zonizzazione per Province messa a punto nelle precedenti annualità, verrà formulata



una proposta di revisione della nuova norma UNI 10349 ai fini della determinazione dei limiti di consumo ammissibili per la climatizzazione invernale ed estiva per tutto il territorio nazionale. Tale attività risulta fondamentale per la corretta applicazione delle norme per la valutazione della certificazione energetica degli edifici.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sulla proposta per la nuova norma UNI 10349 da trasmettere all'UNI per attivare la procedura di pubblicazione della nuova norma

Principali collaborazioni: Università Politecnica delle Marche

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**d. Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologico**

Come noto che il carico elettrico per la climatizzazione estiva sia strettamente legato agli apporti di energia interni ed al guadagno solare, più che alla differenza di temperatura tra interno ed esterno. Per questo motivo esiste una forte spinta all'utilizzo di schermature solari che, nel settore residenziale e, soprattutto, non residenziale, possono garantire elevati standard di risparmio energetico. Esistono numerosi studi e tecnologie in grado di dimostrare l'impatto sulle prestazioni termiche e luminose degli edifici di diverse tipologie di protezione solare. Poche informazioni e soprattutto pochi dati sono a disposizione di architetti e progettisti riguardo le nuove tecnologie che stanno con difficoltà lentamente emergendo. Si tratta di nuovi materiali e nuove strategie di controllo, finalizzati ad una sempre maggiore integrazione architettonica delle schermature solari, che sono spesso viste solo come corpi estranei alle facciate degli edifici sulle quali sono realizzate. Spesso si tratta di materiali tessili, ad elevato contenuto tecnologico, in grado di ottimizzare la qualità architettonica e la prestazione energetica dell'edificio, anche in condizioni costruttive non particolarmente agevoli.

La linea di attività prevede una serie di azioni mirate a focalizzare lo sviluppo e la caratterizzazione di questi materiali, affinché la tecnologia sia resa effettivamente fruibile ai settori del mercato delle costruzioni, interessati alla razionalizzazione degli usi finali di energia ed alla realizzazione di edifici confortevoli, a livello termico ed illuminotecnico.

Per la valutazione delle prestazioni energetiche degli schermi di ombreggiamento saranno definite le specifiche tecniche per la realizzazione di due celle prova nel C.R. Casaccia dell'ENEA.

Le attività includono: sviluppo di un database di sistemi di protezione solare innovativi; caratterizzazione sperimentale delle tecnologie innovative per una loro inclusione nei modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici; aggiornamento del software Winshelter, sviluppato durante le prime annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, al fine di includere i nuovi materiali nel motore di calcolo, specifiche tecniche per la realizzazione di celle prova per la valutazione delle prestazioni degli schermi di ombreggiamento. Tale attività è propedeutica alla definizione di standard prestazionali da inserire nel decreto di recepimento della Direttiva recast.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico per la definizione e la categorizzazione di sistemi di protezione solare innovativi e ad alto contenuto tecnologico. Requisiti di base per lo sviluppo e la prototipazione di schermature solari innovative
- Database con caratteristiche termofisiche di sistemi di protezione solare innovativi e ad alto contenuto tecnologico.
- Rapporto sulle specifiche tecniche per la realizzazione di celle prova per gli schermi ombreggianti.
- Nuova versione di Winshelter, con integrazione di nuovi prodotti e materiali per la protezione solare.

Principali collaborazioni: Politecnico di Milano

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **e. Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool material)**

Il costante aumento dei consumi energetici, prevalentemente elettrici, è legato alla domanda sempre crescente per la climatizzazione estiva a livello nazionale ed europeo. Il fenomeno è legato, tra gli altri, alla maggiore richiesta di comfort di una parte sempre più estesa della popolazione ed ai cambiamenti climatici, con un innalzamento generalizzato delle temperature. Tale aumento assume dimensioni preoccupanti all'interno dei grandi agglomerati urbani, con il fenomeno definito come isola di calore urbana. Con il termine di Cool Material sono indicati quei materiali in grado di innalzare la propria temperatura di pochi gradi sotto l'effetto della radiazione solare, grazie ad una elevata riflessione solare ed una elevata emittanza termica.

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. Infine l'utilizzo di materiali generalmente chiari consente di ridurre la potenza degli impianti di illuminazione esterna a parità di prestazione illuminotecnica e riveste quindi una notevole importanza per l'efficienza energetica negli usi finali, in particolar modo quelli elettrici, legati alla riduzione dei regimi termici durante la stagione estiva. Da considerare che l'applicazione di questa tipologia di materiali concorre, per quanto sopra detto, al raggiungimento degli obiettivi del Nearly Zero Building, vedi direttiva 31/2010/CE e del DLgs 28/2011.

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

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sui risultati delle attività di sviluppo e caratterizzazione dei cool material
- Guidelines e Best Practices sui VGS e GR per l'integrazione di coperture vegetali negli edifici pubblici al fine di contribuire all'aumento dell'efficienza energetica delle superfici costruite"

Principali collaborazioni: Politecnico di Milano, INRIM Università di Bari, Università di Palermo

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **f. Piano integrato per l'informazione e la diffusione delle tecnologie verso i cittadini, le aziende e le pubbliche amministrazioni**

Definizione, validazione e verifica di requisiti di ecodesign e di etichettatura energetica per gli apparecchi domestici, professionali e commerciali, in particolare nel settore della refrigerazione, del lavaggio, della cottura, del condizionamento e dell'illuminazione. Definizione e pubblicazione di standard internazionali ed europei per i prodotti citati. Ricerche di mercato e inchieste per l'analisi della situazione nazionale del parco installato dei prodotti e tool informatici per la sensibilizzazione dell'utente in merito agli interventi di efficienza energetica e all'ottimizzazione dell'utilizzo degli elettrodomestici per la riduzione dei consumi.

Al fine di produrre un'ampia pubblicità e diffusione dei risultati raggiunti dall'attività di ricerca, si prevede, per la prima annualità, la realizzazione di un Piano integrato di diffusione e disseminazione degli stessi. L'attività coprirà l'intero periodo di svolgimento delle attività della scheda e proseguirà anche al termine di questo attraverso il continuo dialogo tra i partner e i potenziali utilizzatori dei risultati finali.

Definizione e sperimentazione di tre moduli didattici i cui contenuti formativi siano collegati alle azioni dell'attività di ricerca "Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico".

### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sul Piano integrato di Comunicazione
- Rapporto tecnico sull'utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'efficienza energetica
- Specifiche tecniche per la realizzazione del Modello offline "Energy City Virtual Lab"
- Rapporto sul labelling degli elettrodomestici
- Tool informatico per l'uso efficiente degli elettrodomestici "Bianchi"
- Rapporto sulle attività di sensibilizzazione

Principali collaborazioni: Università Roma Sapienza

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

L'efficacia concreta delle attività del progetto è legata strettamente alla comunicazione e diffusione dei risultati in modo da poterli far conoscere, valutare ed applicare da parte di una serie di soggetti coinvolti a vario titolo nel processo di applicazione dei risultati raggiunti.

Per tale motivo, risultano necessarie azioni di diffusione e divulgazione delle attività e dei relativi prodotti per far conoscere, ai diversi soggetti/attori interessati, quanto reso disponibile dal settore della ricerca e sperimentazione, fino a raggiungere l'utilizzatore finale del prodotto, capace di assicurare l'applicazione ed una efficace risposta alla domanda.

In particolare, si intende:

- garantire che gli strumenti ed i metodi, sviluppati nel triennio 2009-2011 e quelli in programma per il periodo 2012-2014, favoriscano l'applicazione di procedure e tecnologie per l'efficienza energetica, vengano ampiamente diffusi e che siano facilmente accessibili ai potenziali beneficiari, utilizzando anche le nuove tecnologie della comunicazione;
- accrescere il grado di conoscenza e sensibilizzazione del grande pubblico sul ruolo della ricerca e dell'innovazione tecnologica per il miglioramento dell'efficienza energetica nei diversi settori.

Si intende raggiungere tali obiettivi attraverso attività dedicate alla comunicazione ed alla diffusione dei risultati, utilizzando le attività dei Tavoli 4E in cui sono coinvolti un grande numero di stakeholder (vedi il sito <http://www.energiaenergetica.enea.it/edilizia/tavoli-di-lavoro-4e/>) e quelle azioni integrate, relative alle linee di ricerca, strutturandole in maniera strategica il processo di trasferimento.

**PROGETTO C.2 “Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico”**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI* (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica	9636	530	20	90	50	10	305	1005
b	Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni	5091	280	0	10	50	10	60	410
c	Proposta revisione della Norma UNI 10349	2818	155	0	20	0	15	45	235
d	Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologico	6055	333	4	10	40	10	70	467
e	Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool material)	6036	332	8	20	50	10	40	460
f	Piano integrato per l'informazione e la diffusione delle tecnologie verso i cittadini, le aziende e le pubbliche amministrazioni	5145	283	2	30	40	18	50	423
<b>TOTALE</b>		<b>34781</b>	<b>1913</b>	<b>34</b>	<b>180</b>	<b>230</b>	<b>73</b>	<b>570</b>	<b>3000</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

La domanda di energia per il condizionamento estivo degli ambienti è aumentata considerevolmente negli ultimi anni ed il trend è ancora fortemente in crescita. I picchi di domanda di energia elettrica si verificano nei periodi estivi, in concomitanza con le necessità di condizionamento degli ambienti e, più in generale, di alimentazione della catena del freddo.

Il crescente aumento dei prezzi dell'energia da un lato, l'inquinamento e i cambiamenti climatici in atto sul fronte ambientale, avranno sempre più un forte impatto sull'ecosistema a livello mondiale.

Il consumo di fonti primarie, quali i combustibili fossili, gasolio e gas, per il riscaldamento e la climatizzazione, impongono una riflessione per la tutela e la preservazione dell'ambiente per le generazioni future, oltre che per i rilevanti costi connessi.

Senza rinunciare al comfort ed utilizzando in modo appropriato le fonti di energia rinnovabile disponibili, si ottengono quindi i risultati desiderati di risparmio, efficienza energetica e salvaguardia ambientale.

Le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento invernale ed 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 quanto garantiscono valori di COP (Coefficient Of Performance) ed EER (Energy Efficiency Ratio) molto limitati.

Negli ultimi anni diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico si sono focalizzate sullo studio di processi per il condizionamento degli edifici basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (solar heating and cooling) o comunque fonti di energia alternative.

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.

Il SET Plan della Commissione Europea individua tra i settori strategicamente più interessanti per il raggiungimento degli obiettivi di contenimento della spesa energetica da fonti fossili, quello relativo allo sviluppo delle tecnologie di solar heating & cooling soprattutto nei settori civile (caratterizzato da una sempre maggiore richiesta di energia per il condizionamento degli ambienti ad uso residenziale e terziario) ed industriale per la produzione di calore di processo a media temperatura.

Considerato che nel settore residenziale le tecnologie di solar heating & cooling abbinate anche ad interventi di retrofit energetico sugli edifici hanno già evidenziato la loro validità dal punto di vista energetico-ambientale, un settore nel quale risulta importante sperimentare l'efficacia di tali tecnologie innovative è quello dell'abbinamento dei sistemi solari a grossi impianti di refrigerazione ad assorbimento che già caratterizzano il settore terziario e commerciale per quanto riguarda la produzione di freddo per vari usi. Infatti, tali macchine che ricorrono al calore come fonte energetica di alimentazione, risultano particolarmente adatte ad essere impiegate nel caso in cui siano disponibili cascami di calore a basso costo (sistemi cogenerativi, calore di scarto da processi industriali) o fonti energetiche rinnovabili di tipo termico quali appunto le tecnologie solari a bassa e media temperatura.

L'evoluzione tecnologica ha permesso inoltre di sviluppare pompe di calore con efficienze doppie rispetto a quanto prodotto negli ultimi 10 anni, che si concretizzano in consumi di energia elettrica dimezzati. Oggi anche la pompa di calore è divenuta una tecnologia matura, che si evolve in soluzioni sempre più efficienti come l'utilizzo della tecnologia ad inverter. Lo sviluppo di pompe di calore in grado di garantire elevati COP

in funzionamento invernale ed elevati EER in funzionamento estivo consente un abbattimento dei costi di esercizio anche del 50% rispetto ad impianti tradizionali.

L'utilizzo della pompa di calore permette di soddisfare responsabilmente il comfort richiesto negli ambienti serviti in termini di riscaldamento, raffreddamento e produzione di acqua calda sanitaria. La pompa di calore preleva direttamente dall'ambiente circa il 75% dell'energia necessaria al comfort utilizzando solo il 25% dalla rete elettrica. Il basso consumo di energia elettrica garantisce una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> fino al 60% rispetto ai sistemi tradizionali basati sull'uso di combustibili fossili.

Le pompe di calore utilizzano direttamente l'energia fornita dal sole e accumulata nell'aria, nell'acqua e nel suolo, senza nessuna emissione diretta in atmosfera e nessun utilizzo di combustibile fossile. Il calore fornito dal sole è infatti una fonte pulita ed inesauribile, rendendo la pompa di calore una fonte rinnovabile, riconosciuta come tale dalla direttiva europea RES "Renewable Energy Source".

Contestualmente alla climatizzazione elio-assistita, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura rappresentano un settore che può contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità (CHP - Combined Heat Power) che consentirebbero quindi un uso più efficiente dell'energia. In quest'ambito, una delle soluzioni tecnologiche più promettenti da indagare e sviluppare è rappresentata dai sistemi integrati co- e tri-generativi di piccola taglia alimentati da fonti rinnovabili ed in particolare da energia solare, mediante collettori a concentrazione da abbinare ad esempio a micro-impianti a fluido organico (ORC) per la produzione congiunta di calore/freddo ed elettricità. La scelta della tecnologia solare a concentrazione più idonea per tale tipologia di applicazione, si baserà sul livello di temperatura di progetto dell'impianto per cui potranno essere presi in considerazione sia concentratori basati su ottiche "non-imaging" del tipo a CPC o su concentratori parabolici lineari o a lenti di Fresnel.

Il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, attuazione della direttiva europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, impone che nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e delle seguenti percentuali della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento:

- il 20 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- il 35 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1 gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- il 50 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1 gennaio 2017.

Gli unici generatori in grado di rispettare i dettami del DLgs sono le pompe di calore elettriche a compressione, le pompe di calore alimentate a gas (sia a compressione che ad assorbimento), le caldaie a biomassa e gli impianti di solar heating and cooling.

Non esiste una sola tecnologia che sia sempre la migliore in qualsiasi situazione: la località di installazione, la destinazione d'uso, il tipo di edificio, la superficie da servire ed il numero di ore annue di accensione degli impianti determinano la scelta tra le diverse tecnologie presenti sul mercato.

Per valutare e rendere più efficienti le diverse tecnologie emergenti sono state realizzate presso i Centri Ricerche ENEA di Casaccia e di Trisaia alcune facility di prova dei vari componenti d'impianto (es. pannelli solari termici, scambiatori di calore, sistemi di dissipazione passiva, etc.) ed alcuni impianti pilota di tipo sperimentale a servizio di utenze reali o simulate.

Il prodotto di queste attività di ricerca è quindi lo sviluppo di un ventaglio di soluzioni che tengono conto delle zone climatiche dove le stesse amplificano i vari punti di eccellenza di ciascuna tecnologia. L'energia elettrica, abbinata e non all'energia resa disponibile dal sole, può quindi essere un'ottima alternativa ai combustibili fossili che in alcuni casi possono del tutto essere sostituiti dall'accoppiamento di questi due tipi di energia.

## **Situazione attuale del prodotto dell'attività**

Attualmente in Italia sono stati installati pochi impianti di solar cooling che per lo più utilizzano tecnologie e componenti prodotti all'estero e non sono dotati di una logica di regolazione e controllo ottimizzata.

Gli impianti sperimentali realizzati, nell'ambito dell'Accordo di Programma, hanno permesso di constatare quanto questa tecnologia sia valida se vista nel complesso del suo utilizzo (estate e inverno): bisogna ancora sviluppare alcuni componenti specifici e ottimizzare al massimo il sistema di regolazione e controllo di questo tipo di impianti. Le potenzialità di ottimizzazione delle prestazioni ci sono e sono ben note: le principali indicazioni si stanno ottenendo proprio dagli impianti sperimentali che, durante il loro funzionamento costantemente monitorato, "suggeriscono" i punti chiave sui quali agire.

In questo panorama sono presenti alcune industrie italiane che, in collaborazione con Università ed Enti di ricerca, sono in grado di realizzare impianti dimostrativi utilizzando e/o sviluppando tecnologie innovative.

Sono invece largamente diffusi in Italia impianti di climatizzazione che utilizzano pompe di calore: la maggior parte delle macchine installate però non sono "di ultima generazione" e non utilizzano fluidi refrigeranti a basso impatto ambientale.

I refrigeranti attualmente utilizzati pur avendo un ODP (potenziale di distruzione dell'ozono) molto basso o addirittura nullo, hanno un GWP (potenziale di riscaldamento globale) molto elevato.

Ad esempio, per un gas con GWP100 pari a 1.500 si ha che 1 kg di questo gas introdotto in atmosfera, in 100 anni, causerà lo stesso effetto serra di 1.500 kg di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Si deduce facilmente che più basso è il valore GWP tanto minore sarà l'impatto del gas sull'effetto serra (per l'R410A il GWP100=1.700 e per l'R407C ed R134a il GWP100=1.500).

ENEA sta quindi sviluppando dei prototipi di pompe di calore che utilizzano come fluido refrigerante la CO<sub>2</sub> (R744) che ha un GWP100 = 1.

## **Stato attuale delle tecnologie**

### Solar heating and cooling

Il Solar heating and cooling comprende una famiglia di tecnologie che permettono il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici utilizzando in massima parte l'energia solare.

La tipologia di impianto principalmente utilizzata è quella basata sull'impiego di pannelli solari termici del tipo a tubi evacuati in grado di alimentare macchine frigorifere che, sfruttando cicli termodinamici chiusi con fluidi di idonee proprietà fisiche, utilizzano il calore per sostituire in gran parte il lavoro meccanico di un ciclo a compressione di vapore. Con gli stessi pannelli solari, durante il periodo invernale, è possibile produrre l'acqua calda necessaria per il riscaldamento degli ambienti. Una caldaia di integrazione è normalmente prevista per garantire il funzionamento dell'impianto in assenza di sole.

Gli impianti di solar cooling si differenziano in base al tipo della macchina ad assorbimento utilizzata:

#### a) Macchine ad Acqua-Bromuro di Litio a singolo effetto

Queste macchine, di produzione giapponese, americana ed ultimamente cinese, necessitano tipicamente di acqua calda ad 88 °C per il loro azionamento, producibile mediante pannelli solari a bassa concentrazione. Le prestazioni frigorifere (COP) di queste macchine sono normalmente pari a 0,7 rispetto al calore di alimentazione. Lo smaltimento del calore prodotto dal ciclo termodinamico avviene a temperature di 35 °C e pertanto per il loro funzionamento è indispensabile una torre evaporativa oppure un dry-cooler a circuito chiuso. Dal momento che utilizzano acqua come fluido refrigerante non possono essere generalmente impiegate come pompe di calore invernali, salvo rari casi.

#### b) Macchine ad Acqua-Bromuro di Litio a doppio effetto

Molto simili alle precedenti, di cui sono la versione ad alta efficienza, presentano COP frigoriferi molto elevati, pari a circa 1,1 ma necessitano di acqua calda o vapore a circa 160 °C, producibili soltanto con più costosi pannelli solari a media-alta concentrazione.

#### c) Macchine ad Acqua-Ammoniaca

Da poco prese in considerazione per il Solar Cooling, hanno un COP di circa 0,6-0,7 e richiedono temperature di funzionamento di circa 190 °C, ottenibili con gli stessi pannelli solari a concentrazione del caso precedente. I vantaggi aggiuntivi di queste macchine consistono nel poter funzionare *senza bisogno di torri evaporative*, e soprattutto nella *reversibilità* del funzionamento: la stessa macchina può funzionare anche per il riscaldamento invernale permettendo, in assenza di sole, un risparmio di combustibile pari a circa il 50% rispetto alle caldaie tradizionali ad alta efficienza.

Macchine di nuova concezione, non derivate da quelle alimentate a fiamma diretta, richiedono temperature di azionamento minori (~100 °C) a vantaggio dell'efficienza dei pannelli solari, ma necessitano dell'impiego di torri evaporative per lo smaltimento del calore.

#### d) Desiccant

Si tratta di apparecchi che essiccano l'aria (desiccant cooling), abbassandone quindi la temperatura di rugiada, per mezzo di sostanze igroscopiche (silica gel, cloruro di calcio) che vanno poi rigenerate mediante aria calda prodotta con pannelli solari. Appositi umidificatori e recuperatori di calore completano questo tipo di ciclo termodinamico di tipo aperto, dove cioè il fluido refrigerante (acqua) viene continuamente rinnovato, per ottenere il desiderato grado di benessere nel locale condizionato.

Anche in questo caso l'elevato costo dei componenti del sistema ne pregiudica la competitività attuale sul piano prettamente finanziario.

#### Heat Pipe

Gli heat pipe sono dispositivi ben noti per il trasporto di calore anche su distanze elevate (rispetto alla conduzione su solido), basate sulla evaporazione, circolazione e condensazione di un fluido contenuto in un ambiente chiuso e sigillato, di forma prevalentemente tubolare.

Gli heat pipe, abbinati a pannelli solari del tipo a tubi evacuati, consentono il raggiungimento di elevate temperature (prossime ai 110 °C) dell'acqua calda prodotta: questa peculiarità li rende abbinabili ad impianti di solar cooling. Gli heat pipe sono inoltre utilizzati in pannelli solari di tipo evacuato per la produzione di acqua calda sanitaria.

#### Pompa di calore per impianti geotermici a bassa entalpia

Queste applicazioni sono abbastanza diffuse in Europa del nord, proprio a causa delle condizioni invernali più rigide che non permettono un impiego soddisfacente delle pompe di calore aria-aria.

Il terreno è un cattivo conduttore di calore, per cui sono necessari molti m<sup>2</sup> di superficie di scambio per prelevare il calore richiesto. Lo scambio è fatto sia con scambiatori orizzontali, se è disponibile una grande superficie libera nelle vicinanze dell'edificio, oppure verticali, ottenuti trivellando il terreno con numerosi pozzi profondi da 80 a 160 m, in cui vengono posati tubi in polietilene che scambiano il calore, più un riempitivo (filler) che serve a garantire il contatto termico.

La pompa di calore, accoppiata agli scambiatori geotermici, può raggiungere un COP di circa 4 - 4,5 contro il 3 delle macchine ad aria in condizioni ottimali, grazie al fatto che la temperatura del terreno è costante e pari a circa 13-14 °C.

L'elevato costo delle sonde geotermiche condiziona la competitività attuale sul piano prettamente finanziario.

#### Macchine elioassistite

Queste applicazioni risalgono agli inizi degli anni '80; l'idea di base nasce dal fatto che con un collettore piano a basso costo non è difficile raggiungere una temperatura prossima a 20-35 °C anche in inverno. Nella sostanza, le sonde orizzontali o verticali di un impianto geotermico vengono sostituite da pannelli solari termici a basse performance (tubicini in pvc nero utilizzati per il riscaldamento estivo dell'acqua delle piscine). Con queste temperature all'evaporatore, una pompa di calore a compressione può raggiungere COP anche molto elevati, fino a 5, con un indubbio vantaggio energetico.



Il costo dei pannelli solari varia tra 50 e 400 €/m<sup>2</sup>, ed è quindi molto più basso del costo delle sonde geotermiche: il loro rendimento, a così basse temperature, è molto alto (60-65 %) ed è tale da permettere campi solari di dimensioni più contenute rispetto a quelli utilizzati nelle normali applicazioni.

Nel funzionamento estivo devono però essere previsti sistemi aggiuntivi di smaltimento del calore, quali torri evaporative od aerotermi, oppure possono essere utilizzati gli stessi pannelli solari se schermati opportunamente.

#### Pompe di calore a CO<sub>2</sub>

Queste pompe di calore utilizzano la CO<sub>2</sub> (R744), quindi un fluido naturale, come fluido refrigerante e sono in grado di produrre, sfruttando l'energia elettrica, acqua calda ad alta temperatura.

Le pompe di calore sono del tipo acqua-acqua, aria-aria ed aria-acqua e possono essere dedicate alla produzione di acqua calda sanitaria, al riscaldamento degli ambienti ed al raffrescamento degli stessi. Il tipo di refrigerante utilizzato consente il funzionamento della macchina anche a temperature esterne prossime a -25 °C ed il raggiungimento di temperature molto elevate dell'acqua calda prodotta (prossima a 100 °C).

La pompa di calore può raggiungere COP di circa 3-4: il rendimento può essere più elevato se si ricorre all'utilizzo di macchine polivalenti, che producono contemporaneamente acqua calda ed acqua refrigerata.

#### Serbatoi di accumulo a cambiamento di fase

L'aleatorietà nella disponibilità di energia solare, l'alternanza di giorno e notte e la variabilità dei carichi di impianto hanno sempre suggerito di prevedere in tutti gli impianti di solar heating and cooling almeno un accumulo. Di solito si è preferito l'accumulo dal lato freddo, per la maggiore facilità di interfacciarlo con il carico. In realtà è sempre risultato utile anche un accumulo caldo per garantire continuità di funzionamento alla macchina ad assorbimento. Questa è, soprattutto a causa dell'elevata capacità termica, particolarmente sensibile al funzionamento in ON-OFF. Inoltre una capacità di accumulo caldo consente di non dimensionare la macchina, elemento assai costoso dell'impianto, per le punte di disponibilità dell'energia solare, che possono essere adeguatamente smussate dall'accumulo.

Questi accumuli sono stati generalmente realizzati con acqua. Per ridurre le dimensioni di questi accumuli (ed anche le dispersioni termiche che si realizzano) appare quindi opportuno ricorrere a sistemi diversi ed in particolare a sostanze che operano in cambiamento di fase (tipicamente da liquido a solido e viceversa) che proprio per l'elevato calore di cambiamento di fase possono garantire grandi capacità di accumulo anche a fronte di volumi limitati. Attualmente sul mercato non sono disponibili questo tipo di componenti poiché risultano essere di difficile progettazione.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### ***Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali***

Le attività svolte nel precedente Piano triennale sono sintetizzate nel seguito:

- Pompa di calore ad assorbimento del tipo acqua-ammoniaca: allo scopo di sviluppare una nuova macchina adatta all'accoppiamento con pannelli solari a media temperatura, come i pannelli a tubi evacuati, è stata condotta una simulazione stazionaria su un certo numero di cicli termodinamici, al fine di trovare il miglior compromesso nell'utilizzo caldo-freddo. Il miglior risultato tra le varie simulazioni, è stato quindi usato per costruire un primo prototipo da 18 kW freddi, azionato mediante acqua calda a 100-120 °C che utilizza una torre evaporativa per lo smaltimento del calore. E' stata completata l'analisi sperimentale della macchina che, sia pure con alcuni limiti, è stata capace di funzionare sia come raffrescatore sia come pompa di calore, al fine di accorciare i tempi di ritorno dell'applicazione ed aumentare il risparmio di energia su base annuale, raggiungendo un COP di 0,62 in raffrescamento ed 1,5-1,7 per il riscaldamento;

- Heat pipe: sono stati analizzati i comportamenti di vari tipi di heat pipe, al variare del grado di riempimento, del grado di vuoto e del tipo di fluido utilizzato. E' stato analizzato il comportamento degli stessi anche al variare della geometria del collettore lato condensatore e della inclinazione di installazione;
- Impianto solar cooling Edificio F-51 presso CR ENEA Casaccia: l'impianto è stato realizzato a servizio di impianti interni all'edificio già esistenti (del tipo ad aria primaria e fancoil). E' stato effettuato il monitoraggio durante il periodo invernale ed estivo dell'impianto: i risultati ottenuti sono da ritenere buoni, considerando anche le ulteriori possibilità di aumento delle performance che si possono ottenere agendo sulla logica di regolazione e controllo attualmente in fase di ottimizzazione;
- Impianto solar heating and cooling Edificio F-92 presso CR ENEA Casaccia: l'impianto differisce da quello realizzato a servizio dell'edificio F-51 poiché è da considerare una realizzazione ex-novo sia dell'impianto stesso che dei circuiti terminali che servono i vari ambienti. L'edificio è infatti servito sia da pannelli radianti a pavimento (alimentati a circa 38 °C durante il periodo di funzionamento invernale ed a circa 14 °C in funzionamento estivo) che da fancoil a cassette (alimentati a 55 °C durante il periodo di funzionamento invernale ed a circa 7 °C in funzionamento estivo), in funzione delle effettive necessità dei vari ambienti. Con questo tipo di impianto si è ottimizzata la logica di regolazione che punta a garantire il comfort termoigrometrico nei vari ambienti minimizzando la necessità di combustibile fossile (gas metano) utilizzato dalla caldaia integrativa. L'impianto di solar heating e cooling ha sempre permesso durante il periodo di monitoraggio, sia invernale che estivo, il mantenimento delle condizioni di comfort termoigrometrico all'interno degli ambienti dell'edificio servito, dove le temperature interne sono state mantenute all'interno dei range stabiliti grazie alla logica di regolazione. È stato riscontrato un risparmio in termini di consumi di energia primaria di natura fossile grazie allo sfruttamento della radiazione solare: durante il funzionamento invernale il sole ha coperto il 56% dei consumi per il riscaldamento degli ambienti; nel funzionamento estivo c'è stata una copertura da fonte solare del 66% dell'energia termica richiesta dal gruppo frigo ad assorbimento. Gli stessi pannelli che in estate producono l'energia termica necessaria ad alimentare il gruppo frigo ad assorbimento dedicato alla climatizzazione estiva assicurano anche un'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 entrambe le stagioni;
- Impianto solar cooling per climatizzazione serra per culture intensive: l'impianto è stato realizzato a servizio della serra a contenimento del CR Casaccia di tipo sperimentale, per l'allevamento di piante GM e per lo svolgimento di attività di ricerca in condizioni ottimali e di biosicurezza di livello 2, realizzato per essere conforme alle normativa prevista in materia di sicurezza dall'Italia e dalla Unione Europea (direttiva 2001/18/CEE recepita con Decr. Leg.vo 224/2003). La serra a contenimento occupa una superficie complessiva di 210 m<sup>2</sup> circa: l'impianto realizzato è ad integrazione di un impianto esistente di taglia più grande e consente di valutare l'energia frigorifera di integrazione prodotta dall'impianto di solar cooling;
- Impianto con pompa di calore elioassistita: è stata avviata la facility di prova della pompa di calore elioassistita ed i risultati ottenuti sono stati davvero sorprendenti, oggetto di pubblicazioni e presentazioni in numerosi convegni del settore. Si sta validando il metodo di simulazione utilizzato per la progettazione preliminare e si sta sviluppando una logica di regolazione da implementare sul controllore presente a bordo macchina (in modo da svincolare l'utente dalla realizzazione di un impianto di regolazione ad hoc);
- Pompa di calore acqua-acqua a CO<sub>2</sub>: è stata realizzata una facility di prova di una macchina frigorifera acqua-acqua che utilizza come fluido refrigerante la CO<sub>2</sub> (R744). I risultati ottenuti, in termini di temperature massime raggiunte, confermano la possibilità di utilizzare queste macchine per il riscaldamento degli ambienti, per la produzione di acqua calda sanitaria e per la climatizzazione degli stessi. Il monitoraggio della macchina in funzionamento invernale ha confermato la possibilità di raggiungere COP pari a circa 3 che, durante la produzione contemporanea di acqua calda e refrigerata (macchina polivalente) può raggiungere anche valori complessivi prossimi a 4,0;

- Pompa di calore aria-aria a CO<sub>2</sub>: è stata realizzata una facility di prova di una macchina frigorifera aria-aria invertibile, dedicata alla climatizzazione di gallerie commerciali e grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide. La macchina è stata progettata e sviluppata in modo da consentirne il funzionamento secondo differenti configurazioni del circuito frigorifero: il monitoraggio del funzionamento della macchina consentirà di determinare la configurazione ottimale per i differenti tipi di impiego;
- Macchina frigorifera dedicata al settore alimentare: è stato realizzato un prototipo di macchina frigorifera caldo/freddo dedicata al settore alimentare, utilizzando un refrigerante a basso impatto ambientale (R744). Le attività di monitoraggio consentiranno di quantificare il risparmio energetico ottenibile con questo tipo di macchina e le emissioni di CO<sub>2</sub> in ambiente evitate;
- Accumulo a cambiamento di fase: è stato realizzato un modello in TRNSYS del sistema Edificio F92-Impianto e sono state simulate le differenti prestazioni energetiche ottenibili sostituendo gli attuali accumuli termici ad acqua con accumuli termici (caldo e freddo) di tipo sensibile. E' stato validato il modello in TRNSYS con i reali risultati di monitoraggio dell'impianto e quindi è stato progettato l'accumulo a cambiamento di fase;
- Sistema di smaltimento statico del calore: è stato realizzato un modello in TRNSYS di un sistema di smaltimento passivo del calore in eccesso prodotto dal campo solare a servizio dell'Edificio F-92. Attualmente il calore in eccesso viene smaltito mediante l'attivazione di un drycooler mosso da un ventilatore elettrico. Il sistema proposto è un dissipatore di calore per impianti solari ed è costituito da uno scambiatore di calore alettato da utilizzarsi per il trasferimento all'aria esterna del calore in eccesso prodotto da una stringa di collettori solari e da una valvola termostatica a due vie appositamente progettata e tarata a 95°C. Il sistema è di tipo passivo ed è progettato in modo da poter funzionare anche in assenza di energia elettrica ovvero anche in caso di blocco della pompa di circolazione del circuito primario dell'impianto solare. Al fine di una maggiore versatilità nel posizionamento dello scambiatore di calore, possono essere impiegati dei ventilatori solari direttamente alimentati da celle fotovoltaiche montate a bordo degli stessi. E' stato realizzato un prototipo del sistema descritto che sarà oggetto di analisi sperimentale;
- Geodatabase: è stato completato 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 geodatabase rappresenta un importante strumento di informazione condivisa, a supporto della diffusione della tecnologia delle pompe di calore geotermiche ed è liberamente consultabile via web;
- Laboratorio per la qualificazione di collettori solari a media temperatura: è stata realizzata, presso il Centro Ricerche ENEA di Trisaia, una piattaforma sperimentale per la caratterizzazione di collettori solari a media temperatura per applicazioni nel solar cooling e per la produzione di calore di processo ad uso industriale. Le prove su questi tipi di collettori hanno consentito l'analisi delle varie tecnologie a concentrazione e l'individuazione dei "punti critici" che ne condizionavano i rendimenti. Il laboratorio si è rivelato un ottimo strumento per la diagnosi energetica dei vari tipi di collettori che, una volta modificati, sono stati nuovamente sottoposti a qualifica riscontrando e quantificando i miglioramenti attesi. Si è inoltre partecipato ad organismi di normazione europea in ambito CEN per la definizione di norme specifiche sia per il settore dei sistemi solari a concentrazione sia per quello dei sistemi ibridi termo-fotovoltaici;
- Realizzazione di un circuito di test per accumuli solari: è stata realizzata una facility di test per l'analisi e la caratterizzazione energetica di accumuli termici ad acqua per applicazioni solari a bassa temperatura, mediante la quale è possibile determinare sperimentalmente i diversi parametri che caratterizzano il comportamento dinamico di un boiler solare;
- Realizzazione di un circuito di test per prove indoor su collettori solari: è stato realizzato un circuito di test con annesso sistema di generazione artificiale della radiazione solare (simulatore solare) per l'esecuzione di prove indoor su collettori solari che ha come obiettivo quello di dotare il laboratorio solare del CR ENEA Trisaia di una stazione sperimentale per l'esecuzione di test in condizioni controllate sia per quanto riguarda i parametri termo-fluidodinamici sia per la stabilità della radiazione solare. 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, aveva portato a notevoli complicazioni nella misura degli effetti prodotti dall'introduzione di modifiche nei materiali e nella struttura dei componenti sotto test;

- E' stata completata l'attività inerente i sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi. I primi risultati emersi durante lo sviluppo dell'attività hanno messo in evidenza le potenzialità notevoli di risparmio energetico (30% circa) basate su sistemi di automazione di basso costo (il concetto di "kit minimo di automazione" ma particolarmente efficace), ma con gestione avanzata della diagnostica e della climatizzazione;
- E' stato realizzato un portale web dedicato ai "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili", dove è possibile approfondire i vari temi ed analizzare le facility di prova che è possibile visitare presso il C.R. di Casaccia ed il C.R. di Trisaia;
- E' stata assicurata la partecipazione italiana ai gruppi di lavoro dell'International Energy Agency (IEA) - Solar Heating and Cooling e SolarPACES.

### **Obiettivo finale dell'attività**

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.

Lo scopo principale del progetto è quello di favorire una crescita nel ricorso alle tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede parallelamente lo sviluppo di:

- a. componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- b. 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.

### **Descrizione dell'attività a termine**

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

- la prima linea è quella dello sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO<sub>2</sub>, sistemi desiccant, pompe di calore geotermiche. A questo scopo si realizzeranno impianti prototipali, laboratori di qualificazione e si assicurerà 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 si svilupperanno: sistemi integrati pilota e dimostratori dove tali sistemi sono integrati nell'edificio; sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Le principali azioni di ricerca riguarderanno studi e ricerche sperimentali su:

- accumulo termico a cambiamento di fase;

- fluidi frigoriferi innovativi per pompe di calore a compressione;
- pompe di calore ad CO<sub>2</sub> (R744) invertibili del tipo aria-aria, dedicate alla climatizzazione di gallerie commerciali e grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide;
- impianti di solar heating and cooling a servizio di serre per culture intensive, di edifici residenziali e del terziario;
- sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici in grado di gestire il carico elettrico, termico e frigorifero prodotto in funzione delle reali esigenze dell'utenza.
- attività di sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura sia per la produzione di calore e/o freddo in processi industriali sia per la climatizzazione degli ambienti, non solo in ambito residenziale ma anche in ambito industriale, commerciale e terziario;
- attività di studio e ricerca sulla produzione combinata di calore, freddo ed elettricità in applicazioni co- e tri-generative di piccola taglia mediante l'utilizzo di mini e micro CSP abbinati a cicli a fluido organico (ORC), oppure mediante l'utilizzo di sistemi ibridi quali quelli del tipo Dish/Stirling o quelli basati su tecnologie termo-fotovoltaiche a concentrazione (CTPV);
- messa a punto della facility di test per prove indoor su collettori solari.

### ***Prodotti significativi previsti alla fine del triennio***

- ✓ Serbatoio di accumulo a cambiamento di fase ottimizzato per applicazioni di solar heating and cooling
- ✓ Determinazione di indicatori di costo relativi ai componenti di impianto e di sistemi a bassa temperatura abbinati ad impianti di solar heating and cooling e ad impianti a pompa di calore
- ✓ Caratterizzazione ottica e termo-fluidodinamica di prototipi di collettori solari termici a concentrazione
- ✓ Prototipi di componenti e sistemi solari termici a bassa temperatura da testare in ambiente controllato in vista del loro miglioramento tecnologico
- ✓ Prototipi di pompe di calore di piccola potenza utilizzate per la prova e la verifica prestazionale di differenti fluidi frigoriferi a basso impatto ambientale
- ✓ Sviluppo e ottimizzazione di prototipi di pompa di calore aria – aria (roof top) ad R744 per la climatizzazione di grossi ambienti di tipo commerciale e di pompa di calore aria – acqua ad R744 per la produzione di acqua calda sanitaria in abbinamento a serbatoi di accumulo ad alta stratificazione

### ***Coordinamento con attività di CNR e RSE***

Il Ministero dello Sviluppo Economico ha promosso la costituzione di gruppi di lavoro per il coordinamento delle attività relative alla Ricerca di Sistema Elettrico, affidate tramite Accordi di Programma ai soggetti ENEA, RSE SpA. e CNR. I gruppi di lavoro per il coordinamento hanno lo scopo di coordinare le attività comuni ed affini tra i vari soggetti affidatari con lo scopo di ottimizzare il lavoro ed evitare sovrapposizioni.

A tale scopo il MSE, accogliendo anche le indicazioni presentate dai comitati di sorveglianza degli Accordi di Programma, ha ritenuto opportuno disporre la costituzione di gruppi di lavoro che abbiano lo scopo di garantire quanto previsto nel Piano triennale, ovvero coordinare le attività comuni ed affini tra i vari soggetti affidatari, con lo scopo di evitare inutili sovrapposizioni

Le attività sulle quali ENEA, RSE e CNR stanno lavorando in sinergia sono di seguito elencate:

- definizione di procedure di prova comuni per componenti innovativi per un sistema integrato di solar cooling;

- monitoraggio delle prestazioni energetiche di impianti realizzati in diverse condizioni climatiche e con differenti soluzioni tecnologiche per individuare necessità di sviluppo tecnologico mirate a correggere i problemi di funzionamento in esercizio;
- attività comuni di disseminazione.

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

Le attività previste consentono lo sviluppo di componenti e soluzioni tecnologiche innovative dedicate alla climatizzazione assistita da solare. Queste attività consentiranno di individuare soluzioni non solo energeticamente efficienti, ma soprattutto economicamente convenienti, contribuendo ad una capillare diffusione di queste tecnologie in Italia, con evidenti benefici per la bolletta elettrica del sistema paese.

## ***PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ***

### ***Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012***

#### **a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi**

L'attività prevede la progettazione, realizzazione, messa in funzione e quindi l'analisi sperimentale del funzionamento 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 principali azioni sulle quali si concentrerà la sperimentazione.

- a.1 Integrazione di un accumulo termico del tipo a cambiamento di fase nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'edificio F92. Saranno acquisiti in questa nuova configurazione i dati sperimentali di funzionamento dell'impianto e sarà effettuata una comparazione energetica dei risultati sperimentali ottenuti con l'accumulo di tipo tradizionale (campagna sperimentale 2011/2012) e con l'accumulo a cambiamento di fase. Sarà inoltre valutato, dal punto di vista teorico e simulativo, l'utilizzo di chiller/pompa di calore elettrica come sistemi di back-up in luogo della caldaia a gas metano attualmente utilizzata. Poiché l'introduzione di tale tipo di accumulo dovrebbe azzerare l'energia dissipata durante il funzionamento invernale dell'impianto, non si procederà durante questa campagna sperimentale all'introduzione di sistemi passivi per lo smaltimento del calore prodotto in eccesso.
- a.2 Campagna di prove sperimentali di un impianto di solar heating and cooling a servizio di una serra per culture intensive. L'impianto è stato realizzato a servizio della serra a contenimento di tipo sperimentale presente all'interno del C.R. ENEA di Casaccia.
- a.3 Sviluppo di logiche di regolazione progettate ad hoc per impianti di solar heating and cooling e per impianti a pompa di calore a compressione. Le prestazioni di questi impianti sono fortemente legate alle logiche di regolazione ed alla gestione intelligente delle fonti di energia rinnovabili che non sempre sono disponibili durante l'intero arco della giornata e quindi dell'anno. L'obiettivo è sviluppare sia una "lista della spesa" delle apparecchiature minime necessarie in campo e sia degli schemi a blocchi semplici e chiari della logica di regolazione da adottare nei vari tipi d'impianto.
- a.4 Sviluppo di analisi di sensibilità per stabilire, ai fini dell'effettiva fattibilità economica, le soglie di costo iniziale dei vari componenti costituenti gli impianti sperimentali (solar heating and cooling, pompe di calore ad R744) e delle fonti energetiche tradizionali nonché le eventuali forme d'incentivo necessarie. Valutazione della convenienza economica delle pompe di calore ad R744 utilizzate in zone con clima temperato, anche in relazione alla stagione estiva, confrontandole con pompe di calore che utilizzano fluidi frigoriferi tradizionali.
- a.5 Partecipazione, quali rappresentanti italiani nell'ambito IEA, ai lavori dell'Implementing Agreement "Solar Heating and Cooling", in particolare alle Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration" (attività nell'ambito della WGB-Numerical Modelling Session),

Task 48 " Quality assurance and support measures for Solar Cooling" e Task 51 "Solar energy and urban planning", attualmente in fase di avvio. Inoltre a marzo, su indicazione dell'IEA, si svolgerà un incontro preparatorio per una nuova task IEA SHC denominata "New generation solar cooling systems" a cui parteciperemo attivamente. Saremo inoltre impegnati nell'organizzazione del 73rd IEA SHC ExCo Meeting che si terrà a Roma dal 12 al 15 giugno 2013.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sulla sperimentazione del serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase integrato nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'edificio F-92
- Rapporto tecnico sulla sperimentazione dell'impiego di un impianto di solar heating and cooling a servizio di una serra per culture intensive
- Rapporto tecnico sulle logiche di regolazione progettate ad hoc per impianti di solar heating and cooling e per impianti a pompa di calore a compressione
- Sviluppo di analisi di sensibilità economica ed inserimento dei risultati ottenuti nei rapporti tecnici delle diverse tecnologie prototipali (solar heating and cooling e PDC R744)
- Rapporto tecnico sulle attività svolte in ambito IEA, Implementing Agreement "Solar Heating and Cooling"

Principali collaborazioni: Università di Padova, Università di Napoli, Università della Calabria, Università di Palermo, Università del Sannio

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

**b. Collettori solari a concentrazione per applicazioni nei settori industriale, commerciale e terziario**

L'attività prevede l'analisi sperimentale e la qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura e la messa a punto della facility di test per prove indoor su collettori solari.

In quest'ambito le attività proposte riguardano:

- b.1 Attività di ricerca, sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura (quali la climatizzazione degli ambienti, la produzione di calore di processo, la produzione di freddo) in particolare nei settori industriale, commerciale e terziario. In quest'ambito verranno ulteriormente approfondite le problematiche di carattere ottico e termo-fluidodinamico allo scopo di ottimizzare i diversi componenti che sono stati analizzati e/o sviluppati nelle fasi progettuali precedenti.
- b.2 Elaborazione di studi per valutare le potenzialità di applicazione di sistemi co- e tri-generativi di piccola taglia che utilizzano mini e micro CSP abbinati a cicli a fluido organico (ORC), oppure di sistemi ibridi quali quelli del tipo Dish/Stirling o quelli basati su tecnologie termo-fotovoltaiche a concentrazione (CTPV).
- b.3 In continuità con le attività già avviate nella precedente annualità, verrà messa a punto la facility di test per prove indoor su collettori solari, implementando un sistema ("cielo artificiale") in grado di riprodurre lo scambio radiativo nell'infrarosso che avviene tra un collettore e la volta celeste nelle ore di insolazione. Successivamente verranno avviati una serie di test e sperimentazioni su varie tipologie di collettori solari per analizzare e verificare, in condizioni controllate, le performance energetiche in vista anche della validazione degli specifici modelli ottici e termo-fluidodinamici sviluppati nelle fasi progettuali precedenti.

Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico sulla sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura
- Rapporto tecnico sulle potenzialità della co-generazione e tri-generazione per via solare
- Rapporto tecnico sulle attività sperimentali condotte con la stazione di prova indoor su diverse tipologie di collettori solari

Principali collaborazioni: Università di Padova

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione**

- c.1 Realizzazione di una macchina frigorifera sperimentale di piccola potenza ( $P_f = 3,0$  kW) per la prova e la verifica prestazionale di differenti fluidi frigoriferi utilizzati nelle pompe di calore a compressione. Saranno quindi testati differenti fluidi frigoriferi a basso impatto ambientale di nuova generazione (quali l'HFO 1234yf e HFO 1234ze (E)) al fine di valutarne l'impatto ambientale complessivo legato all'utilizzo di questi refrigeranti. Saranno quindi valutati l'impatto ambientale dovuto alla produzione dei vari refrigeranti, le prestazioni energetiche in termini di COP/EER delle macchine che utilizzano i differenti refrigeranti e l'impatto ambientale dovuto a perdite accidentali/smaltimento dei differenti refrigeranti. La valutazione prestazionale sarà effettuata utilizzando la medesima macchina frigorifera sperimentale in modo da garantire un'elevata comparabilità dei risultati ottenuti.
- c.2 Campagna di prove sperimentali di un prototipo di pompa di calore ad CO<sub>2</sub> (R744) invertibile del tipo aria-aria, dedicato alla climatizzazione di gallerie commerciali e grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide. Il prototipo già realizzato ed installato a servizio dell'Edificio F-76 sarà costantemente monitorato al fine di acquisire i dati di funzionamento per poterne valutare le prestazioni durante il riscaldamento invernale degli ambienti (COP) e durante la climatizzazione degli stessi (EER).
- c.3 L'esperienza maturata nella precedente annualità in merito allo sviluppo di un prototipo di macchina frigorifera caldo/freddo dedicata al settore alimentare, utilizzando un refrigerante a basso impatto ambientale (R744), è servita per individuare i punti di forza di questa tecnologia. Dall'analisi dei primi dati di funzionamento del prototipo sono emerse chiaramente le alte performance della macchina durante la produzione di acqua calda ad uso sanitario, in funzionamento da pompa di calore. Le alte performance si ottengono in precise condizioni di funzionamento (temperatura acqua in ingresso macchina prossima a 15°C): lo scopo sarà quello di sviluppare un sistema di accumulo a forte stratificazione dell'acqua calda prodotta. Sarà quindi avviata una campagna di prove sperimentali.

#### Risultati/Deliverable:

- Realizzazione di una macchina frigorifera sperimentale per la prova di differenti fluidi refrigeranti e rapporto tecnico dedicato
- Rapporto tecnico sulla sperimentazione della pompa di calore a CO<sub>2</sub> (R744) invertibile del tipo aria-aria (ROOF-TOP)
- Rapporto tecnico sulla sperimentazione della pompa di calore ad R744, dedicata alla produzione di acqua calda sanitaria in funzionamento istantaneo, con accumulo ad alta stratificazione

Principali collaborazioni: Università di Napoli

Durata: ottobre 2012 – settembre 2013

### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

L'obiettivo prevede sia attività specifiche di comunicazione e diffusione dei risultati ottenuti nel progetto che il supporto ai Ministeri competenti attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali.

Per quanto riguarda la comunicazione e diffusione dei risultati, si prevede di:

- realizzare, con un linguaggio efficace dal punto di vista comunicativo, materiali informativi destinati ai vari target di riferimento, beneficiari finali delle attività (Enti Locali, Sistema delle Imprese, professionisti ecc.), nonché al grande pubblico e relativi a:
  - finalità complessive delle attività;
  - tematiche scelte come prioritarie e motivazioni di tali scelte;
  - obiettivi specifici, destinatari e modalità di conduzione delle ricerche sulle singole tematiche;
  - risultati conseguiti e ricadute sull'utente finale.



- elaborare e attuare un Piano di comunicazione e diffusione capillare di queste informazioni e, soprattutto, dei risultati conseguiti e delle ricadute sull'utente finale.
- lanciare con dei convegni mirati (es. Installatori qualificati, Progettisti, Università, ecc.) il sito internet dedicato ai "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili".

## PROGETTO C.3 “Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione”

### Obiettivi e relativi preventivi economici

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI * (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi	3036	167	18	70	0	11	100	366
b	Collettori solari a concentrazione per applicazioni nei settori industriale, commerciale e terziario	2691	148	4	10	0	2	30	194
c	Sviluppo e Sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione	2582	142	40	12	0	6	40	240
<b>TOTALE</b>		<b>8309</b>	<b>457</b>	<b>62</b>	<b>92</b>	<b>0</b>	<b>19</b>	<b>170</b>	<b>800</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie

## **IL QUADRO DI RIFERIMENTO**

### **Descrizione del prodotto dell'attività**

L'obiettivo di questo tema di ricerca si traduce in azioni mirate allo sviluppo di nuovi prodotti, hardware e software, che, nell'ambito della mobilità elettrica, possano essere utilizzati per migliorarne l'efficienza energetica complessiva e più in generale le interazioni con il sistema elettrico, integrandosi in modo competitivo nel contesto delle filiere e dei sistemi produttivi esistenti.

Com'è ben noto, i veicoli a trazione elettrica hanno consumi "dal pozzo alla ruota" inferiori a quelli dei veicoli con motore a combustione interna. Infatti, la conversione di energia primaria in una centrale termoelettrica ha un rendimento (46% quello medio italiano) molto maggiore del rendimento di conversione medio (dal 12% al 25% sul ciclo d'uso) dei motori a combustione interna automobilistici, anche di quelli ibridizzati. L'alta efficienza della rete di trasmissione e distribuzione (94%), delle batterie (max. 90%) e dei motori elettrici di ultima generazione (medio su ciclo: 85%) conservano poi tale vantaggio fino alla ruota. Si ricordi che per i veicoli convenzionali occorre mettere in conto anche il rendimento di produzione dei combustibili liquidi (e per il metano quello di compressione finale, a 200 bar), che riducono ancora di qualche punto, nell'analisi Well-to-wheel, il rendimento globale di utilizzo dell'energia primaria.

Nel campo delle macchine elettriche, le problematiche connesse al quasi monopolio da parte di alcuni Stati (Cina in primis) delle terre rare utilizzate per i magneti permanenti di alcune tipologie di motori, possono determinare un maggior utilizzo di tipologie a riluttanza, ad induzione e sincroni avvolti (o "miste", sincroni IPM), dove i rendimenti sono comunque già elevati ed ulteriori miglioramenti sono oggi ricercati soprattutto in termini di "fault tolerance" e riduzione dei costi di fabbricazione. Conseguentemente, i maggiori risparmi di energia ottenibili per i veicoli elettrici a batteria (e per gli ibridi "plug-in") potranno derivare dal miglioramento dei rendimenti in fase di ricarica (anche durante la frenata rigenerativa), intervenendo sull'elettronica di potenza.

Specialmente nel caso della ricarica rapida, utile soprattutto in virtù dei benefici ottenibili in termini di riduzione della "quantità" di batteria necessaria, o di quella "contactless" (meno efficiente, ma proposta sempre più spesso) l'efficienza di conversione dell'energia elettrica può senz'altro essere migliorata, trattandosi di tecnologie ancora in piena evoluzione.

Lo sviluppo delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici su gomma offre anche positive possibilità di interazione verso la rete elettrica. Ad esempio, con riferimento agli ambiti applicativi "smart grid" e "smart cities", l'impiego di stazioni di ricarica (e/o degli accumuli elettrici dei veicoli in sosta), può essere utilmente associato alla generazione distribuita, in quanto l'accumulo elettrico distribuito ha tempi di reazione estremamente brevi. Il prodotto dell'attività triennale sarà quindi un insieme di prodotti (stazione di ricarica rapida in c.c., sistema di ricarica "contactless", programmi di simulazione della domanda di mobilità elettrica etc) e risultati sperimentali di grande utilità per lo sviluppo del settore della elettromobilità.

Ulteriori risparmi sono infine correlati all'integrazione di nuovi materiali, architetture e processi produttivi per l'alleggerimento strutturale nei vettori collettivi di tipo ferroviario, tramviario ed affini, in quanto questo settore è meno dinamico rispetto al settore automotive dove la maggiore concorrenza e le stringenti normative antinquinamento hanno già portato all'introduzione di nuovi materiali e tecnologie anche grazie all'aiuto dei grandi numeri ed alla maggiore automazione di processo possibile in tale settore. Il collegamento diretto alla rete elettrica induce infatti nella visione collettiva a considerare meno prioritario l'alleggerimento dei grandi vettori per il trasporto su rotaia in quanto apparentemente puliti

(non inquinanti), tuttavia la riduzione di peso di questi grandi vettori si traduce immediatamente in una riduzione di energia dalla rete, con conseguenti positive ricadute economiche e sociali.

Le linee di ricerca che saranno sviluppate sono quindi rivolte a studi ed applicazioni relative al settore dei nuovi materiali e dei componenti innovativi per il risparmio energetico nel settore dei trasporti:

- una prima linea di ricerca è rivolta allo sviluppo di sistemi e componenti innovativi per l'incremento dell'efficienza elettrica delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici stradali collegate alla rete elettrica, con un particolare accento sui sistemi di ricarica rapida;
- la seconda linea di ricerca è dell'ottimizzazione delle interazioni tra veicoli elettrici (merci e passeggeri, TPL e trasporto privato) e reti di distribuzioni dell'energia ("Vehicle-To-Grid") con particolare riguardo alla domanda di energia (analisi dell'uso del mezzo elettrico);
- la terza linea di ricerca è dedicata allo sviluppo di metodologie di progettazione, realizzazione ed assemblaggio di materiali e strutture leggere e riciclabili, per alleggerire i componenti strutturali di metropolitane e treni (sia il *Body in white* sia componenti dello chassis dei vettori per il trasporto) e per migliorare, al tempo stesso, le caratteristiche inerenti la protezione dei passeggeri in caso di incidente.

### **Situazione attuale del prodotto dell'attività**

Nello sviluppo di sistemi e componenti innovativi per le strutture di alimentazione dei veicoli elettrici stradali collegate alla rete elettrica, un particolare accento si pone oggi su i sistemi di ricarica "di elevata potenza" distribuiti sul territorio. Se si punta a un uso esteso e non solo cittadino dei veicoli elettrici, è infatti necessario prevedere delle stazioni di rifornimento distribuite sul territorio, nelle quali l'utente possa caricare la batteria del veicolo in tempi contenuti.

Due dei sei progetti pilota recentemente finanziati dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas prevedono proprio la ricarica rapida in corrente continua (50 kW e oltre) che dovrebbero consentire di fare il "pieno" in pochi minuti. Si tratta dei progetti di Enel Energia e di Class Onlus. Il primo punta a predisporre 26 punti di ricarica a Roma e in provincia di Milano entro il secondo semestre del 2013. Il secondo ha un piano che prevede l'installazione di 150 colonnine, delle quali 43 in provincia di Monza e Brianza e 107 presso supermercati di Roma, Milano, Napoli, Bari, Catania, Genova, Bologna e Varese.

Si osservi che la ricarica rapida in c.c. non ha un quadro normativo in fase di definizione, a differenza dello standard nella ricarica in alternata dove da poco è stata presentata unacolonnina AC a 43 kW (sviluppata da Enel Distribuzione). In quest'ultimo caso (ricarica rapida in c.a.) bisogna naturalmente disporre di un caricabatteria di bordo di potenza equivalente, ed attualmente l'offerta sul mercato è limitata ad alcuni modelli di autovetture, (Leaf e E-Smart) mentre non è venduto in Italia un veicolo medio (furgone o pulmino) con tali caratteristiche.

In alternativa si ipotizza direttamente il cambio del pacco batterie dell'autoveicolo, ad esempio la Renault propone un sistema automatizzato del cambio del pacco batterie, chiamato QuickDrop®, che permette di effettuare l'operazione in circa tre minuti e che sarà utilizzato sui veicoli elettrici di prossima commercializzazione. Questo sistema presenta alcuni aspetti critici. In particolare, necessita di una standardizzazione molto spinta del pacco batterie, sia dal punto di vista delle dimensioni sia per quanto riguarda la tensione nominale e la capacità.

Gli sviluppi tecnologici delle batterie, in termini di capacità di accettazione di correnti elevate, non sono bilanciati al momento da altrettante applicazioni, sostanzialmente per motivi strutturali. L'intermodalità tra trasporto pubblico, possibilmente elettrico, e trasporto individuale a basso impatto ambientale richiede infatti interventi sulla struttura del trasporto urbano, con parcheggi di scambio attrezzati con colonnine per le stazioni di servizio con ricarica rapida per veicoli elettrici ed ibridi plug-in.

Gli attori del processo di diffusione della mobilità elettrica sono quindi sostanzialmente:

- Le grandi Aziende di Trasporto, passeggeri e merci, che devono investire in innovazione tecnologica e logistica in vista di ritorni in termini di immagine e risparmi sui costi operativi

- i costruttori di veicoli elettrici che offrono la tecnologia e intravedono la possibilità di un nuovo mercato le cui diverse posizioni ed esigenze vanno attentamente contemplate.
- le utility elettriche a cui è richiesto di predisporre le infrastrutture;
- gli enti di Ricerca, che esplorano e anticipano soluzioni tecniche e metodi gestionali;
- l'Autorità regolatoria cui spetta di stabilire da chi e in che modo tali infrastrutture verranno finanziate e gestite.

Grazie alle attività svolte nell'ambito delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, l'ENEA, che già disponeva del più grande e meglio attrezzato Laboratorio Prova Batterie nel nostro Paese, ha potuto svolgere specifiche attività di sperimentazione della ricarica rapida per le batterie Li-ione.

A queste attività, oggi ricomprese nell'ambito del Progetto A.4 relativo al tema dell'accumulo elettrico, si è aggiunta nel corso dell'ultimo anno una specifica attività di ricerca sulle strutture di alimentazione, svolta insieme con le Università di Padova e dell'Aquila. Tale attività è dedicata allo studio comparativo della ricarica rapida nelle due modalità (caricabatteria a bordo/caricabatteria a terra) per un veicolo di taglia media per uso urbano, utilizzabile tanto per il trasporto merci che per quello passeggeri (Fiat Ducato). L'Università di Padova ha avuto in carico lo studio del caricabatteria veicolare, quella quello del caricabatteria stazionario.

Nella scia ed a completamento delle attività precedentemente svolte, nell'ambito del piano triennale si vuole approfondire quanto emerso dalla discussione in corso tra gli aventi titolo sopra indicati, avviando uno studio teorico-sperimentale delle interazioni tra i sistemi elettrico e della elettromobilità durante e per effetto della ricarica del sistema di accumulo elettrico di bordo.

La terza linea di ricerca, che è stata mantenuta quest'anno a completamento delle attività già avviate è relativa alla riduzione del peso, che è certamente il metodo più diretto per ridurre il consumo di energia dei mezzi elettrici. L'effetto è più che proporzionale, grazie alla riduzione del peso della batteria necessaria per l'autonomia richiesta, e conseguentemente si riducono sostanzialmente le emissioni dei mezzi di trasporto. Si stima che una riduzione del 10% di peso porti ad una riduzione di carburante di circa il 7% e questo comporta che per ogni kg di peso risparmiato si riduca di circa 20 kg l'emissione annua di CO<sub>2</sub> nei mezzi di trasporto con motore a combustione. Questo legame, ben noto ai costruttori di automobili, ha portato in questi anni alla sostituzione, dove possibile in termini tecnici ed economici, dei componenti in acciaio in componenti in alluminio, magnesio, compositi e schiume. Si registra un sostanziale incremento continuo dell'impiego di materiali leggeri nel settore dei trasporti a partire dalle 42,8 M del 2006 fino alle 68,5 Mt del 2011 con un aumento di circa il 10% annuo.

L'applicazione di nuovi tipi di materiali necessita di una riprogettazione dei componenti e lo sviluppo delle necessarie tecnologie per il loro impiego in modo economico e sicuro, considerando anche le problematiche di riciclabilità a fine vita dei materiali utilizzati.

I materiali più utilizzati in termini di peso sono gli acciai ad elevata resistenza seguiti dalle leghe di alluminio e dai materiali plastici. L'industria Automotive è il principale end-user dei materiali leggeri, seguita in termini di peso dalla cantieristica navale e dal settore aeronautico. Le ben note caratteristiche meccaniche (resistenza e rigidità) e le relative tecnologie di formatura e saldatura degli acciai conserveranno la leadership nella realizzazione del Body in White (BiW), che incide per il 20% sul peso complessivo delle automobili mentre maggiori applicazioni di materiali leggeri sono previste per componenti di carrozzeria dello chassis e dei motori.

Considerato che alluminio, magnesio o schiume metalliche hanno un costo di base certamente superiore al tradizionale componente in acciaio, è necessario sfruttare in modo ottimale questi nuovi materiali con lo sviluppo delle tecnologie di formatura e giunzione in grado di ridurre i costi di produzione in modo da compensare i maggiori costi delle materie prime.

Nel settore ferroviario, l'applicazione delle leghe di alluminio risale agli anni 70 e, nella successiva decade, lo sviluppo delle tecniche di estrusione di forme complesse di elevata dimensione a spessore sottile ha portato alla realizzazione di numerosi treni in varie leghe di alluminio (AA6005 T6, AA6082 T6). Alcuni esempi riguardano le carrozze del TGV, le carrozze della CircumVesuviana, di Napoli e le carrozze di treni

modulari spagnoli. Uno dei limiti delle leghe di alluminio rispetto all'acciaio riguarda la minore capacità di assorbimento di energia che impone lo sviluppo di architetture specifiche. La Bombardie sta valutando l'impiego di pannelli sandwich in schiuma di alluminio con legame completamente metallurgico che promettono di accoppiare le ottime doti di leggerezza ad un notevole assorbimento di energia rispetto alle classiche strutture in alluminio garantendo al contempo stabilità termica. Inoltre, nuove architetture e nuovi processi di giunzione per i grandi profilati estrusi necessitano di continui sviluppi per permettere l'interazione di questi nuovi materiali.

La riduzione di peso degli innumerevoli quadri elettrici presenti nei convogli e per i componenti di carrozzeria può inoltre essere perseguita sostituendo, ove possibile, i componenti in alluminio con componenti in magnesio, la cui densità è di  $1,8 \text{ g/cm}^3$  con proprietà meccaniche comparabili, ed in alcuni casi superiori, alle comuni leghe di alluminio che hanno densità di  $2,7 \text{ g/cm}^3$ .

Per quanto riguarda i materiali metallici cellulari, l'attività in Europa e nel mondo sulle schiume metalliche è 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.

Le tecnologie per la produzione di schiume metalliche ad Aluminum Foam Sandwich (AFS) per impiego strutturale sono basati principalmente sulla tecnologia della Metallurgia delle Polveri (MP). Dal punto di vista commerciale il gruppo Ecka Gralules con Alulight e con il gruppo per la commercializzazione Pohltec Metalfoam GmbH ha attualmente in mano il mercato e i principali laboratori di ricerca nell'ambito della produzione di materiali metallici cellulari ed AFS strutturali prodotti mediante metallurgia delle polveri (MP). Questi materiali hanno ancora un costo piuttosto elevato (30 €/kg) e quindi tali da renderli utilizzabili esclusivamente per automobili di alta fascia ed allo stato attuale principalmente come elementi front end ed in generale per l'assorbimento degli urti.

Tuttavia, i primi studi effettuati per un impiego su larga scala di questo tipo di materiali anche per grandi vettori per il trasporto collettivo, promettono una riduzione complessiva dei costi di produzione non tanto dei materiali in se, quanto dei componenti (eliminazione di una serie di costi di assemblaggio). Esistono alcuni studi per la realizzazione di *body in white* di autoveicoli dedicati principalmente a *concept* di auto sportive con dimostratori prototipali che evidenziano come, associato ad un riduzione del peso, vengano notevolmente migliorate le proprietà di *crashworthiness*.

Grazie alle attività svolte nell'ambito delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, ENEA ha allestito un laboratorio pilota dedicato alla realizzazione di componenti in schiume metalliche, costituito da un gruppo di compattazione/estrazione in fase di realizzazione, che consentirà la compattazione anche a caldo di cilindri di precursore fino a 50 mm di diametro ed estrusione di barrette circolari di diametro 20 mm che potranno essere utilizzati per lo sviluppo e la successiva caratterizzazione di componenti. La schiumatura di componenti con dimensioni fino a 400 x 400 x 200 mm potrà essere effettuata nello specifico forno di schiumatura che mediante l'utilizzo dei sensori laser e chimici di cui è dotato permette di studiare e controllare il processo di schiumatura.

A queste nuove facilities vanno affiancate le competenze pregresse di l'ENEA che, assieme ai consorzi partecipati (CALEF e PROCOM), ha maturato in termini di caratterizzazione ed applicazione di AFS sviluppate nell'ambito di diversi progetti di ricerca MAVET e SINAVE e delle attività svolte nell'ambito dei precedenti PAR, che hanno visto la progettazione di prototipi. Ha inoltre sviluppato processi di saldatura di benchmark al fascio elettronico ed ha testato la saldatura laser come alternativa maggiormente industrializzabile su pannelli AFS commerciali, che hanno evidenziato alcuni limiti qualitativi per impieghi strutturali, mentre certamente garantiscono un miglioramento delle caratteristiche di *crashworthiness*. Questo comporta l'opportunità di proseguire gli studi per la caratterizzazione e la qualificazione per questa nuova classe di materiali per l'impiego strutturale e l'approfondimento degli studi relativi alle possibili soluzioni per il miglioramento delle proprietà meccaniche.

## Stato attuale delle tecnologie

Le scelte principali per la ricarica dei veicoli elettrici sono sostanzialmente due, come fare e dove farlo. Il primo aspetto riguarda la durata della ricarica ed il tipo di conversione, direttamente AC/DC oppure in due stadi, DC/DC con precedente conversione AC/DC. Il secondo aspetto riguarda la collocazione del convertitore, ovvero se è a bordo del veicolo oppure a terra, all'interno della colonnina di carica.

Per una ricarica notturna o comunque lenta, il convertitore AC/DC è a bordo del veicolo ed è alimentato alla tensione di rete (monofase), la potenza che deve gestire è limitata a qualche kW e pertanto il peso e l'ingombro sono contenuti.

Per la carica rapida (1 ora) o ultrarapida (< 1 ora), è invece necessario un convertitore controllato AC/DC di potenza adeguata, che può essere nella colonnina di ricarica o a bordo mezzo. In quest'ultimo caso e la soluzione più studiata, è quella di utilizzare l'elettronica di potenza già presente a bordo (per l'azionamento) anche per la ricarica delle batterie. Tale soluzione è quella sviluppata dall'Università di Padova nell'ambito dell'ultima annualità della Ricerca di Sistema Elettrico. L'azionamento scelto è quello del Ducato elettrico, attualmente disponibile sul mercato da parte di diversi elaboratori (MicroVett ed altri). Nel caso MicroVett il caricabatteria è da 3 o 9 kW, a fronte di un pacco batteria variabile tra 30 e 60 kWh. Di conseguenza il tempo di ricarica minimo (c.b. grande/batteria minima) è maggiore di 3 ore. La conversione/modulazione della potenza può, come già detto, prevedere due stadi, a terra la conversione AC/DC ed a bordo la modulazione DC/DC.

Data la potenza e la variabilità del carico, un caricabatteria "a terra" deve essere alimentato in MT tramite un trasformatore da 1,6 o 2 MVA che, per quanto detto, potrebbe funzionare molte ore a basso carico e quindi in modo non ottimale dal punto di vista dell'efficienza. Il costo di installazione dell'intero impianto risulta inoltre essere elevato perché dipende dalla potenza di picco e non dalla potenza media. Di conseguenza, un impianto di questo tipo può diventare economicamente conveniente rispetto al caricabatteria a bordo solo se la frequenza d'uso è elevata, come nel caso delle flotte di veicoli elettrici (trasporto pubblico locale, car-sharing, mezzi per la distribuzione porta a porta delle merci).

Una definizione più accurata degli ambiti di convenienza delle due diverse tecnologie non è naturalmente ancora possibile, essendo entrambe in corso di sviluppo, e l'obiettivo più generale del programma triennale è proprio questo: concorrere a definire gli elementi mancanti (costi, benefici, eventuali breakthrough tecnologici) del quadro generale.

Passando alle tecnologie per l'alleggerimento, quelle che necessitano certamente di sviluppo sono da un lato le tecnologie di produzione di nuovi materiali che portino ad una sostanziale riduzione di costo, dall'altro le tecnologie di formatura e di giunzione ad elevata efficienza che permettano il migliore sfruttamento possibile dei nuovi materiali per il trasporto ed una sostanziale riduzione dei costi di produzione. Ovviamente l'altra leva notevole per permettere la penetrazione di questi nuovi materiali è il miglioramento che questi permettono in termini di confort e sicurezza nei vettori per il trasporto. In sintesi possono essere individuate:

- tecnologie di fabbricazione di materiali leggeri ed ad elevata riciclabilità;
- tecnologia di assemblaggio ad elevata efficienza (formatura, saldatura).

In particolare, per le tecnologie relative alla fabbricazione di materiali leggeri saranno sviluppate le tecnologie relative alla produzione di componenti in schiume metalliche di alluminio ed ibride metalliche, alluminio e acciaio. Le tecnologie di produzione delle schiume di alluminio per applicazioni industriali sono essenzialmente due la prima legata all'iniezione di gas nel fuso della CYMAT la seconda di metallurgia delle polveri della Alulight (ECKA Granulate). Allo stesso tempo la produzione di schiuma ibride di acciaio in matrice di alluminio possono avvenire per metallurgia delle polveri o fonderia.

Le tecnologie di saldatura delle leghe di alluminio tradizionali sono la TIG (Tungsten Inert Gas) e la MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas). I principali difetti della saldatura delle leghe di alluminio sono la porosità dispersa di idrogeno, le incollature, la cricatura a caldo e il "softening", in particolare nella zona termicamente alterata. I metodi innovativi per la saldature dei grandi estrusi di alluminio utilizzati nella realizzazione di carrozze ferroviarie sono principalmente la Friction Stir Welding (FSW) e al saldatura laser.

La FSW, essendo una saldatura allo stato solido, permette con appropriati parametri di ottenere degli ottimi risultati in termini qualitativi. Tuttavia, prevede dei costi di impianto notevoli legati anche alle royalty che è necessario pagare al TWI proprietario della tecnologia, produttività minore rispetto alla saldatura laser, possibilità di saldatura quasi esclusivamente testa a testa.

La saldatura laser, certamente più produttiva, ha comunque dei costi di impianto notevoli ed è suscettibile a porosità, cricatura a caldo ed inclusioni di allumina. Tali problematiche possono essere superate con l'impiego di opportuni materiali d'apporto e tecnologie ibride laser arco, che comunque moltiplicano la complessità dell'impianto che trova economicità principalmente in elevati volumi di produzione dello stesso componente (automotive) e meno si presta all'applicazione nel settore delle costruzioni ferroviarie dove i particolari identici sono di grosse dimensioni e in piccola serie e dove incidono notevolmente anche i costi legati alla sicurezza.

La tecnologia di saldatura proposta per la saldatura di grandi componenti in Aluminium Foam Sandwich e leghe di alluminio, da applicare nel settore dei grandi vettori per il trasporto, è la tecnologia plasma (PAW). Questa tecnologia, impiegata principalmente in settori di nicchia ad elevato valore aggiunto come quello aerospaziale, promette, con costi di investimento più limitati, livelli qualitativi comparabili con la saldatura laser. Inoltre, è parente della più tradizionale tecnologia TIG, con problematiche di sicurezza ben note agli addetti ai lavori, per cui più metabolizzabile dal tessuto produttivo delle piccole medie imprese del panorama italiano.

## **IL PROGETTO NEL TRIENNIO**

### **Risultati ottenuti nei precedenti piani triennali**

I principali risultati ottenuti nei piani annuali precedenti riguardano:

- Sperimentazione della ricarica rapida per le batterie Li-ione  
L'attività ha permesso di evidenziare la capacità di queste batterie di accettare correnti di ricarica superiori a quelle dichiarate dai costruttori, se opportunamente controllate elettricamente e termicamente
- Sperimentazione di sistemi di condizionamento termico per le batterie Li-ione
- Studio della riconfigurazione di un convertitore di trazione, della potenza di 40-50 kW, per ottenere un caricabatteria alimentabile in c.a., di uguale potenza, installato a bordo veicolo.

Studio di un prototipo di convertitore cc/cc controllato in tensione e/o in corrente, della stessa potenza del caso precedente. Lo studio è finalizzato all'utilizzo dello "smart storage" realizzato in Casaccia in altri Progetti della Ricerca di Sistema Elettrico (progetti relativi all'accumulo elettrico e alla generazione distribuita) per la dimostrazione reale di una stazione di rifornimento per veicoli elettrici con possibilità di interscambio con la rete.

- Allestimento di un laboratorio per la produzione di schiume di alluminio costituito da:
  - un gruppo di compattazione con capacità fino a 100 ton per pellet di diametro fino a 50 mm con possibilità di migliorare la compattazione mediante successiva estrusione per la produzione di precursori per la produzione di schiume metalliche di alluminio;
  - un forno semiautomatico con possibilità di studio del processo di schiumatura mediante registrazione del livello di schiumatura con sensore laser, controllo della temperatura fino a 1100°, carico e scarico automatico temporizzato con possibilità di trattare componenti fino a 200 x 400 x 100 mm.
- Sviluppo di procedure di qualificazione sia del materiale base sia della saldature Laser e fascio elettronico di pannelli Sandwich in schiuma di alluminio mediante test radiografici, ultrasonori e meccanici di compressione e flessione anche mediante Digital Imaging Correlation.



## Obiettivo finale dell'attività

L'obiettivo finale delle attività del presente Piano Triennale riguarda:

- lo sviluppo di componenti e sistemi hardware-software per sistemi di trasporto elettrico su gomma, con specifico riferimento ai sistemi di alimentazione ed alle interazioni degli stessi con la rete;
- studi sui possibili interventi e razionalizzazioni della mobilità elettrica, completati da simulazioni o sperimentazioni dimostrative;
- lo sviluppo e la qualificazione di nuovi materiali e tecnologie per l'alleggerimento strutturale dei vettori per il trasporto ferroviario e dei settori ad esso correlato.

In particolare verranno realizzati:

- stazione di ricarica per veicoli elettrici con possibilità di interscambio con la rete e ad elevato livello di automazione
- caricabatteria integrato, che consenta la ricarica completa in un'ora di un veicolo commerciale per la logistica in ambito urbano
- modelli della domanda di mobilità elettrica

e sviluppate:

- tecnologie di produzione di materiali metallici cellulari ad elevato rapporto resistenza peso
- tecnologie di giunzione non convenzionali per l'applicazione di leghe leggere a base di alluminio e magnesio nel settore ferroviario.

## Descrizione dell'attività a termine

Lo sviluppo dell'attività nell'arco della durata del programma e per le diverse linee è il seguente:

### Sviluppo delle strutture di alimentazione

Le attività si svilupperanno nel triennio su due temi principali, lo sviluppo e la sperimentazione di sistemi di ricarica rapida e lo sviluppo e sperimentazione di sistemi "ad elevato livello di automazione"

- *Sperimentazione ricarica rapida.* Nel corso dei tre anni d'attività si acquisirà (il primo anno) e sarà poi utilizzata per la sperimentazione una stazione di ricarica in corrente continua che completa il prototipo di "smart storage" realizzato in Casaccia nell'ambito di una linea di attività per l'integrazione delle tecnologie di generazione distribuita. La sperimentazione del sistema in c.c. sarà affiancata dalla sperimentazione di sistemi per la ricarica rapida che utilizzino colonnine in alternata, iniziando dalla realizzazione del prototipo dell'invertitore-caricabatteria per il Ducato progettato dall'Università di Padova. Successivamente il sistema verrà installato a brodo del mezzo e verranno svolte, possibilmente in collaborazione con utilities e municipalità, attività di sperimentazione dimostrative in ambito urbano. E' stato già stipulato un protocollo d'intesa con ENEL Distribuzione per la sperimentazione presso i nostri laboratori della colonnina Fast Charge da 43 kW sviluppata per conto di ENEL Distribuzione stessa, in accoppiamento al c.b. di bordo sopra.
- *Ricarica ad elevato livello di automazione.* Una linea tecnologica molto interessante, naturalmente collegata al tema "stazione di ricarica", è quella della "ricarica ad elevato livello di automazione", che può essere indispensabile, ad esempio, per introdurre la ricarica rapida nel trasporto pubblico locale. In questo ambito anche i sistemi di trasferimento dell'energia elettrica senza contatto (STEESC), che non richiedono l'impiego di mezzi di conduzione della corrente per ricaricare gli accumulatori di trazione a bordo dei veicoli elettrici, possono essere un'alternativa molto interessante ad altre soluzioni, come bracci robotizzati, pantografi etc. E' questa un'alternativa che ci si propone di approfondire, nel seguito del programma, con l'eventuale implementazione della stessa nella stazione di ricarica del CR Casaccia.

### Ottimizzazione delle interrelazioni tra i veicoli elettrici e le reti di distribuzione dell'energia

Le attività si svilupperanno con lo studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani, che è l'ambito di applicazione d'elezione della elettromobilità.

- *Interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani.* Attraverso lo studio della domanda di mobilità privata, di trasporto pubblico e di trasporto merci in ambito urbano, è possibile stimare la domanda di energia elettrica necessaria per la ricarica dei veicoli adibiti al trasporto con la sua più probabile distribuzione nel tempo e nello spazio. La caratterizzazione della domanda di trasporto pubblico e della distribuzione delle merci e l'elaborazione statistica dei dati consente, infatti, di individuare la domanda che può essere soddisfatta mediante l'impiego di veicoli elettrici nonché di avere informazioni sui percorsi e sugli orari. Lo stesso risultato può essere ottenuto, su base statistica, anche per l'insieme della mobilità privata, grazie alla sempre crescente diffusione dei dispositivi per la rilevazione della posizione dei veicoli privati a scopi assicurativi che consente di determinare i comportamenti prevalenti e le relative esigenze. Le attività di studio sviluppate in questo ambito consentiranno di disporre di elementi utili per la localizzazione sul territorio dei punti di ricarica, l'eventuale dimensionamento di sistemi di accumulo stazionario e la stima degli effetti sulla rete.

#### Sviluppo di materiali e processi per l'alleggerimento strutturale

Le attività nel triennio si svilupperanno in due temi che riguardano da una parte il prosieguo delle attività sullo sviluppo di componenti in schiume metalliche di alluminio basate sulla metallurgia delle polveri e la loro caratterizzazione, dall'altra lo sviluppo di processi di giunzione efficienti, in termini energetici e meccanici, sia su materiali porosi sia su leghe leggere non convenzionali per il sistema dei trasporti elettrificati.

- *Studio e sviluppo di processi per la fabbricazione di componenti in materiali metallici cellulari.*  
Lo sviluppo si concentrerà sulla produzione di precursori eutettici per estrusi rinforzati ed Aluminium Foam Sandwich mediante tecnologia di Metallurgia delle Polveri. Lo studio riguarderà le varie fasi di produzione dei differenti step di fabbricazione: miscelazione, compattazione, schiumatura. In particolare verranno ottimizzate le miscele di lega, agenti schiumanti e stabilizzanti ed i parametri di miscelazione per l'omogeneizzazione della distribuzione della dimensione delle celle. In particolare, a fianco alla compattazione per compressione uniassiale ed estrusione, sarà studiata la compattazione per colaminazione.
- *Sviluppo di processi di giunzione per Aluminium Foam Sandwich, leghe di Alluminio e Magnesio.*  
Sviluppo e caratterizzazione di procedimenti di saldatura Plasma ad elevata efficienza e produttività, loro qualificazione mediante appropriati test (non distruttivi e meccanici) e realizzazione di simulacri di componenti di treni/tram/metro in Aluminium Foam Sandwich e profilati estrusi.

#### **Prodotti significativi previsti alla fine del triennio**

- ✓ Stazione "Fast charge" da 50 kW in corrente continua in Casaccia, con annesso "smart storage"
- ✓ Stazione "Fast charge" da 43 kW in corrente alternata, in Casaccia, e caricabatteria "integrale" per "Fast charge" in corrente alternata per prove al banco e su veicolo, con annesso "smart storage"
- ✓ Stazione "Fast charge" in corrente alternata ad "elevato livello di automazione" (STEEC o robotizzata), per micro vettura
- ✓ Sviluppo di metodologie di progettazione, di realizzazione ed assemblaggio di materiali e strutture leggere (schiuma di alluminio e leghe leggere)

#### **Coordinamento con attività di CNR e RSE**

ENEA è da tempo in contatto con il Dipartimento Tecnologie per la Trasmissione e Distribuzione di RSE su i temi dell'analisi del profilo energetico di missione dei veicoli elettrici e del relativo impatto sulla rete di distribuzione; il coordinamento verrà esteso al tema della ricarica di flotte di veicoli, mettendo a fattor comune la nostra esperienza nel campo motoristico e dei veicoli elettrici in generale con quella di RSE sulle reti elettriche. In particolare, le attività sopra riportate relative al dimensionamento del "sistema della domanda di ricarica nello spazio e nel tempo" saranno definite anche nell'ottica di una integrazione con le attività RSE che vedono il problema "lato offerta (di ricarica)".

Per quanto riguarda invece le attività di cui alla prima e terza linea di ricerca, esse riguardano il veicolo elettrico più che la rete (caricabatteria di bordo ed alleggerimento strutturale) e pertanto non rientrano tra quelle fino ad oggi oggetto di ricerca da parte di RSE.

### ***Benefici previsti per gli utenti del sistema elettrico nazionale dall'esecuzione delle attività***

Il settore dei trasporti assorbe una quota parte notevole dei consumi finali di energia che si assesta al 31% dell'energia primaria. Dei consumi complessivi, circa i 2/3 sono dovuti al trasporto passeggeri, la restante parte al trasporto merci, e sono entrambi dominati dalla modalità stradale: 89% dei consumi del trasporto passeggeri, addirittura il 93% di quello merci. I consumi del trasporto ferroviario incidono sul consumo energetico totale del settore trasporti per poco più del 2% e nel 2009 ammontavano complessivamente a circa 1,2 Mtep, dei quali circa l'80% ascrivibile al trasporto passeggeri.

Elettrificazione dei trasporti su gomma: l'impatto ambientale, in termini di CO<sub>2</sub>/kWh alla ruota, della trazione termica è, mediamente, ben maggiore di quella elettrica. Ad esempio, da un recente studio commissionato da Trenitalia ad ENEA, l'emissione di CO<sub>2</sub> per passeggero su tratte servite dall'Alta Velocità è il 50% del trasporto su gomma; analogo risultato è stato determinato da uno studio ATAC di confronto tra un autobus articolato da 18 ed un filobus di eguale capacità di trasporto. In tutti e due i casi si è considerato il mix italiano di produzione dell'energia elettrica.

Considerando invece veicoli a batteria, il maggior peso della versione elettrica ed il rendimento di carica e scarica dell'accumulo elettrico influiscono su consumi ed emissioni, che aumentano rispetto a quello dei veicoli elettrici con infrastruttura fissa (catenaria o terza rotaia), restando però inferiori del 35-40% a quelle del corrispondente veicolo convenzionale (misure ENEA). Il confronto è fatto naturalmente a parità di servizio, che è quello urbano perché il più adatto a valorizzare le peculiarità della trazione elettrica (autonomia limitata, niente consumi alle fermate, recupero d'energia in frenatura).

Ricarica rapida: oltre all'impatto positivo sull'architettura del veicolo, ha un impatto positivo anche sulla rete di distribuzione dell'energia elettrica. Infatti la diffusione di sistemi di accumulo elettrico nelle stazioni di servizio, necessari per sopperire ai picchi di potenza richiesti dalla ricarica rapida e contemporanea di più mezzi, potrebbe avere anche una funzione di "carico caldo" per il riequilibrio della rete. Ciò consentirebbe di utilizzare in modo più efficace le fonti di energia rinnovabili, che hanno un servizio intermittente nel tempo (energy management), di sopperire entro frazioni di secondo alle variazioni o alle interruzioni di erogazione dell'energia elettrica (power quality), ed infine di assicurare la continuità del servizio, per esempio quando si passa da un generatore elettrico a un altro (bridging power). In definitiva tutto ciò permetterebbe una estensione delle "smart grid" dalla sola generazione distribuita alla generazione-accumulo distribuito.

Tuttavia, qualsiasi sia il tipo di propulsione ed il tipo di vettore per il trasporto, ogni incremento di efficienza nello sfruttamento dell'energia primaria, sintetizzato molto spesso con l'acronimo anglosassone WTW (Well To Wheel, ovvero efficienza dal pozzo alla ruota), passa dall'alleggerimento dei vettori per il trasporto ad allo sviluppo delle tecnologie di produzione ad esso correlate.

Questo è particolarmente vero per i trasporti urbani, sia su gomma che su rotaia, caratterizzati dalla prevalenza delle perdite per accelerazione rispetto a quelle aerodinamiche. In particolare, l'alleggerimento dei vettori per il trasporto ferroviario metropolitano, permette una forte riduzione di consumi di energia primari, perché questi sono dipendenti per oltre l'80% dalle forze d'inerzia.

Con riguardo poi ai micro-vettori urbani a propulsione elettrica, lo sviluppo di materiali e tecnologie per l'alleggerimento strutturale dei mezzi di trasporto permette la riduzione del peso con conseguente riduzione dell'energia necessaria, che, nel ciclo urbano, è all'incirca dello 0,8% per ogni punto percentuale di riduzione del peso del veicolo. Per i vettori elettrici questo si traduce nella possibilità di poter meglio bilanciare il compromesso fra il peso della batteria, il carico utile e l'autonomia.

## **PIANIFICAZIONE ANNUALE DELLE ATTIVITÀ**

### **Elenco degli obiettivi relativi all'annualità 2012**

#### **a. Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in c.a. ed in c.c.**

Le attività svolte nelle due sub-task (ricarica in c.a. con caricabatteria a bordo, modo 3, IEC 61851-1); ricarica in c.c. con caricabatteria a terra, modo 4, IEC 61851-1) permetteranno di effettuare una serie di esperienze e misure che consentiranno un bench-mark tecnico-economico preliminare delle due soluzioni, ad esempio dal punto di vista dei rendimenti.

##### **a.1 Ricarica rapida in c.a.**

Con la collaborazione dell'Università di Padova, sarà condotto uno studio preliminare sulla ricarica "contactless" (STEESC cosiddetti risonanti). Lo studio riguarderà la struttura e il progetto di STEESC con ragionevoli valori di efficienza del trasferimento energetico quando la bobina trasmittente e quella ricevente non sono perfettamente allineate oppure quando il loro accoppiamento varia nel tempo come accade nel caso di un veicolo in movimento rispetto alla bobina trasmittente, come per esempio quando il veicolo è in fase di avvicinamento o di allontanamento dalla piazzola di sosta.

E' poi prevista la prosecuzione dello studio sul caricabatteria "integrale" già sviluppato dall'Università di Padova nella precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, costituito da un inverter in "reverse mode" che integra due funzioni: quella di alimentazione e controllo della M.E. durante la marcia (dc/ac) e quella di ricarica (ac/dc) dell'accumulo elettrico (batteria Li-Ione) nelle soste. Si evitò così il maggior costo di un ricaricabatterie a bordo ad alta potenza. Verrà realizzato un prototipo da provare in laboratorio, con un motore elettrico già disponibile in ENEA e con la batteria di un Fiat Ducato elettrico (120 Ah/300 V).

##### **a.2 Ricarica rapida in c.c.**

E' prevista la realizzazione in Casaccia di una stazione di ricarica che utilizzerà il prototipo di "smart storage" già realizzato nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico. Il prototipo è attualmente costituito da un convertitore front-end AC/DC e da un sistema d'accumulo controllato di tipo elettrochimico. L'impianto suddetto verrà completato con una colonnina di ricarica in c.c. della potenza nominale di 50 kW, e permetterà quindi l'alimentazione in un'ora o meno di pacchi batteria fino a 40-50 kWh (e.g., il Fiat Ducato elettrificato da MicroVett ha una batteria che nella versione a minore autonomia, E80, consente l'accumulo di 30 kWh, circa).

L'attività sarà completata dalla verifica delle prestazioni della colonnina in condizioni realistiche di funzionamento, utilizzando un sistema di misura sviluppato con l'obiettivo di poter valutare correttamente l'efficienza del convertitore anche in condizioni dinamiche.

##### **a.3 Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali**

L'attività prevede la partecipazione attiva a diverse iniziative internazionali che sono una fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali, e che sono funzionali al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso. Pertanto proseguiranno le attività relative alla partecipazione alle attività nell'ambito dell'International Energy Agency (IEA), per quanto concerne gli Implementing Agreement "Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes"

##### **Risultati/Deliverable:**

- Studio di fattibilità per un impianto di ricarica contactless
- Realizzazione di un inverter-caricabatteria per un Ducato, e sperimentazione dello stesso (2 report)
- Realizzazione e sperimentazione di una stazione di ricarica rapida in c.c. nel CR Casaccia
- Rapporto sulle attività IEA

Principali collaborazioni: Università di Padova, Università dell'Aquila

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **b. Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti**

L'elettrificazione della mobilità comporta importanti ricadute sull'assorbimento di energia dalla rete nel tempo e nello spazio di cui non sono completamente note l'entità e la caratterizzazione. Per far fronte a tale carenza di conoscenza si prevede la realizzazione di uno studio sulla mobilità in ambito urbano, merci e persone, svolto in collaborazione con il Centro Trasporti e Logistica (CTL) dell'Università "Sapienza".

Tale studio sarà condotto su un caso di indagine significativo, presumibilmente l'area urbana di Roma, al cui interno saranno analizzati gli attuali comportamenti dei più importanti segmenti di traffico, nella fattispecie il trasporto privato su autovettura, il Trasporto Pubblico Locale (TPL) e la distribuzione delle merci. Per il primo insieme si prevede di utilizzare i dati di un periodo adeguato di monitoraggio della flotta veicolare equipaggiata con dispositivi per la rilevazione della posizione dei veicoli a scopi assicurativi, mentre per il TPL e la distribuzione delle merci sarà realizzata un'analisi a partire da indagini pregresse, aggiornate per gli aspetti più rilevanti ai fini dello studio.

Lo studio analizzerà il carico previsto nelle diverse fasce orarie per tenere conto della variazione giornaliera della domanda di energia, dovuta alle variazioni dell'esercizio del trasporto, oltre che dell'effetto sui consumi energetici dovuto alla variazione giornaliera delle velocità operative. Si terrà inoltre in considerazione, attraverso un'analisi per scenari, dell'evoluzione della domanda di mobilità al 2020 in relazione all'andamento dell'economia e del prezzo dell'energia. Il risultato atteso è il profilo giornaliero medio dell'assorbimento di energia elettrica nel caso di studio.

Risultati/Deliverable:

- Studio sulle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani

Principali collaborazioni: Sapienza Università di Roma

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **c. Sviluppo dei processi di produzione e caratterizzazione di componenti strutturali innovativi per la riduzione del peso dei veicoli a trazione elettrica**

Alla luce dei risultati ottenuti nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, il processo di produzione dei compositi in schiuma di alluminio mediante Metallurgia delle polveri può essere suddiviso in due distinte linee: apparecchiature e processi per precursori da utilizzarsi come riempitivi in elementi di assorbimento di energia (*crashworthiness*); apparecchiature e processi per elementi compositi con legame metallurgico AFS.

Le apparecchiature per la prima linea di processo, costituite dal sistema di compattazione e dal forno di schiumatura sono state progettate e/o acquisite nel corso delle precedenti attività. Tramite essi, saranno ottimizzati i parametri di compattazione con le matrici di compattazione ed estrusione già sviluppate applicando tecniche statistiche di Design of Experiment. In particolare, sarà approfondito lo studio relativo all'influenza dei parametri di processo (pressione, temperatura e velocità) sulla densità e sulle proprietà microstrutturali dei precursori e di come questi influenzino la dimensione e distribuzione dei pori delle schiume.

Per la seconda linea di processo, gli studi hanno evidenziato come per la formazione del *bonding* metallurgico e la realizzazione di materiali compositi metallici alluminio-schiuma sia necessario ottenere una compattazione delle polveri direttamente per co-laminazione polveri/pelli. In collaborazione con l'Università degli Studi di Roma Tor Vergata, saranno effettuati studi e test per la realizzazione di compositi metallo-precursore-metallo con legame metallurgico indotto per colaminazione su campioni di dimensioni fino a 200 x 400 mm che potranno essere successivamente schiumati nell'apposito forno ENEA.

Infine, verrà sviluppata la tecnologia di saldatura plasma, per la realizzazione di componenti in leghe di alluminio di interesse nel settore ferroviario (5xxx/6xxx) e pannelli AFS, in alternativa alla tecnologia di

saldatura laser che permette anch'essa la realizzazione di saldatura key-hole con notevoli vantaggi dal punto di vista metallurgico e di produttività con un costo contenuto di impianto e con problematiche di sicurezza praticamente identiche a quelle ben note da parte del tessuto industriale tradizionale che opera nella saldatura di componenti con tecnologia ad arco. L'attività si prefigge di allestire una stazione di saldatura plasma key-hole, mediante l'acquisto di uno specifico generatore da installare sulle postazioni di saldatura disponibili nel CR ENEA di Casaccia, e di testare le potenzialità di questo processo e compararlo con la tecnologia laser sviluppata nel corso delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico. L'implementazione di tale tecnologia di saldatura, ad elevata produttività ed elevata efficienza di giunzione, promette a parità di materiali, grazie alla possibilità di realizzare specifiche architetture con specifici tipi di giunto, la produzione di componenti con minor peso rispetto a quelli realizzabili con tecnologie di saldatura tradizionali che possono portare alla riduzione del peso di alcuni componenti delle carrozze ferroviarie (pavimenti, imperiali, fiancate) del 10-15% considerando la sola maggiore efficienza di giunzione.

#### Risultati/Deliverable:

- Rapporto tecnico: Ottimizzazione dei parametri di compattazione ed estrusione di precursori originali per schiume di alluminio. (+ Campioni di Precursori il leghe di alluminio ottenuti per pressatura uniassiale e/o Estrusione)
- Rapporto tecnico: Sistemi di produzione di compositi di precursori per pannelli AFS mediante colaminazione. (+ campioni schiumati con dimensioni fino a 200 x 400 mm)
- Rapporto tecnico: Tecniche di saldatura ad elevata efficienza per il settore ferroviario. (più campioni saldati di componenti in AFS e profilati in lega di alluminio di dimensioni fino a 500 x 500 mm)

Principali collaborazioni: Università Roma Tor Vergata

Durata: ottobre 2012 - settembre 2013

#### **Comunicazione e diffusione dei risultati**

La divulgazione dei risultati, per tutte le precedenti attività, verrà assicurata attraverso rapporti tecnici resi disponibili sul sito ENEA dedicato e con articoli su riviste scientifiche e memorie presentate a convegni nazionali e internazionali.

In particolare, è prevista la partecipazione ad (almeno) i seguenti congressi e attività dimostrative:

- EVS-27 Electric Vehicle Symposium, l'appuntamento più importante sull'elettromobilità
- Formula ATA Electric & Hybrid Vehicle, manifestazione dell'Associazione Tecnica dell'Auto che prevede la competizione tra team universitari
- METFOAM 2013 8th International Conference on Porouse Metals and Metallic Foams - North Carolina State University Giugno 2013

e la pubblicazione di articoli su riviste nazionali/internazionali.

**PROGETTO C.4 “Prodotti e processi per il miglioramento dell’ efficienza energetica nell’elettromobilità”**

**Obiettivi e relativi preventivi economici**

Sigla	Denominazione obiettivi	Ore di personale ENEA	SPESE AMMISSIBILI * (k€)						TOTALE
			Personale (A)	Strumenti e attrezzature (B)	Costi di esercizio (C)	Acquisizione di competenze (D)	Viaggi e missioni (E)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	
a	Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in c.a. ed in c.c.	3764	207	60	15	0	8	60	350
b	Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti	1364	75	0	0	0	2	30	107
c	Sviluppo dei processi di produzione e caratterizzazione di componenti strutturali innovativi per la riduzione del peso dei veicoli a trazione elettrica	3345	184	4	6	0	4	45	243
<b>TOTALE</b>		<b>8473</b>	<b>466</b>	<b>64</b>	<b>21</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>135</b>	<b>700</b>

\* in base al documento “Modalità di rendicontazione e criteri per la determinazione delle spese ammissibili”, deliberazione AEEG n. 19/2013/Rds

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie

## COMUNICAZIONE E DIFFUSIONE DEI RISULTATI

Le attività oggetto dell'Accordo di Programma MSE-ENEA per la Ricerca di Sistema Elettrico sono finanziate attraverso un Fondo che viene alimentato tramite una componente della tariffa di fornitura dell'energia elettrica e sono svolte a totale beneficio degli utenti del Sistema Elettrico. I risultati delle attività di ricerca sono pubblici e disponibili per tutti. In tale ambito, grande importanza e attenzione sarà quindi posta nella predisposizione e attuazione di un Piano di diffusione dei risultati ottenuti.

Le azioni di comunicazione, partendo dai risultati già ottenuti dall'ENEA e dalle Società partecipate e le Università coinvolte, prevedono di:

- realizzare, con un linguaggio efficace dal punto di vista comunicativo, materiali informativi destinati ai vari target di riferimento, beneficiari finali delle attività (Enti Locali, Sistema delle Imprese, professionisti ecc.) nonché al grande pubblico
- elaborare e attuare un Piano di comunicazione e diffusione capillare di queste informazioni e, soprattutto, dei risultati conseguiti e delle ricadute sull'utente finale.

Il termine capillare è quello che caratterizza meglio gli obiettivi e le modalità che ispirano il Piano e le attività di comunicazione e diffusione, i cui obiettivi prioritari sono:

- arrivare direttamente agli interessati (la Comunità Scientifica, gli operatori del settore Energia, le Istituzioni e la Pubblica amministrazione, il grande pubblico)
- fornire informazioni consone ai singoli destinatari con vari livelli di dettaglio, fino al più completo e specialistico
- mantenere costante l'attenzione, partendo dalla diffusione iniziale di informazioni a carattere generale e continuando nella diffusione dei risultati che via via vengono conseguiti.

Le principali azioni di diffusione e comunicazione riguarderanno principalmente:

- partecipazione ai principali network internazionali di scambio di informazioni (IEA, EERA, ecc.) e partecipazione ai principali workshop nelle diverse tematiche di ricerca
- pubblicazioni ed articoli sulla stampa, generica e specializzata
- elaborazione dei rapporti tecnici, che riportano informazioni e dettagli di grande importanza, ma destinati a un pubblico ristretto di tecnici e specialisti del settore ed in parallelo la diffusione di testi e strumenti informativi destinati ad un pubblico più vasto e ad esso più accessibili
- organizzazione di eventi (workshop, seminari, manifestazioni espositive) il più possibile distribuiti sul territorio nazionale, sia per illustrare i risultati nella loro totalità, che per argomenti specifici
- Implementazione del sito web della Ricerca di Sistema Elettrico ([http://www.enea.it/enea\\_paese/ricerca\\_sistema\\_elettrico.html](http://www.enea.it/enea_paese/ricerca_sistema_elettrico.html)) Implementazione e manutenzione di siti web dedicati.